

УДК 550.837.6

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ ВЫСОКОШИРОТНЫХ РАЙОНОВ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА FENICS-2019

© 2021 г. В. А. Любчик*

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Мурманск, Россия*

**E-mail: lubchich@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 20.10.2020 г.

Принята к публикации 27.11.2020 г.

Рассмотрены результаты экспериментальных измерений электромагнитного поля от контролируемого источника на полуостровах Рыбачий и Средний, проведенных в рамках проекта FENICS-2019 по электромагнитному зондированию земной коры Балтийского щита с использованием промышленных линий электропередач. По результатам работ были построены геоэлектрические разрезы для верхней части литосферы исследуемого района.

DOI: 10.31857/S0367676521030169

ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена изучению закономерностей изменения глубинного строения литосферы в зоне перехода от Восточно-Европейского кратона к Западно-Арктической платформе на примере полуостровов Рыбачий и Средний. До сих пор сведения о строении земной коры в данном районе остаются весьма скудными. Здесь проводилось сейсмическое профилирование по отдельным профилям [1] и были выполнены площадные работы методом аудиоманнитотеллурических зондирований (АМТЗ) [2]. В 2019 году на Кольском полуострове проводился эксперимент FENICS-2019 по электромагнитному зондированию (ЭМЗ) литосферы Балтийского щита с использованием промышленных линий электропередач (ЛЭП). В рамках этого эксперимента впервые были выполнены ЭМЗ с мощным контролируемым источником на полуостровах Рыбачий и Средний. Выполненные измерения имеют большое значение для получения новых знаний о глубинном строении земной коры. В практическом отношении материалы исследований позволят более обоснованно подойти к геодинамическим реконструкциям эволюции региона и могут быть использованы для обоснования закономерностей образования и размещения полезных ископаемых, в том числе для оценки углеводородного потенциала осадочных бассейнов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В процессе проведения эксперимента FENICS-2019, целью которого являлось изучение строения литосферы в пределах Балтийского щита электромагнитными методами, группа сотрудников Полярного геофизического института (ПГИ) выполнила электромагнитные зондирования земной коры на полуостровах Рыбачий и Средний, в зоне перехода от пород кристаллического архейского Балтийского щита к породам осадочного чехла южной окраины Баренцевоморской плиты.

В качестве контролируемого источника электромагнитного поля использовался экспериментальный образец мощного генератора, разработанный в ПГИ на базе повышающего преобразователя и системы энергопередачи генератора “Энергия-2” [3]. Номинальная мощность передатчика составляла 200 кВт. Одной из излучающих антенн контролируемого источника электромагнитных волн являлась промышленная линия электропередачи Л-403 длиной 130 км, расположенная в северо-западной части Кольского полуострова и имеющая ориентацию с северо-запада на юго-восток. В данной линии генерировались электромагнитные поля в интервале частот 0.194–94.22 Гц. Сила действующего тока в линии была в пределах 20–230 А в зависимости от частоты электромагнитного поля.

Измерения электромагнитных полей производились в двух пунктах, расположенных в южной части полуострова Рыбачий и на полуострове

Средний в окрестности буровой скважины “Пограничная-1”. Схема расположения точек измерения электромагнитного поля и излучающей антенны генератора приведена на рис. 1. На поверхности Земли измерялись взаимно ортогональные горизонтальные магнитные и электрические компоненты поля. За ось X принято направление на север вдоль магнитного меридиана. Длина приемных электрических антенн составляла 100 м. Регистрация компонент электромагнитного поля производилась с помощью индукционного магнитометра, разработанного в ПГИ. Аналоговые сигналы с магнитных датчиков и приемных электрических линий обрабатывались цифровой системой сбора данных, основанной на шестиканальном 22-битном аналого-цифровом преобразователе [4] с частотой дискретизации 1024 Гц. Данная система сбора данных обеспечивала привязку измерений к мировому времени по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Широкая полоса пропускания индукционного магнитометра, от 0.1 до 500 Гц, и цифровая система сбора данных позволили зарегистрировать не только активные сигналы от контролируемого источника электромагнитного поля, но и записать электромагнитный шум от естественных источников поля. Таким образом, в точках регистрации поля одновременно проводились и электромагнитные зондирования Земли с контролируемым источником, и магнитотеллурические зондирования (МТЗ).

Для заданной геометрии эксперимента, то есть взаимного расположения передающей линии генератора и точек измерения электромагнитного поля, были рассчитаны кривые нормального поля для выбранного набора частот генерируемого сигнала. Кривые нормального поля представляют собой зависимости отношения амплитуды полного горизонтального электрического поля к амплитуде полного горизонтального магнитного поля, измеренных на поверхности однородного полупространства, от удельного электрического сопротивления среды для заданной частоты электромагнитного поля. С помощью этих кривых экспериментально измеренные значения амплитуд электрического и магнитного полей были пересчитаны в значения кажущегося сопротивления среды. Графики зависимости кажущегося сопротивления ρ_k от частоты f представлены на рис. 2 (кривые 1).

По результатам магнитотеллурических зондирований были рассчитаны значения импеданса Бердичевского [5]:

$$Z_{berd} = \frac{Z_{xy} - Z_{yx}}{2}, \quad (1)$$

где Z_{xy} и Z_{yx} — главные компоненты тензора импеданса, представляющие собой отношения горизонтальных ортогональных компонент электри-

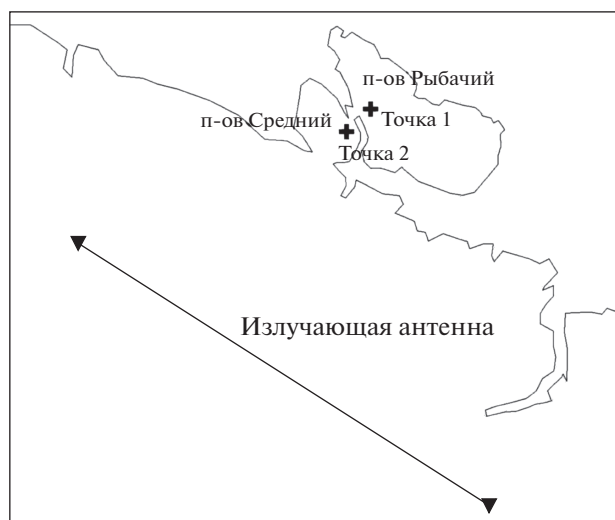


Рис. 1. Схема расположения пунктов регистрации электромагнитного поля и излучающей антенны генератора.

ческого E и магнитного полей H , измеренных на земной поверхности:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y}; \quad Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x}. \quad (2)$$

С помощью модуля импеданса Бердичевского также были вычислены значения кажущегося сопротивления среды:

$$\rho_k = \frac{|Z_{berd}|^2}{\omega \mu}, \quad (3)$$

где ω — круговая частота электромагнитного поля, μ — магнитная проницаемость среды. Графики кажущегося сопротивления ρ_k , полученные по данным МТЗ, также представлены на рис. 2 (кривые 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для построения геоэлектрических разрезов земной коры в районах расположения точек измерений электромагнитного поля на полуостровах Рыбачий и Средний была выполнена трансформация кривых зависимости кажущегося сопротивления ρ_k от частоты поля f в графики зависимости действующего сопротивления среды ρ' от действующей глубины z' с помощью дифференциальной трансформации Молочного—Ле Вьета:

$$z' = \sqrt{\rho_k / (\omega \mu)}; \quad (4)$$

$$\rho'(z') = \rho_k * (1 + m/2)^2 \quad (5)$$

для нисходящей ветви кривой ρ_k ;

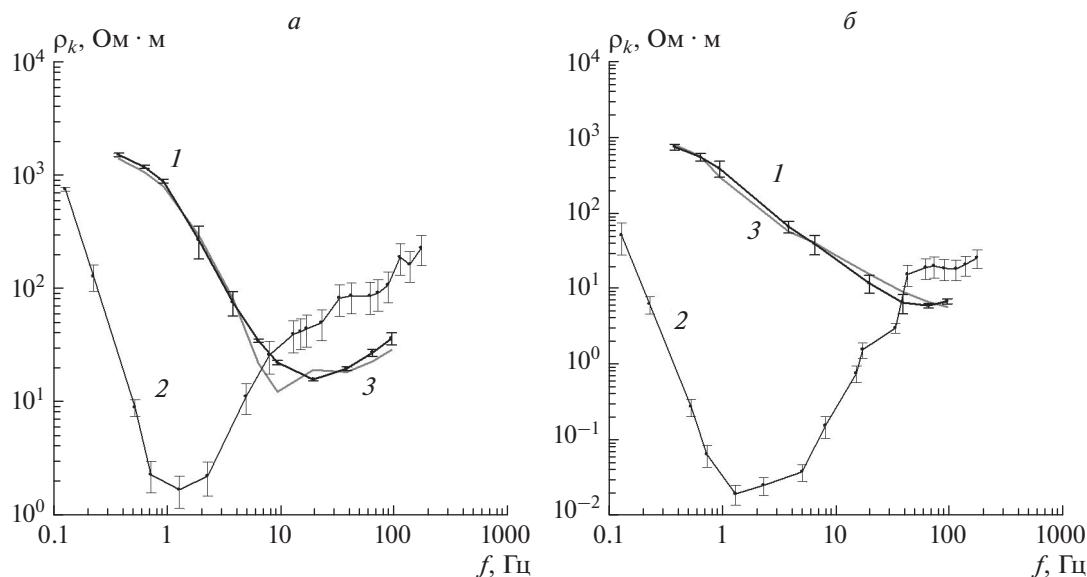


Рис. 2. Графики зависимости кажущегося сопротивления ρ_k от частоты электромагнитного поля f : *a* — для точки наблюдения на полуострове Рыбачий, *б* — для точки наблюдения на полуострове Средний. Кривые 1 соответствуют экспериментально измеренным данным ЭМЗ с контролируемым источником, кривые 2 соответствуют экспериментально измеренным данным МТЗ, кривые 3 соответствуют теоретически рассчитанным данным по результатам модельных вычислений.

$$\rho'(z') = \rho_k / (1 - m/2)^2 \quad (6)$$

для восходящей ветви кривой ρ_k ,

где параметр m определяется наклоном кривой кажущегося сопротивления в двойном логарифмическом масштабе

$$m = \frac{d \lg \rho_k}{d \lg 1/f}. \quad (7)$$

Применение дифференциальной трансформации Молочного—Ле Вьета к экспериментальным данным ЭМЗ с контролируемым источником является достаточно формальным, так как на низких частотах не выполняется условие аппроксимации электромагнитного поля плоской волной. Но для верхней части геоэлектрического разреза, соответствующей породам осадочного чехла с низким электрическим сопротивлением, такая трансформация является оправданной и может дать важную информацию о литологическом строении и мощности осадочного чехла.

Рассмотрев характер графиков кажущегося сопротивления ρ_k для точки измерения электромагнитного поля на полуострове Рыбачий (рис. 2*a*), можно отметить, что кривые соответствуют трехслойной среде с наличием проводящего слоя, расположенного между высокоомным фундаментом и слоем с относительно повышенным удельным сопротивлением в верхней части разреза. При этом кривая кажущегося сопротивления, построенная по данным МТЗ, имеет более глубокий и ярко вы-

раженный минимум, сдвинутый в сторону более низких частот, по сравнению с графиком, относящимся к данным ЭМЗ с контролируемым источником.

На рис. 3*a* представлены результаты дифференциальной трансформации Молочного—Ле Вьета для данных ЭМЗ с контролируемым источником (кривая 1). Из рисунка видно, что на глубине порядка 670 м наблюдается максимум действующего сопротивления среды, с дальнейшим ростом глубины просматривается понижение действующего сопротивления, а с глубины порядка 6 км отмечается повышение сопротивления, вероятно обусловленное влиянием кристаллического фундамента.

Для данных МТЗ в полном объеме провести дифференциальную трансформацию не удастся, так как в результате получается самопересекающаяся кривая зависимости действующего сопротивления среды ρ' от действующей глубины z' . Данное обстоятельство обусловлено, вероятно, искажениями кривой МТЗ вследствие влияния мощных тектонических разломов, в частности, системой сдвига-надвигов Троллефьорд—Рыбачий—Кильдин (ТРК) [6], разделяющей полуострова Рыбачий и Средний. На рис. 3*a* представлены результаты дифференциальной трансформации Молочного—Ле Вьета для низкочастотной ветви кривой МТЗ (кривая 2). По своей форме полученный график повторяет кривую, полученную по данным ЭМЗ с контролируемым источ-

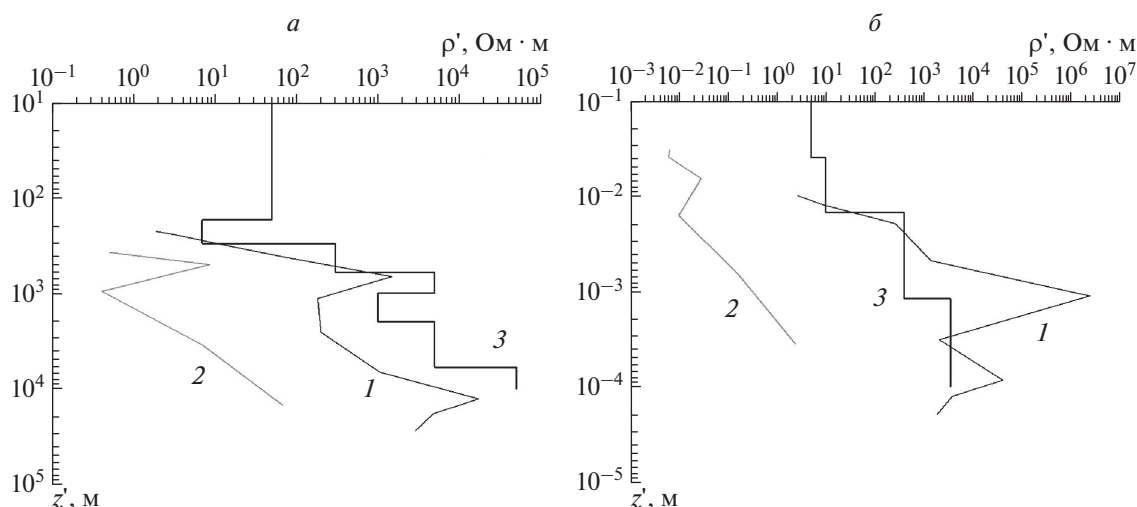


Рис. 3. Графики зависимости действующего сопротивления среды ρ' от действующей глубины z' , построенные по результатам дифференциальной трансформации Молочного–Ле Вьета: *a* – для точки наблюдения на полуострове Рыбачий, *б* – для точки наблюдения на полуострове Средний. Кривые 1 соответствуют результатам трансформации для данных ЭМЗ с контролируемым источником, кривые 2 соответствуют результатам трансформации МТЗ, кривые 3 демонстрируют подобранные одномерные модели геоэлектрического разреза среды.

ником, только он сдвинут в сторону более низких значений действующего сопротивления среды.

Основываясь на полученных результатах, была подобрана одномерная геоэлектрическая модель среды, также представленная на рис. 3а (кривая 3). Модель состоит из проводящего верхнего слоя до глубины 600 м с сопротивлением порядка 7–300 Ом · м, относительно высокоомного слоя с сопротивлением 5000 Ом · м в пределах глубин 600–1000 м, слоя с относительно пониженным сопротивлением 1000 Ом · м в пределах глубин 1000–2000 м, слоя с сопротивлением 5000 Ом · м в пределах глубин 2000–6000 м и высокоомного основания с сопротивлением 50000 Ом · м. На рис. 2а приведена соответствующая теоретическая кривая кажущегося сопротивления (кривая 3), рассчитанная для подобранной модели среды и заданной геометрии эксперимента. Эта кривая хорошо совпадает с экспериментально полученной кривой кажущегося сопротивления (кривая 1) для данных ЭМЗ с контролируемым источником.

Анализируя графики кажущегося сопротивления ρ_k для точки измерения электромагнитного поля на полуострове Средний (рис. 2б), следует отметить значительные различия кривых для данных МТЗ и данных ЭМЗ с контролируемым источником. Кривая, построенная по данным МТЗ, соответствует трехслойной среде с промежуточным электропроводящим слоем, расположенным между высокоомными фундаментом и приповерхностным слоем, и характеризуется глубоким и широким минимумом.

В то же время, кривая кажущегося сопротивления, построенная по данным ЭМЗ с контролируемым источником, более соответствует двухслойной

кривой, где верхний слой с повышенной электропроводностью расположен над плохо проводящим фундаментом. Дифференциальная трансформация Молочного–Ле Вьета данной кривой, результаты которой представлены на рис. 3б (кривая 1), демонстрирует резкий скачок действующего сопротивления среды на глубине порядка 1100 м. Данный скачок можно объяснить влиянием кристаллического фундамента. На этой же глубине скважина “Пограничная-1” вошла в породы кристаллического фундамента [7].

Вид графика кажущегося сопротивления для данных МТЗ, в частности, аномально низкие значения кажущегося сопротивления в минимуме, свидетельствует о сильных искажениях кривой, обусловленных влиянием тектоники района. Полуостров Средний расположен между линеamentом ТРК и сбросом Карпинского, отделяющим полуостров от Балтийского щита [6]. Поэтому провести дифференциальную трансформацию для данных МТЗ в полном объеме не удастся. На рис. 3б представлены результаты дифференциальной трансформации Молочного–Ле Вьета для низкочастотной ветви кривой МТЗ (кривая 2). Из рисунка видно, что график сильно смещен в область аномально низких значений действующего сопротивления среды ρ' и по форме отличается от кривой, полученной для данных ЭМЗ с контролируемым источником.

Исходя из результатов дифференциальной трансформации кривой кажущегося сопротивления для данных ЭМЗ с контролируемым источником, была подобрана одномерная геоэлектрическая модель среды, также представленная на рис. 3б (кривая 3). Модель состоит из низкоомно-

го верхнего слоя до глубины 1200 м с сопротивлением порядка 5–400 Ом · м и относительно высокоомного основания с сопротивлением 3500 Ом · м. На рис. 2б показана соответствующая модели рассчитанная кривая кажущегося сопротивления (кривая 3), согласующаяся с экспериментальной кривой кажущегося сопротивления (кривая 1) для данных ЭМЗ с контролируемым источником.

Полученные результаты интерпретации данных ЭМЗ с контролируемым источником хорошо согласуются с имеющейся геолого-геофизической информацией о строении литосферы в районе полуостровов Рыбачий и Средний. Как уже упоминалось выше, на полуострове Средний буровая скважина “Пограничная-1” вскрыла породы кристаллического фундамента на глубине 1100 м, что соответствует построенной модели геоэлектрического разреза для полуострова Средний (рис. 3б).

Модель геоэлектрического разреза, построенная для южной части полуострова Рыбачий (рис. 3а), коррелирует с сейсмогеологическим разрезом для сейсмического профиля, пересекавшего полуострова Средний и Рыбачий [1]. В районе расположения точки наблюдения 1, на глубинах порядка 6 км отмечается нижняя граница осадочных пород рыбачинской серии. Кроме того, полученные результаты согласуются с геоэлектрической моделью земной коры для полуострова Рыбачий, построенной в процессе 2D инверсии данных АМТЗ [2]. В этой модели для южной части полуострова граница фундамента расположена на глубинах 5–6 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности использования мощных контролируемых источников электромагнитного поля, применение которых позволяет определять параметры геоэлектрического разреза земной коры в сложных геологических условиях переходной зоны от кристаллического Балтийского щита к породам осадочного чехла южной окраины Баренцево-морской плиты, характеризующейся наличием

сложноразветвленной системы мощных тектонических нарушений.

Было также установлено, что в таких сложных геологических условиях кривые магнитотеллурических зондирований подвергаются сильным искажениям. Поэтому при проведении геофизических работ в данном районе предпочтительнее использовать электромагнитные методы с контролируемым источником.

Результаты проведенных электромагнитных зондирований земной коры и выполненного математического моделирования подтверждают слоистую структуру осадочного чехла исследуемого района и хорошо согласуются с имеющейся геолого-геофизической информацией о строении литосферы полуостровов Средний и Рыбачий, а именно данными бурения и сейсмического профилирования.

Автор выражает благодарность сотруднику Полярного геофизического института А.В. Роскуляку за участие в проведении экспериментальных работ на полуостровах Средний и Рыбачий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заможняя Н.Г. Регионально-зональные сейсмо-разведочные работы МОВ ОГТ на полуострове Рыбачий с целью изучения геологического строения и перспектив нефтегазоносности рифейских отложений. М.: Министерство природных ресурсов РФ ФГУ ГНПП “Спецгеофизика”, 2001. 120 с.
2. Сараев А.К., Никифоров А.Б., Романова Н.Е., Еремин И.С. // *Вопр. геофиз.* 2011. Т. 44. С. 133.
3. Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Баранник М.Б. и др. // *Сейсм. приб.* 2008. Т. 44. № 4. С. 43.
4. Филатов М.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. // *ПТЭ.* 2011. № 3. С. 73.
5. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
6. Шкарубо С.И., Шипилов Э.В. // *Разведка. и охр. недр.* 2007. № 9. С. 32.
7. Куликов Н.В., Коновалов В.А., Медведев С.А., Чигвинцев В.Д. // *Разведка. и охр. недр.* 2007. № 4. С. 22.

Investigation of the lithosphere structure in high-latitude regions of the Western Arctic continental margin based on the results of experimental works in the project FENICS-2019

V. A. Ljubchich*

Polar Geophysical Institute, Murmansk 183010 Russia

**e-mail: lubchich@yandex.ru*

The results of experimental measurements of the electromagnetic field from the controlled source on the Rybachij and the Srednij peninsulas are presented. This experimental work was executed in the FENICS-2019 project on electromagnetic sounding of the earth's crust of the Baltic shield by using industrial power lines. Based on the results of measurements, geoelectric sections were constructed for the upper part of the lithosphere of the studied area.