

**Первые результаты экспериментального электромагнитного зондирования земной коры на полуостровах Средний и Рыбачий**

Любчик В.А., Шипилов Э.В., Юрик Р.Ю.

Полярный геофизический институт, г. Мурманск

В 2019 году в ходе проведения эксперимента FENICS-2019 по электромагнитному зондированию земной коры Балтийского щита с помощью промышленных ЛЭП расположенных на Кольском полуострове, сотрудниками Полярного геофизического института были выполнены измерения электромагнитного поля в пределах полуостровов Рыбачий и Средний. Основной задачей проведенных экспериментальных работ являлось изучение строения литосферы и структуры осадочного чехла в зоне перехода от Балтийского щита к Западно-Арктической платформе.

В качестве одной из антенн контролируемого источника электромагнитных волн использовалась промышленная ЛЭП длиной 130 км, имеющая субширотную ориентацию. В данной линии генерировались электромагнитные поля в интервале частот 0.194 - 94.22 Гц. В качестве контролируемого источника электромагнитного поля использовался экспериментальный образец мощного генератора, разработанный в ПГИ (Терещенко Е.Д. и др., 2008). 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, разработанного в ПГИ, 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. Аналоговые сигналы с магнитных датчиков и приемных электрических линий обрабатывались цифровой системой регистрации и сбора данных, основанной на шестиканальном 22-битном аналого-цифровом преобразователе с частотой дискретизации 1024 Гц (Филатов М.В. и др., 2011). Данная система регистрации и сбора данных обеспечивает привязку измерений к мировому времени по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

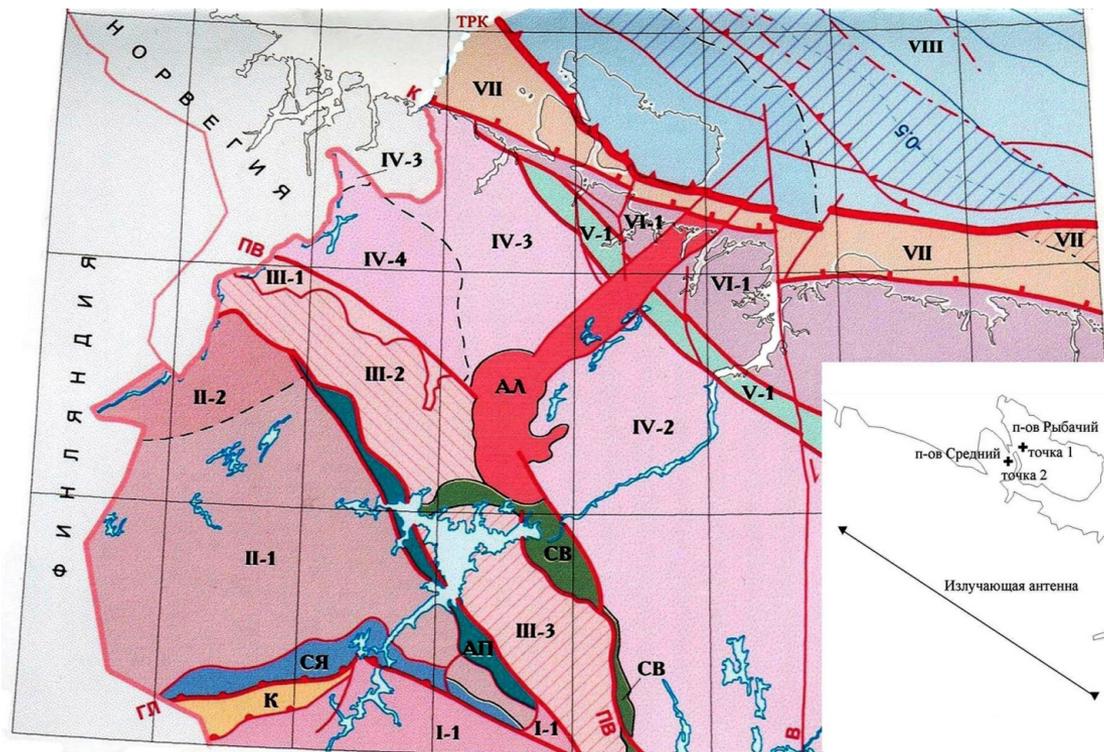


Рис. 1 Схема тектонических элементов Балтийского щита и прилегающей части Западно-Арктической платформы (Шпилов и др., 2017; Шкарубо, Шпилов, 2007). На врезке - схема расположения пунктов регистрации электромагнитного поля и излучающей антенны генератора.

Обозначения на тектонической схеме: *Восточно-Европейская платформа. Балтийский щит.* I – мегаблок Кольского Беломорья: I-1 – Гирвасский блок; II – Лапландский мегаблок: II-1 – Гранулитовый блок, II-2 – Хихнаярвинский блок; III – Верхнетуломская зона: III-1 – Аллареченско-Солозерский блок, III-2 – Южно-Печенгский блок, III-3 – Нотозерский блок; IV – Центрально-Кольский мегаблок: IV-1 - Чудзъяврский блок, IV-2 – Заимандровский блок, IV-3 – Нясюкский блок, IV-4 – Северо-Печенгский блок; V – Титовско-Поросозерская шовная зона: V-1 – Титовская подзона; VI – Мурманский мегаблок: VI-1 – Северо-Мурманский блок, VI-2 – Южно-Мурманский блок; VII – Кильдинско-Святоносская перикратонная область; *Западно-Арктическая платформа:* VIII – Кольско-Финмаркенский мегаблок.

Тектономагматические зоны: СЯ – Сальнотундровско-Юрийокская, К – Корватундровская, СВ – Солозерско-Волчьезерская, Аккаярви-Пыршинская, АЛ – Ара-Лицкая. Разломы и нарушения: ГЛ – Главный Лапландский надвиг, ПВ – Пороярви-Волчетундровский шов, К – сброс Карпинского, ТРК – линеамент Троллефьорд-Рыбачий-Кильдин (сдвига-надвиг), В – Волшепахский сдвиг.

Экспериментально измеренные значения отношений амплитуд полного горизонтального электрического поля к полному горизонтальному магнитному полю были пересчитаны через кривые нормального поля в значения кажущегося сопротивления среды  $\rho_k$  (рис.2). Полученные кривые зависимостей кажущегося сопротивления от частоты электромагнитного поля  $f$  были трансформированы в графики зависимостей действующего сопротивления среды  $\rho'$  от действующей глубины  $z'$  (рис.3) с помощью дифференциальной трансформации Молочного-Ле Вьета:

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

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

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

$$m = \frac{d \log \rho_k}{d \log \sqrt{1 / f}}$$

- действующая глубина  $z'$  (ω - круговая частота электромагнитного поля, μ - магнитная проницаемость среды );
- действующее сопротивление среды  $\rho'$  для нисходящей ветви кривой  $\rho_k$ ;
- действующее сопротивление среды  $\rho'$  для восходящей ветви кривой  $\rho_k$ ;
- параметр  $m$  определяется наклоном кривой кажущегося сопротивления в двойном логарифмическом масштабе

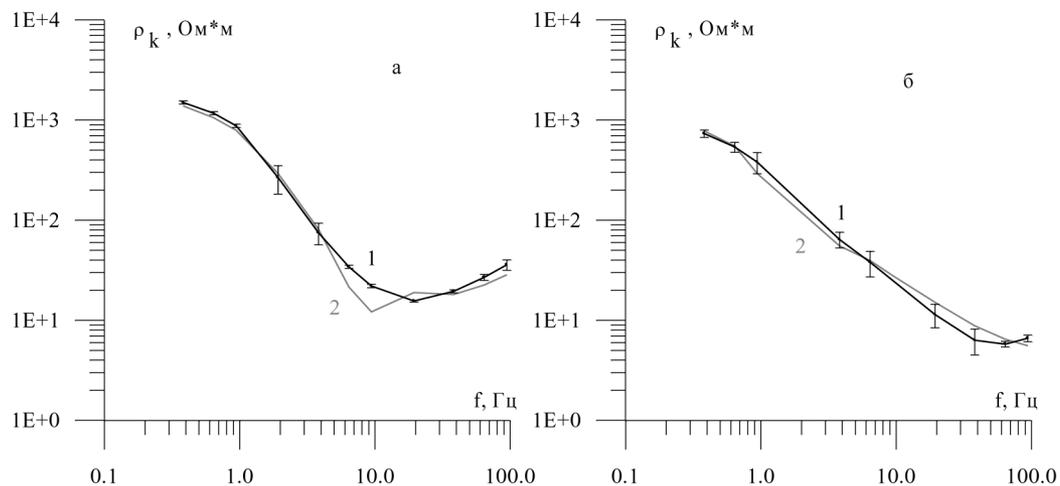


Рис. 2 Графики зависимости кажущегося сопротивления  $\rho_k$  от частоты электромагнитного поля  $f$ : а – для точки наблюдения на полуострове Рыбачий, б - для точки наблюдения на полуострове Средний. Кривая 1 соответствует экспериментально измеренным данным, кривая 2 соответствует теоретически рассчитанным данным по результатам модельных вычислений.

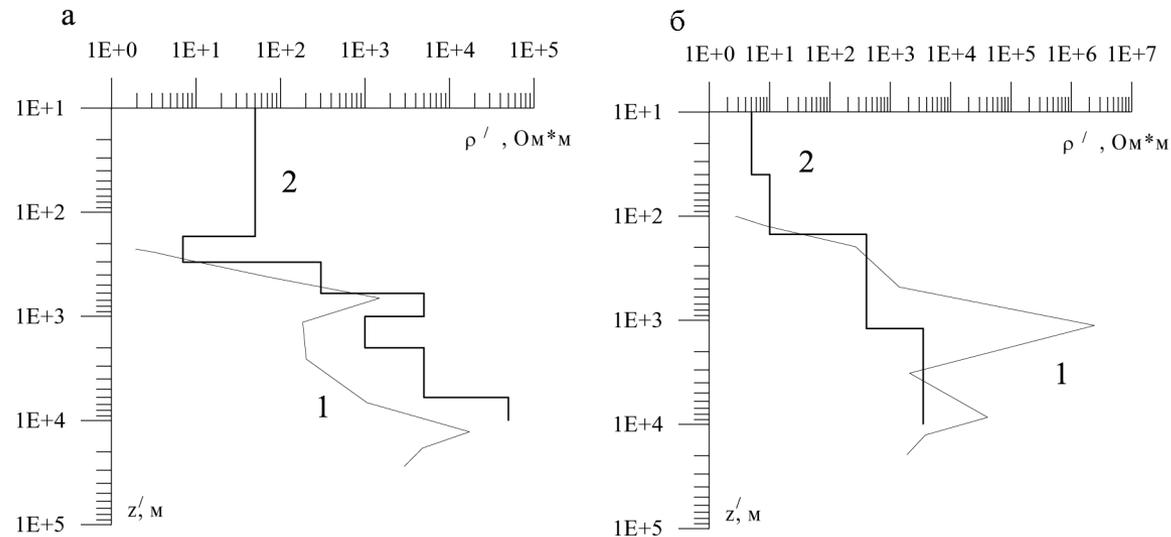


Рис. 3 Графики зависимости действующего сопротивления среды  $\rho'$  от действующей глубины  $z'$ , построенные по результатам дифференциальной трансформации Молочного-Ле Вьета (кривые 1), и подобранные одномерные модели геоэлектрического разреза среды (кривые 2): а – для точки наблюдения на полуострове Рыбачий, б - для точки наблюдения на полуострове Средний.

Применение дифференциальной трансформации Молочного-Ле Вьета к полученным экспериментальным данным является достаточно формальным, так как на низких частотах не выполняется условие аппроксимации электромагнитного поля плоской волной. Но для верхней части геоэлектрического разреза, представленной низкоомным осадочным чехлом, такая трансформация является оправданной и может дать важную информацию о литологическом строении и мощности осадочного чехла.

Полученная для экспериментальной точки 1 на полуострове Рыбачий кривая кажущегося сопротивления (рис. 2а) соответствует трехслойной среде с наличием проводящего слоя, расположенного между высокоомным фундаментом и слоем с относительно повышенным удельным сопротивлением в верхней части разреза. На рис. 3а представлены результаты дифференциальной трансформации Молочного-Ле Вьета для данной точки. 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. Также на рис. 3а приведена подобранная одномерная геоэлектрическая модель среды, состоящая 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 2) для подобранной модели среды, которая хорошо совпадает с экспериментально полученной кривой кажущегося сопротивления (кривая 1). Полученные результаты согласуются с геоэлектрической моделью земной коры на полуострове Рыбачий (рис. 4), построенной в процессе 2D инверсии данных АМТЗ и представленной в работе (Сараев А.К. и др., 2011).

Кривая кажущегося сопротивления для экспериментальной точки 2 на полуострове Средний, представленная на рис. 2б, 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, 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 (Куликов Н.В. и др., 2007). Полученные результаты также хорошо согласуются с результатами (рис. 5), представленными в работе (Сараев А.К. и др., 2011). На рис. 3б представлена подобранная одномерная геоэлектрическая модель среды, состоящая из низкоомного 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 2), согласующаяся с экспериментальной кривой кажущегося сопротивления (кривая 1).

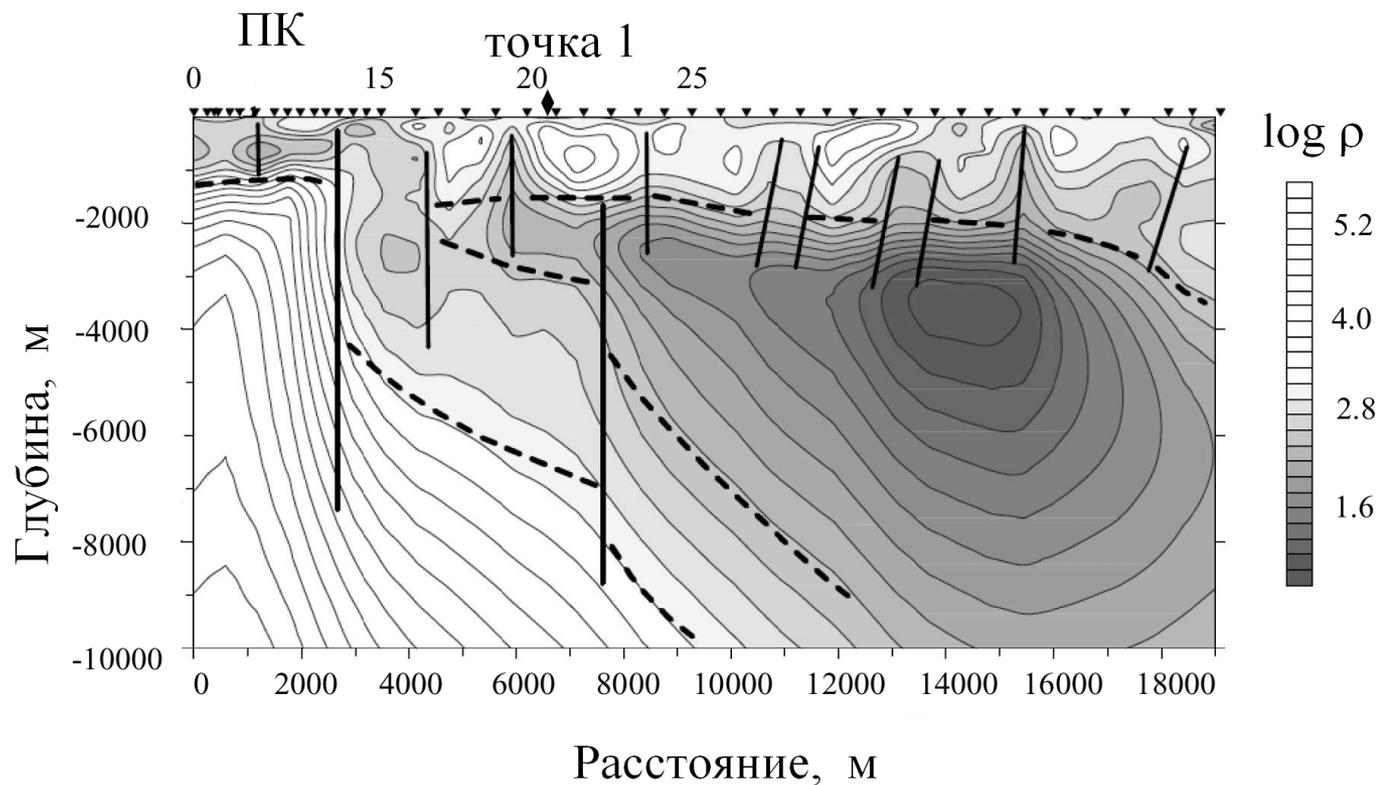


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по результатам 2D-инверсии данных АМТЗ, полученных на полуострове Рыбачий (Сараев А.К. и др., 2011). Черным ромбом обозначено местоположение точки измерения 1 в эксперименте FENICS-2019.

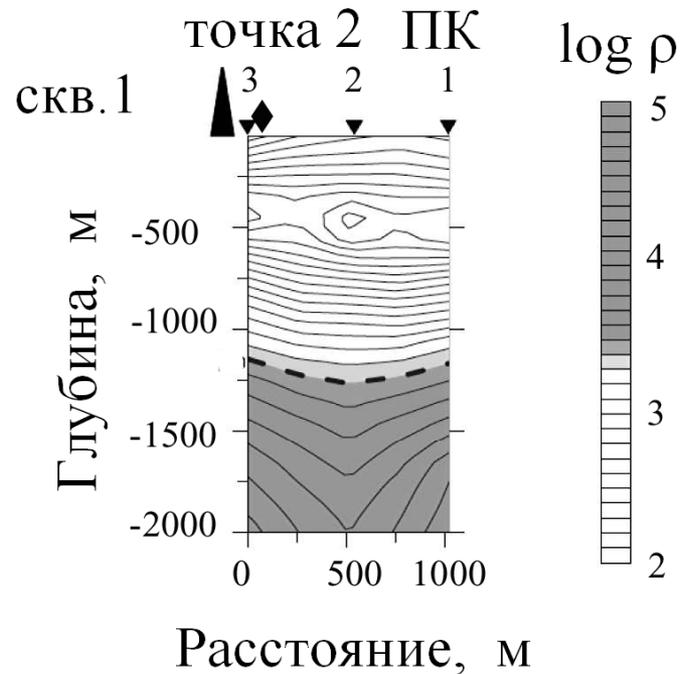


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по результатам 2D-инверсии данных АМТЗ, полученных на полуострове Средний (Сараев А.К. и др., 2011). Черным ромбом обозначено местоположение точки измерения 2 в эксперименте FENICS-2019.

## **ВЫВОД:**

- использование мощных контролируемых источников электромагнитного поля позволяет получать вполне конкретные параметры геоэлектрического строения земной коры в переходной зоне от кристаллического Балтийского щита к Западно-Арктической платформе, характеризующейся довольно сложным строением и к тому же при наличии мощного низкоомного осадочного чехла.

Работа выполнена в рамках госзадания темы НИР № 0227-2019-0001 и частично поддержана из средств гранта РФФИ (17-45-510956).

### **Литература**

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.

Сараев А.К., Никифоров А.Б., Романова Н.Е., Еремин И.С. Изучение геоэлектрического строения п-ова Рыбачий (Мурманская обл.) по данным аудиоманнитотеллурических зондирований с бесконтактными электрическими антеннами // Вопросы геофизики. Выпуск 44. СПб. (Ученые записки СПбГУ; №444). 2011. С. 133 – 147.

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.

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.

Шипилов Э. В., Шкарубо С. И., Ковальчук Е. А. Структура и литологический состав разреза отложений Кольского залива (фиорда) по данным бурения и сейсмоакустики и неотектонические условия его формирования // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4 (28). С. 72 -82. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-72-82.

Шкарубо С. И., Шипилов Э. В. Тектоника Западно-Арктической платформы // Разведка и охрана недр. 2007. № 9. С. 32-47.