

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 550.834

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-5(65-76)

**ВОЗМОЖНОСТИ АУДИОМАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ
С БЕСКОНТАКТНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЛИНИЯМИ
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ
ПОЛУОСТРОВА РЫБАЧИЙ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)****А.К. Сараев, К.М. Антащук, И.С. Еремин***Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия; a.saraev@spbu.ru*

Рассмотрены особенности работ по методу аудиоманнителлурических зондирований с измерениями электрического поля незаземленными (емкостными) электрическими линиями. При этом использовались линии большей длины по сравнению с заземленными, предварительный усилитель электрических сигналов с высоким входным сопротивлением и робастная обработка данных измерений. Работы выполнялись на п-ове Рыбачий (Мурманская область) в зимнее время по снежному покрову. Надежные данные зондирований получены в аудиочастотном диапазоне от 7–8 Гц до нескольких сотен герц. Достоверность зимних измерений с бесконтактными линиями подтверждена контрольными летними измерениями с заземляемыми линиями. По результатам работ показана возможность картирования кровли кристаллического фундамента для слабопроводящего разреза до глубин 5–6 км. Выделены проводящие зоны с повышенными проницаемостью и водонасыщенностью. Полученный геоэлектрический разрез характеризует структуру переходной зоны между Балтийским щитом и шельфом Баренцева моря. Результаты аудиоманнителлурических зондирований подтверждены последующим бурением. Они позволили существенно скорректировать выводы о строении участка, полученные после проведения сейсморазведочных работ. Данная технология может применяться в арктических регионах России и других стран для изучения территорий развития многолетнемерзлых пород.

Аудиоманнителлурические зондирования, электрическое поле, бесконтактные измерения, полуостров Рыбачий, многолетнемерзлые породы

**AUDIO-FREQUENCY MAGNETOTELLURIC SURVEYS
WITH NON-GROUNDED LINES FOR IMAGING THE RESISTIVITY STRUCTURE
OF THE RYBACHIY PENINSULA (MURMANSK REGION)****A.K. Saraev, K.M. Antashchuk, I.S. Eremin***St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences,
7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russia; a.saraev@spbu.ru*

The resistivity structure of the Rybachi Peninsula (Murmansk region) was studied in winter by audio-frequency magnetotelluric (AMT) surveys using long non-grounded lines and a preamplifier with a high input resistance. The acquired data were processed by robust techniques. Reliable measurements were provided in an audio-frequency range of 7–8 to hundreds of hertz. The results collected in winter with non-grounded lines were no worse than summer measurements with grounded lines. The AMT surveys can resolve the basement top under 5–6 km of low-conductive sediments. The obtained resistivity section of the area represents the transition between the Fennoscandian shield and the Barents shelf and comprises highly permeable water-saturated conductors. The basement depth estimate by inversion of AMT curves was proven valid by subsequent drilling. The AMT surveys have provided updates for the local crust structure inferred from seismic data. The method is applicable to surveys in the Arctic areas of Russia and other permafrost territories.

Audiomagnetotelluric soundings, electric field, non-grounded lines, Rybachi Peninsula, permafrost

ВВЕДЕНИЕ

Многолетнемерзлые породы широко развиты в северных регионах и занимают более 60 % территории России. Их изучение необходимо при освоении этих территорий, строительстве различных сооружений, прокладке железных и автодо-

рог, нефте- и газопроводов. Особое внимание в настоящее время уделяется развитию минерально-сырьевой базы страны за счет расширения геолого-разведочных работ на северных территориях. Длительный зимний период требует создания все-

сезонной аппаратуры геофизических методов, пригодной для работ по снежному покрову и льду. Одним из развивающихся и перспективных является метод аудиоманнитотеллурических зондирований (АМТЗ), позволяющий выполнять быстрые съемки без применения собственных источников электромагнитного поля и изучать разрез в диапазоне глубин от десятков метров до нескольких километров. В этой связи разработка варианта АМТЗ для зимних работ в районах развития многолетнемерзлых пород весьма актуальна.

Работы методом АМТЗ были выполнены на п-ове Рыбачий в переходной зоне между Балтийским щитом и шельфом Баренцева моря для изучения геоэлектрического строения территории и выявления зон, перспективных для аккумуляции углеводородов. Поскольку большая часть территории п-ова Рыбачий труднодоступная, а применение вездеходов на территории тундры в летнее время по экологическим причинам запрещено, работы методом АМТЗ проводились в зимнее время по снежному покрову с перемещением между точками зондирования на снегоходах. При этом для измерений электрического поля в аудиочастотном диапазоне применялась технология АМТЗ с использованием бесконтактных (емкостных) электрических линий. Особенности этой технологии и результаты работ методом АМТЗ на п-ове Рыбачий рассматриваются в настоящей статье.

МЕТОД АМТЗ, АППАРАТУРА И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ

Метод АМТЗ является высокочастотной модификацией метода магнитотеллурических зондирования (МТЗ) [Бердичевский, Дмитриев, 2009; Chave, Jones, 2012] и основан на измерениях естественных электромагнитных полей аудио (звукового) диапазона частот от единиц до первых тысяч герц [Strangway et al., 1973]. Эти поля генерируются электрическими разрядами дальних гроз и распространяются вокруг Земли в волноводе Земля–ионосфера.

В методе АМТЗ измеряют горизонтальные составляющие электрического (E_x, E_y) и магнитного (H_x, H_y) полей. В горизонтально-неоднородной среде связь между составляющими электрического и магнитного полей и значениями импеданса Z в произвольно ориентированной системе координат xy определяется следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx} H_x + Z_{xy} H_y, \\ E_y &= Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y, \end{aligned}$$

где Z_{xy}, Z_{yx} – главные, Z_{xx}, Z_{yy} – дополнительные компоненты тензора импеданса.

В горизонтально-однородной среде главные значения импеданса равны отношению горизон-

тальных и взаимно перпендикулярных составляющих электрического и магнитного полей:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y}, \quad Z_{yx} = -\frac{E_y}{H_x}, \quad Z_{xy} = -Z_{yx}.$$

Для горизонтально-неоднородной среды выполняют поворот осей координат, строят полярные диаграммы и определяют значения тензора импеданса по осям однородности и неоднородности структуры. Для двумерной неоднородности эти значения соответствуют E- и H-поляризованному полю (Z^E, Z^H). Их пересчитывают в значения кажущегося сопротивления (ρ_K) и фазы импеданса (φ_z):

$$\begin{aligned} \rho_K^E &= \frac{1}{\omega\mu_0} |Z^E|^2, \quad \rho_K^H = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z^H|^2, \\ \varphi_z^E &= \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im} Z^E}{\text{Re} Z^E} \right), \quad \varphi_z^H = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im} Z^H}{\text{Re} Z^H} \right), \end{aligned}$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; f – частота, Гц; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Частотные зависимости ρ_K и φ_z являются кривыми зондирования. В результате их инверсии получают геоэлектрический разрез в диапазоне глубин от первых десятков метров до первых километров. При интерпретации данных АМТЗ используется модель первичного поля в виде плоской вертикально падающей волны.

При проведении работ методом АМТЗ на п-ове Рыбачий авторами использовалась аппаратура АКФ-4М, разработанная Санкт-Петербургским государственным университетом и ООО “МикроКОР” [Сараев и др., 2011]. Аппаратура включает цифровой регистратор с четырьмя синхронными каналами и 24-разрядными АЦП в каждом канале, а также электрические приемные линии и магнитные антенны. Частотный диапазон аппаратуры 0.1–1000 Гц, регистрация производится в поддиапазонах 0.1–40 Гц (D1), 1–400 Гц (D2), 1–1000 Гц (D3) с частотами дискретизации входных сигналов 160, 1600 и 3200 Гц соответственно.

Программное обеспечение регистратора (программа SM27) осуществляет установку параметров измерений, визуализацию на дисплее регистратора измеряемых характеристик (спектрограмм, парных когерентностей), автоматизированное производство измерений, сохранение данных и их экспорт на внешний компьютер. Для обработки данных, полученных в сложных условиях (неблагоприятная помеховая обстановка, низкий уровень и нестабильность естественного электромагнитного поля), применяется программа SM+. Данная программа использует различные виды робастных процедур. Для визуализации исходных данных и результатов интерпретации применяется программа Geoinf. Программа предназначена для просмотра и анализа первичных данных

АМТЗ и результатов инверсии по отдельным точкам зондирования, по профилям и по площади.

Для 1D-инверсии в выполненных работах авторами была использована программа метода эффективной линеаризации (МЭЛ) [Porokhova, Kharlamov, 1990]. 2D-инверсия производилась с помощью программы ZondMT2D [http://zondgeo.com/], реализованной на основе алгоритма Оккам [de Groot-Hedlin, Constable, 1990]. Инверсия в этой программе выполняется с учетом рельефа для кривых Н- и Е-поляризованных полей, эффективных кривых, а также производится бимодальная инверсия. Предусмотрена возможность изменения относительного веса различных параметров и учета априорной информации.

ВОЗМОЖНОСТИ БЕСКОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В АУДИОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

Обычно в методе АМТЗ для измерений электрического поля используют заземляемые антенны (приемные линии электрического поля). Однако достаточно часто возникает необходимость проведения работ в условиях, не благоприятных для заземления электрических линий (в зимнее время по мерзлой земле, снегу и льду и в летнее время по сухому песку, каменистой почве и курумнику). Для проведения работ методом АМТЗ в этих условиях предлагаются различные подходы. Компанией Феникс Джиофизикс (Канада) разрабатывается технология, основанная на измерениях трех взаимно перпендикулярных составляющих магнитного поля (двух горизонтальных и одной вертикальной) [Ingerov et al., 2009]. В последние годы активно развивались теоретические основы и методики обработки и интерпретации данных трехкомпонентных измерений магнитного поля [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Однако предложенный подход имеет существенный недостаток, связанный с тем, что для горизонтально-слоистой модели среды, основной в методах зондирования, вертикальная составляющая магнитного поля равна нулю, и измерения трех составляющих магнитного поля реализовать не удастся. Вертикальная составляющая магнитного поля появляется только в горизонтально-неоднородных средах. Поэтому трехкомпонентные измерения магнитного поля могут быть дополнительными к импедансным измерениям, по результатам которых производятся зондирования горизонтально-слоистых и горизонтально-неоднородных сред, но не могут их полноценно заменить.

Другой подход, который развивается авторами настоящей статьи, связан с использованием бесконтактных измерений электрического поля в аудиочастотном диапазоне с бесконтактными (емкостными) электрическими линиями. Ранее бесконтактные измерения электрического поля

успешно применялись при изучении радиочастотных полей в диапазоне 10–1000 кГц [Вешев, 1980]. Достоверность этих измерений подтверждена многочисленными экспериментами в полевых условиях.

При реализации бесконтактных измерений электрического поля в аудиочастотном диапазоне авторами используются: а) симметричные приемные линии общей длиной 100 м (с заземлениями обычно применяются короткие симметричные линии общей длиной 40 м); б) предварительные усилители (предусилители) сигналов электрических линий с высоким входным сопротивлением $R_{in} = 40\text{--}200$ МОм (с заземляемыми линиями обычно применяются предусилители с $R_{in} = 2$ МОм); в) робастные методы обработки данных измерений для уменьшения влияния помех (собственных шумов), возникающих при использовании предусилителей с высоким входным сопротивлением.

Для получения сигналов электрического поля достаточной амплитуды было необходимо использование более длинных по сравнению с заземляемой установкой приемных линий. Линии для бесконтактных измерений оптимальной длиной 100 м были выбраны экспериментальным путем с учетом амплитуд измеряемых сигналов и удобства проведения работ.

Использование предусилителей с $R_{in} = 2$ МОм является оптимальным при проведении работ с заземляемыми приемными электрическими линиями. При этом переходное сопротивление заземлений обычно не превышает 10 кОм. При более высоких переходных сопротивлениях и использовании бесконтактных линий входное сопротивление предусилителей должно быть увеличено.

В результате экспериментов было установлено, что при проведении зимних работ по снежному покрову оптимальное значение входного сопротивления предусилителя составляет 40 МОм. Выбор относительно невысокого значения R_{in} предусилителя связан с тем, что уровень естественного электрического поля аудиочастотного диапазона в зимнее время ниже, чем летом, и в случае использования предусилителей с более высоким входным сопротивлением возрастает уровень их собственных шумов, что затрудняет получение качественных данных. Благоприятным фактором для применения в зимних работах предусилителя с относительно невысоким значением R_{in} также является повышенная емкостная связь земли и кабеля, лежащего на снежном покрове.

В летних работах при неблагоприятных условиях для заземления (сухой песок, каменистая почва, курумник) необходимо использование предусилителя с более высоким входным сопротивлением (200 МОм), поскольку сложнее обеспечить плотное прилегание кабеля к земле и высо-

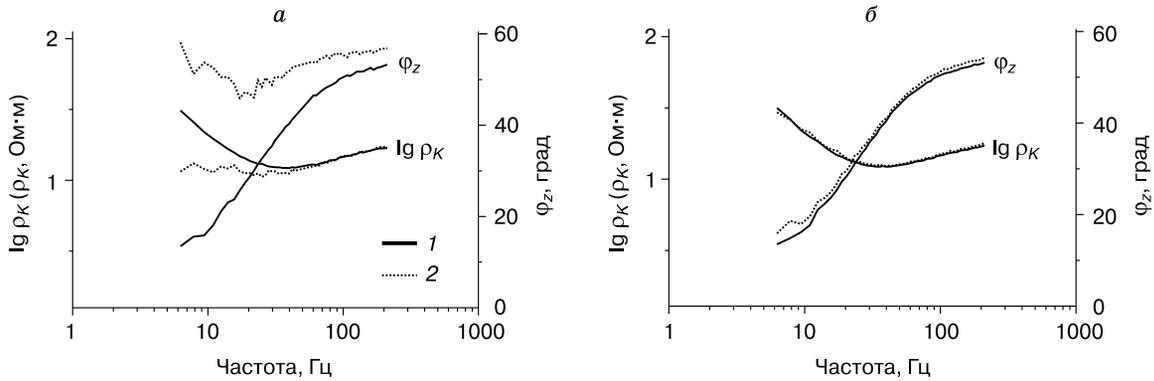


Рис. 1. Сравнение кривых кажущегося сопротивления (ρ_K) и фазы импеданса (φ_z), полученных с заземляемыми (1) и бесконтактными (2) электрическими линиями и предусилителями с входным сопротивлением 2 МОм (а) и 40 МОм (б).

кую емкостную связь кабеля с землей. Уровень естественного электрического поля аудиочастотного диапазона в летнее время выше, чем зимой, и удастся получить данные хорошего качества при повышенном уровне собственных шумов предусилителя.

На рис. 1 приведены результаты экспериментальных работ, выполненных в зимнее время на снежном покрове с использованием бесконтактных электрических линий и предусилителей с входными сопротивлениями 2 и 40 МОм. В качестве данных для сравнения выбраны кривые ρ_K и φ_z , полученные в зимнее время с заземляемыми электрическими линиями. Как видно на рис. 1, а, кривые для бесконтактной линии и предусилителя с $R_{in} = 2$ МОм имеют существенные отличия от кривых для заземляемых линий. Для фазовой кривой эти отличия отмечаются при диапазоне

частот 6–200 Гц, а для кривой кажущегося сопротивления – при 6–30 Гц. При использовании предусилителя с $R_{in} = 40$ МОм наблюдается совпадение кривых ρ_K для заземляемой и бесконтактной линий во всем частотном диапазоне 6–200 Гц, а для кривых φ_z наблюдаются небольшие отличия при частоте ниже 8 Гц.

При использовании предусилителей с высоким входным сопротивлением, как отмечалось выше, возрастает влияние собственных шумов предусилителя и линии. Для получения данных хорошего качества необходимо применение робастных процедур при обработке данных измерений. В программе SM+, которая входит в состав аппаратно-программного комплекса АКФ-4М, используются различные робастные методы. Цикл обработки данных измерений включает удаление выбросов из временных рядов, спектральный анализ, применение калибровок, селекцию динамических спектров и применение робастных процедур. Частотный диапазон 1–1000 Гц делится на несколько поддиапазонов, и каждая кривая зондирования содержит примерно 20 точек на декаду. В каждом поддиапазоне выполняется спектральный анализ с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) и окно Блекмана для оценки спектральной плотности мощности (СПМ) измеренных сигналов. Затем применяется робастный регрессионный анализ и значения СПМ используются для определения верхней и нижней оценок составляющих тензора импеданса [Sims et al., 1971].

Как видно на рис. 2, в результате применения робастных методов обработки качество данных существенно улучшается. По исходным данным на автоспектре сигнала электрического поля не проявляются максимумы шумановских резонансов, которые обычно наблюдаются на частотах 8, 14, 20, 26, 32, ... Гц. Для диапазона частот 3–30 Гц значения взаимной когерентности электрического и

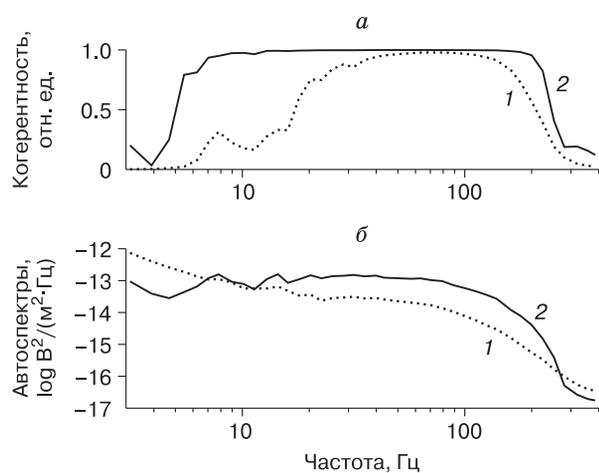


Рис. 2. Сравнение автоспектров сигналов электрического поля (б) и взаимных когерентностей с сигналом магнитного поля (а) при различных способах обработки данных:

1 – без робастных процедур; 2 – с робастными процедурами.

магнитного поля низкие, что свидетельствует о значительном влиянии некоррелируемых шумов на результаты измерений с бесконтактными антеннами. Значения когерентности выше порогового уровня 0.9 отмечаются в диапазоне частот 30–150 Гц. После применения робастных процедур на графике автоспектра видны максимумы на частотах 8 и 14 Гц, соответствующие шумановским резонансам, и значение взаимной когерентности выше порогового уровня – в диапазоне частот 7–220 Гц.

Для оценки надежности бесконтактных измерений в зимнее время было выполнено сравнение с данными, полученными летом (рис. 3). Сравнивались кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса, измеренные в летнее время с заземляемыми линиями и в зимнее время с заземляемыми и бесконтактными линиями. Наиболее качественные данные получены с заземляемыми линиями в летнее время. Кривые зондирования имеют хорошее качество в диапазоне частот 2.3–350 Гц (взаимная когерентность сигналов электрического и магнитного поля близка к единице). Зимние измерения с заземляемыми линиями обеспечивают хорошее качество данных в диапазоне частот 3.6–350 Гц. Менее качественные измерения на низких частотах в этом случае связаны с низким уровнем естественных полей в зимнее время. При измерениях в зимнее время с бесконтактными линиями высококачественные данные получены в диапазоне частот 6–250 Гц для кажущегося сопротивления и 8–250 Гц для фазы импеданса.

Полученный частотный диапазон бесконтактных измерений с использованием аппаратуры АКФ-4М ограничен в отношении низких частот уменьшением емкостной связи электрических линий с землей, а в отношении высоких частот – понижением уровня естественного электромагнитного поля зимой по сравнению с летним периодом.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И АНАЛИЗ

Полуостров Рыбачий находится в северной части Кольского п-ова (рис. 4, А). Работы методом АМТЗ выполнялись в основном на п-ове Рыбачий, а также на п-ове Средний и перешейке между ними (см. рис. 4, Б). Разрез района работ сложен рифейскими платформенными образованиями. Фундамент представлен гранитоидами архейского возраста. На п-ове Рыбачий осадочный чехол включает ритмичное чередование конгломератов, песчаников и алевролитов в верхней части разреза, которые вниз по разрезу сменяются валунными и валунно-галечными конгломератами и брекчиями. В основании разреза осадочного чехла находятся тонкослоистые глинистые сланцы. На п-ове Средний разрез сложен толщей переслаивающихся разнозернистых песчаников, характерных для

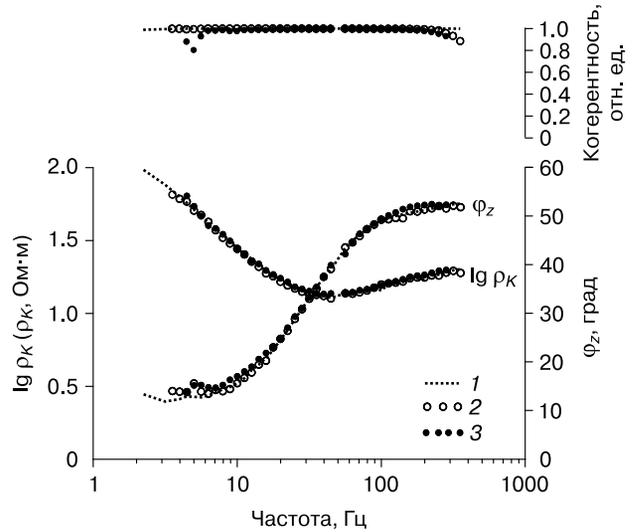


Рис. 3. Сравнение кривых кажущегося сопротивления (ρ_k) и фазы импеданса (ϕ_z), полученных в летнее время с заземляемыми линиями (1) и в зимнее время с заземляемыми (2) и бесконтактными (3) линиями.

верхней части разреза, которые вниз по разрезу сменяются алевролитами и аргиллитами. Основные типы пород показаны на рис. 4, Б.

Полуострова Рыбачий и Средний разделены проходящей в районе перешейка мощной тектонической зоной северо-западной ориентировки. На п-ове Рыбачий породы образуют моноклираль северо-западного простирания с общим наклоном слоев под углами 15–35° к северу и северо-востоку, осложненную сбросами разных порядков по глубинным разломам северо-западной ориентировки. Помимо глубинных разломов на п-ове Рыбачий развиты многочисленные разрывные нарушения более мелких рангов, имеющие преимущественно северо-восточную ориентировку [Сорохтин и др., 2011].

До начала работ методом АМТЗ на п-ове Средний была пробурена скважина Пограничная глубиной 5202 м (см. рис. 4, Б). Скважина вскрыла породы фундамента на глубине 1175 м. На перешейке между полуостровами Средний и Рыбачий во время работ АМТЗ проводилось бурение скважины Рыбачинская (до начала работ АМТЗ было пробурено около 300 м, всего глубина скважины составила 3001 м).

Расположение профилей АМТЗ показано на рис. 4, Б. Зондирования выполнялись в зимнее время с бесконтактными электрическими линиями. Измерения на каждой точке включали регистрацию сигналов горизонтальных составляющих электрического и магнитного полей по азимутам 40° (E_x и H_x) и 130° (E_y и H_y). В небольшом объеме в доступных местах были выполнены летние рабо-

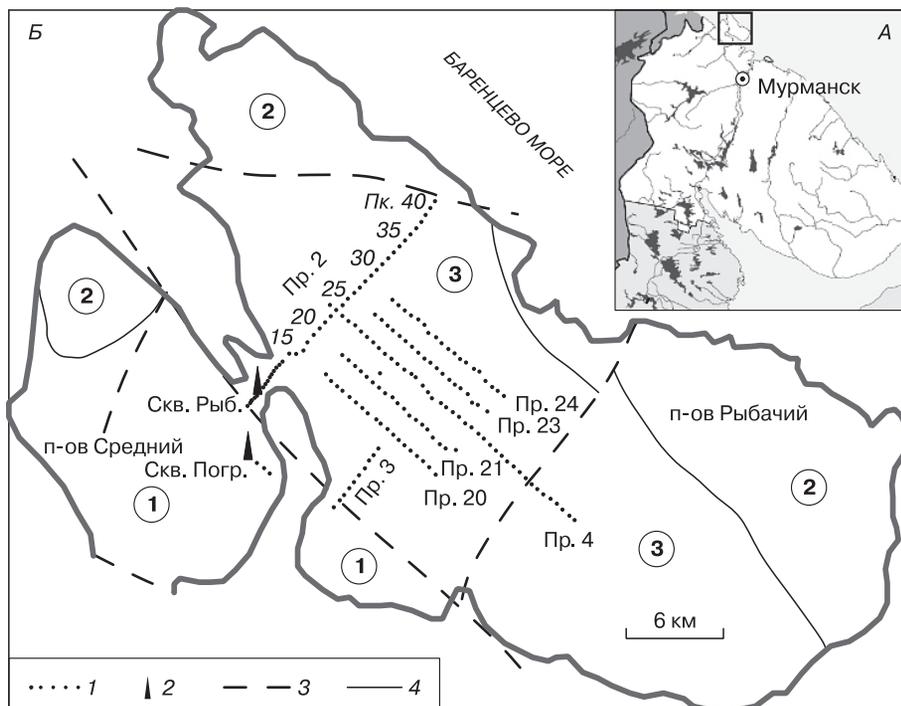


Рис. 4. Схемы Кольского полуострова (А) и п-ова Рыбачий (Б) и расположение профилей АМТЗ на участке работ.

1 – точки АМТЗ (пикеты – Пк.) вдоль профилей (Пр.); 2 – скважины Пограничная (Погр.) и Рыбачинская (Рыб.); 3 – глубинные разломы; 4 – границы пород. Цифры в кружках: 1 – разнородные песчаники, 2 – переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов, 3 – пески и конгломераты.

ты методом АМТЗ, подтвердившие результаты зимних.

Первоначально была выполнена обработка и анализ первичных данных по профилю 2 (см. рис. 4, Б), ориентированному по азимуту 40° и пересекающему перешеек между полуостровами Средний и Рыбачий и п-ов Рыбачий вплоть до берега моря. Обработка данных включала построение псевдоразрезов кажущегося сопротивления и фазы импеданса по профилю, построение амплитудных полярных диаграмм основных и дополнительных компонент тензора импеданса и направлений простираения структур [Groom, Bailey, 1989] на разных частотах.

В результате анализа полученных данных установлено, что для участка, на котором расположено математическое 3D-моделирование. В качестве вероятной причины аномального вида псевдоразрезов рассматривалось влияние заливов Баренцева моря, которые находятся на расстоянии 1–1.5 км от профиля (см. рис. 4). Принятая модель (рис. 6) состоит из двухслойного разреза (высокоомный фундамент $\rho = 50\ 000$ Ом·м и относительно более проводящие перекрывающиеся отложения $\rho = 500$ Ом·м мощностью 2 км) и двух высокопроводящих приповерхностных слоев ($\rho = 0.5$ Ом·м, мощность 200 м), имитирующих морские заливы.

импеданса Z_{xy} (азимут 40°) соответствует ТЕ моде (Е-поляризации), а составляющая Z_{yx} (азимут 130°) – ТМ моде (Н-поляризации), при этом в ранее принятых обозначениях $Z_{xy} = Z^E$, $Z_{yx} = Z^H$.

Анализ псевдоразрезов по профилю 2 показал, что в интервале профиля на перешейке между полуостровами Средний и Рыбачий (рис. 5, точки зондирования 2–7) для Е-поляризованного поля наблюдаются низкие значения ρ_K^{xy} и высокие φ_z^{xy} . Для Н-поляризованного поля было отмечено, что указанный интервал профиля характеризуется псевдоразрезами с высокими значениями ρ_K^{yx} и низкими φ_z^{yx} .

Для выяснения причин различий псевдоразрезов Е- и Н-поляризованного поля было выполнено вероятное 3D-моделирование. В качестве вероятной причины аномального вида псевдоразрезов рассматривалось влияние заливов Баренцева моря, которые находятся на расстоянии 1–1.5 км от профиля (см. рис. 4). Принятая модель (рис. 6) состоит из двухслойного разреза (высокоомный фундамент $\rho = 50\ 000$ Ом·м и относительно более проводящие перекрывающиеся отложения $\rho = 500$ Ом·м мощностью 2 км) и двух высокопроводящих приповерхностных слоев ($\rho = 0.5$ Ом·м, мощность 200 м), имитирующих морские заливы.

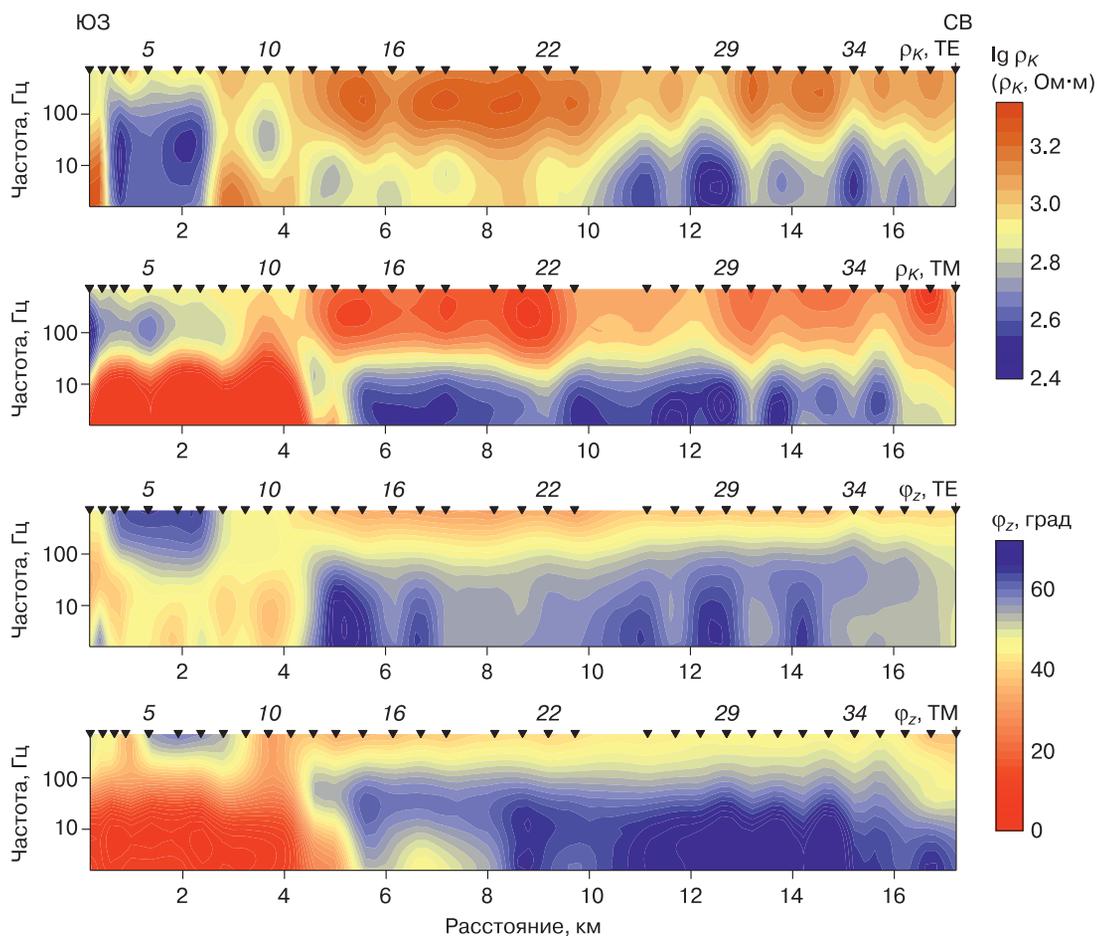


Рис. 5. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления (ρ_K) и фазы импеданса (φ_z) для ТМ (YX) и ТЕ (XY) мод по профилю 2.

Черные треугольники – точки АМТЗ.

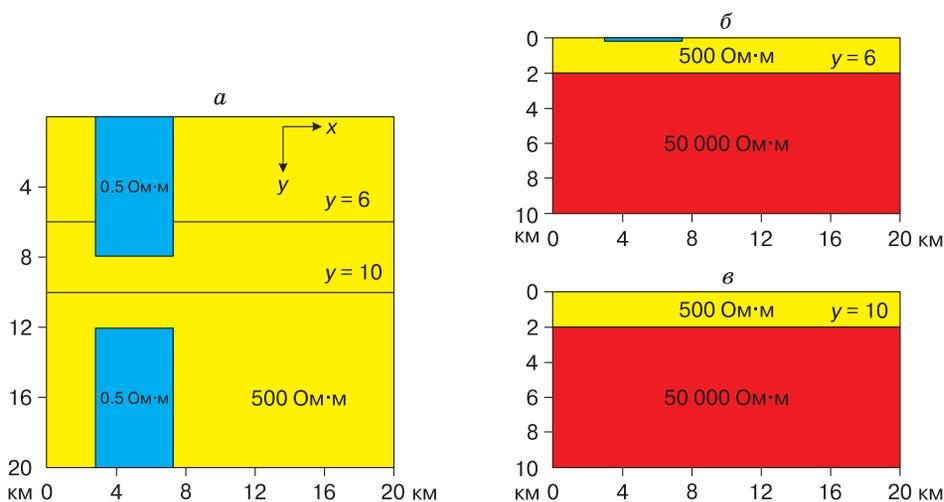


Рис. 6. Модель для оценки влияния морских заливов на результаты АМТЗ на перешейке между полуостровами Средний и Рыбачий.

a – модель в горизонтальной плоскости; b, c – разрезы модели по профилям $y = 6$ и 10 км.

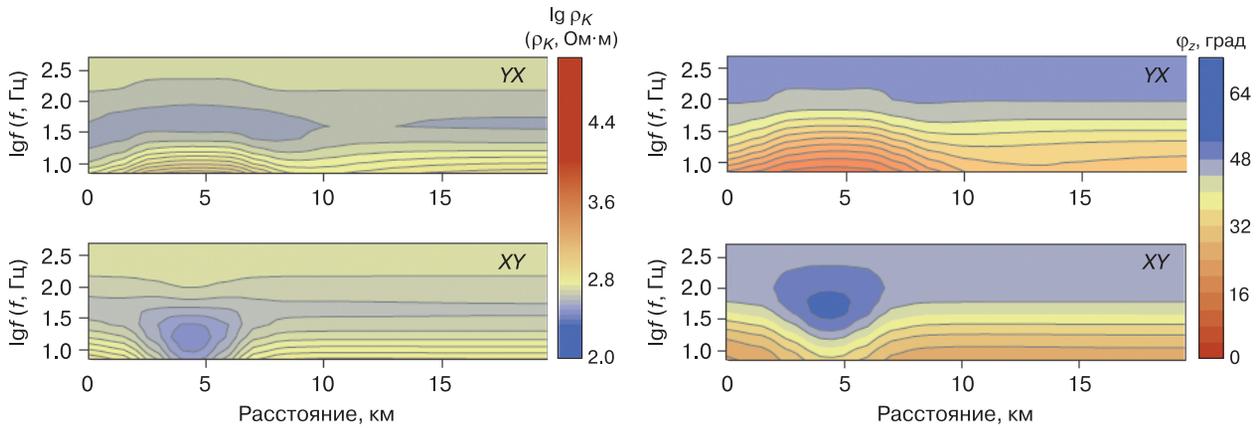


Рис. 7. Результаты 3D-моделирования по профилю $y = 10$ км: псевдоразрезы кажущегося сопротивления (ρ_K) и фазы импеданса (φ_2) для ТМ (YX) и ТЕ (XY) мод (f – частота, Гц).

Моделирование было выполнено при помощи программного комплекса WinGLink [http://www.slb.com/]. Результаты моделирования в диапазоне частот 7–500 Гц для профиля $y = 10$ км приведены на рис. 7.

Из анализа результатов моделирования следует, что морские заливы оказывают более сильное влияние на кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса для ТЕ (XY) моды. В целом отмечается сходный характер модельных псевдоразрезов для ТЕ моды и реальных псевдоразрезов, полученных по результатам полевых наблюдений (см. рис. 5). Поэтому для последующей инверсии данных зондирований были выбраны кривые АМТЗ для ТМ моды.

На первом этапе выполнено сравнение результатов АМТЗ с данными бурения по скв. Пограничная с известной глубиной фундамента (1175 м). В районе данной скважины были проведены зондирования в трех точках (см. рис. 4, Б). Учитывая малое число точек зондирования, была выполнена 1D-инверсия кривых ТМ моды методом МЭЛ [Porokhova, Kharlamov, 1990].

Полученный для участка скважины Пограничная геоэлектрический разрез приведен на рис. 8, а. Верхняя часть разреза рифейских пород до глубины 499 м сложена песчаниками. Ниже по разрезу вскрыта пачка переслаивания песчаников, алевролитов и аргиллитов мощностью 280 м, затем слой песчаников мощностью 160 м и далее

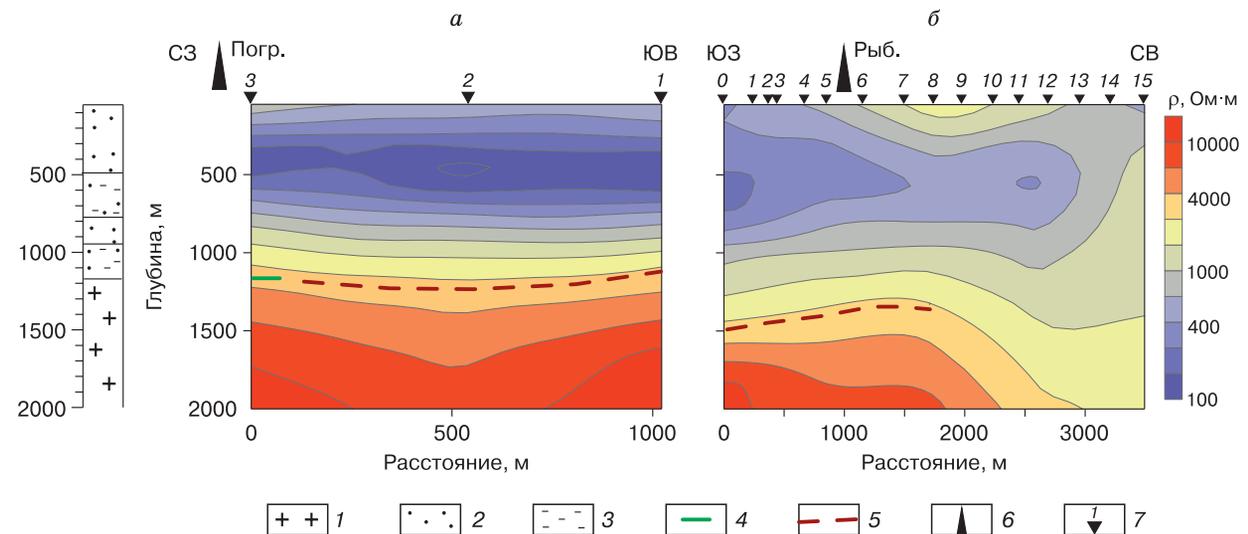


Рис. 8. Геоэлектрические разрезы по данным 1D-инверсии кривых АМТЗ на участках бурения скважин Пограничная (а) и Рыбачинская (б).

1 – гранитоиды фундамента; 2 – песчаники; 3 – алевролиты и аргиллиты; 4, 5 – положение кровли фундамента по данным бурения (4) и АМТЗ (5); 6 – скважины; 7 – точки АМТЗ и их номера.

пачка переслаивающихся песчаников, алевролитов и аргиллитов мощностью 236 м. В целом толща перекрывающих терригенных отложений характеризуется пониженными значениями удельного сопротивления 100–500 Ом·м для верхней части разреза (до 800 м) и повышенными значениями 500–2000 Ом·м для нижней части разреза (800–1200 м). Породы архейского кристаллического фундамента, как отмечалось выше, были вскрыты скважиной на глубине 1175 м. Сравнение с геоэлектрическим разрезом показывает, что положение кровли фундамента на геоэлектрическом разрезе соответствует значениям удельного сопротивления 2500–3000 Ом·м.

Для фрагмента профиля 2 в районе скв. Рыбачинская (см. рис. 4, Б) для оценки глубины кровли фундамента была также использована 1D-инверсия методом МЭЛ кривых Н-поляризованного поля. По результатам инверсии был построен геоэлектрический разрез (см. рис. 8, б) и на основе полученных ранее данных для участка скв. Пограничная по значениям удельного сопротивления 2500–3000 Ом·м дана прогнозная оценка глубины кровли фундамента по данным АМТЗ – 1400 м. Последующее бурение скв. Рыбачинская подтвер-

дило эту прогнозную оценку – фундамент был вскрыт на глубине 1350 м.

Для выяснения общих структурных особенностей центральной части п-ова Рыбачий были построены планы изолиний фазы импеданса на разных частотах. Фаза характеризует более глубинные, по сравнению с кажущимся сопротивлением, интервалы геоэлектрического разреза и менее подвержена влиянию приповерхностных неоднородностей. На рис. 9, а приведены планы изолиний фазы импеданса на частотах 8, 70, 200 Гц для Н-поляризованного поля для средней части п-ова Рыбачий (для профиля 4 данные в пределах рассматриваемого участка). Для плана изолиний на частоте 8 Гц участок работ разбивается на две достаточно контрастные зоны, при этом граница между ними имеет северо-западное направление. Юго-западная часть характеризуется низкими значениями фазы, что отвечает высоким значениям удельного сопротивления, типичным для фундамента. Резкий переход на плане изолиний фазы между профилями 4 и 21 соответствует предполагаемому сбросу фундамента. Северо-восточная часть участка, включающая профили 4, 23, 24, характеризуется наличием на глубине блока

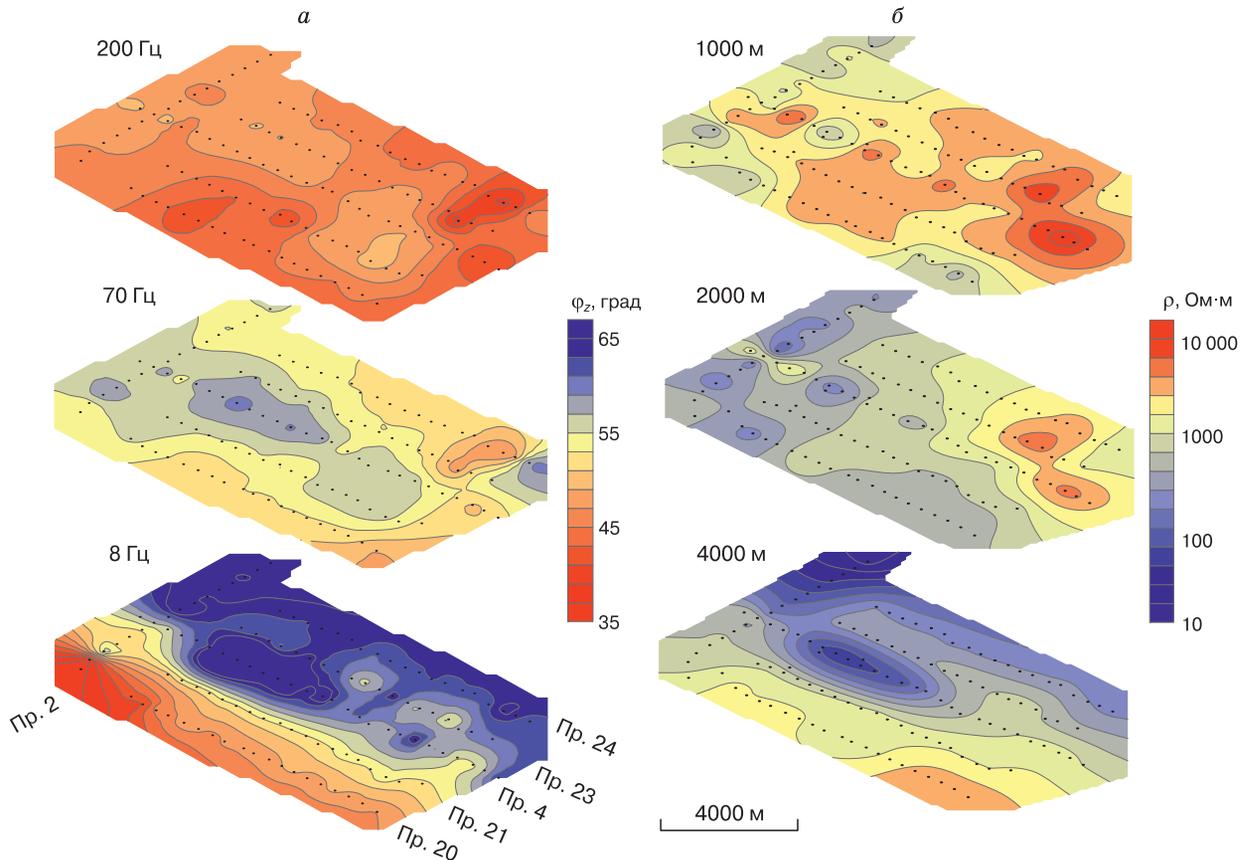


Рис. 9. Планы изолиний фазы импеданса (φ_z) на различных частотах (а) и удельного сопротивления (ρ) на разных глубинах (б).

Точки – пункты зондирования.

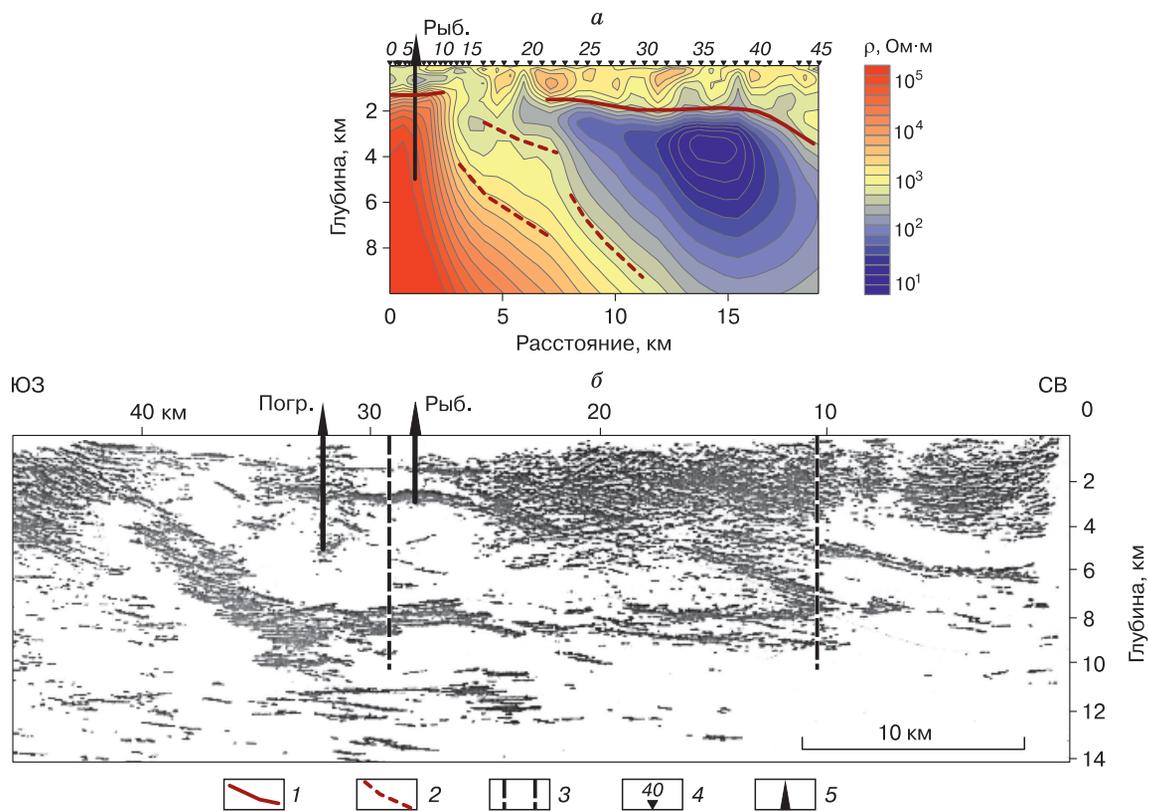


Рис. 10. Сравнение геоэлектрического (а) и сейсмического (б) разрезов по профилю 2.

1 – надежно выделенные границы; 2 – предполагаемые границы; 3 – интервал сейсмического профиля, где выполнены работы АМТЗ; 4 – точки АМТЗ и их номера; 5 – скважины.

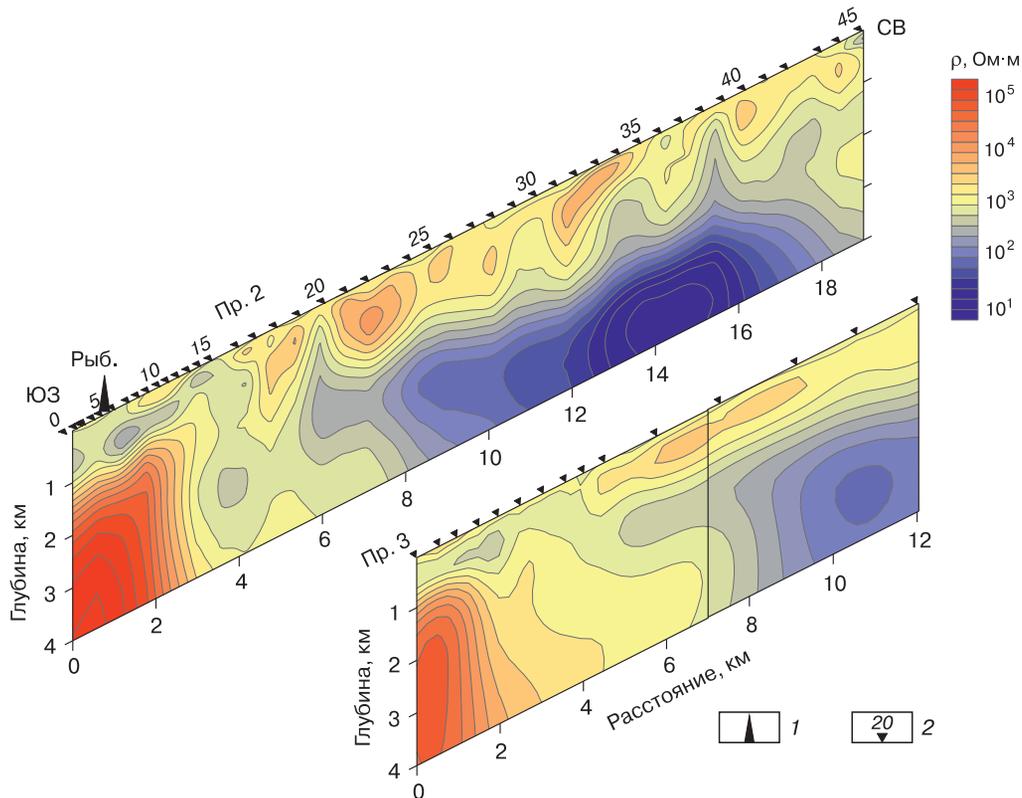


Рис. 11. Геоэлектрические разрезы по профилям 2 и 3.

1 – скважины; 2 – точки АМТЗ и их номера.

проводящих пород, и в этой части участка на частоте 8 Гц фундамент не прослеживается.

На плане изолиний фазы для частоты 70 Гц в центральной части участка выделяется зона повышенных значений фазы, отвечающая проводящему блоку, залегающему выше кровли фундамента. Для повышенной частоты 200 Гц план изолиний фазы отражает строение и свойства приповерхностной части разреза, которая является относительно более высокоомной по отношению к рассмотренным проводящим блокам, проявляющимся на частотах 8 и 70 Гц.

По результатам 2D-инверсии кривых АМТЗ для Н-поляризованного поля по пяти профилям были построены планы изолиний удельного сопротивления на глубинах 1000, 2000, 4000 м в средней части п-ова Рыбачий (см. рис. 9, б). Характерной особенностью этих данных является надежное выделение и прослеживание на разных глубинах блоков пород повышенного и пониженного удельного сопротивления. При этом наибольший интерес с точки зрения возможности выделения зон потенциальных коллекторов углеводородов представляет проводящая зона в центральной части участка на профиле 4. Эта зона с наиболее проводящей частью в интервале глубин 3–4 км, вероятно, связана с повышенными проницаемостью и водонасыщенностью пород, и в ней существуют условия для накопления углеводородов.

Геоэлектрический разрез по профилю 2 общей длиной 19 км (см. рис. 4, Б), полученный по результатам 2D-инверсии кривых Н-поляризованного поля, приведен на рис. 10, а. Рассмотренный выше профиль через скв. Рыбачинская (см. рис. 8, б) с результатами 1D-инверсии является фрагментом профиля 2. При проведении 2D-инверсии более надежно исключается влияние приповерхностных неоднородностей.

На геоэлектрическом разрезе по профилю 2 можно выделить три участка, разделенных глубинными разломами. На первом участке в юго-западной части разреза (Пк. 0–13) на глубине 1400 м выделяется высокоомный блок ($\rho < 50\,000$ Ом·м), соответствующий фундаменту и рассмотренный выше (см. рис. 9, а).

Второй участок профиля (Пк. 13–23) характеризуется сложным строением, наличием глубинного разлома и каскада сбросов фундамента с увеличением глубины его кровли по направлению к Баренцеву морю. Зона с пониженными значениями удельного сопротивления между пикетами 13 и 17 соответствует глубинному разлому, разделяющему полуострова Средний и Рыбачий. На первом и втором участках профиля положение кровли фундамента до глубины 5–6 км оценивается достаточно уверенно.

Третий участок профиля (Пк. 23–45) характеризуется двухслойным строением. Верхний слой отличается блоковым строением с многочисленными разрывными нарушениями. Мощность верхнего слоя 2–4 км, удельное сопротивление $\rho = 500\text{--}2000$ Ом·м. Нижний слой выделяется в интервале от 2–4 до 6–8 км, $\rho = 10\text{--}100$ Ом·м. Присутствие нижнего проводящего слоя на третьем участке профиля снижает глубинность метода АМТЗ, и проследить положение кровли фундамента на этом участке не удается.

Разрез по профилю 2 по данным сейсморазведки МОГТ [Шаров и др., 2007] приведен на рис. 10, б. На сейсмическом разрезе вертикальными штриховыми линиями показан интервал профиля, где выполнены работы АМТЗ. По данным предшествующих сейсмических работ были заданы скважины Пограничная и Рыбачинская для изучения разреза и оценки возможности обнаружения залежей углеводородов. Глубина фундамента по данным сейсморазведки, выполненной до проведения работ АМТЗ, оценивалась в 8 км и ожидалось, что осадочные породы на данном участке имеют достаточно большую мощность.

Как отмечалось выше, бурение скв. Пограничная было завершено до проведения работ АМТЗ и породы фундамента были вскрыты на глубине 1175 м. Скважина Рыбачинская пробурена после проведения работ АМТЗ. По данным АМТЗ, прогнозная оценка глубины кровли фундамента составляла 1400 м. Результаты бурения подтвердили данные АМТЗ – фундамент был вскрыт на глубине 1350 м.

На рис. 11 дано сравнение геоэлектрических разрезов по профилям 2 и 3, которое показывает, что основные особенности разреза по профилю 2 (блок высокоомных пород фундамента в юго-западной части профиля, проводящая зона на глубине более 3 км в северо-восточной части профиля) выделяются и на профиле 3. Следовательно, профиль 2 типичен для средней части п-ова Рыбачий и характеризует строение разреза в переходной зоне от Балтийского щита к Баренцеву морю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности новой технологии работ по методу АМТЗ с измерениями электрического поля при помощи бесконтактных (емкостных) линий. При этом используются линии большей длины по сравнению с заземляемыми линиями, предусилители электрических сигналов с высоким входным сопротивлением и робастные методы обработки данных измерений. В результате обеспечиваются надежные измерения электрического поля аудиочастотного диапазона, начиная с частот 7–8 Гц и до 400–600 Гц. Поэтому разработанная технология бесконтактных измерений

электрического поля позволяет получать данные, аналогичные получаемым с заземляемыми электрическими линиями. Это дает возможность проводить работы АМТЗ как в летнее, так и в зимнее время со сравнимым качеством и информативностью. В результате метод АМТЗ становится круглогодичным, что особенно важно для изучения территорий развития многолетнемерзлых пород с длительным сохранением снежного покрова.

По материалам зимних работ методом АМТЗ по снежному покрову на п-ове Рыбачий и прилегающей территории показана возможность оценки глубины кровли фундамента на глубинах до 5–6 км. Для участка, расположенного на перешейке между полуостровами Средний и Рыбачий, по результатам интерпретации данных АМТЗ выполнена оценка глубины кровли фундамента (1400 м). Это подтвердилось после завершения бурения скважины (по данным бурения глубина до кровли фундамента составила 1350 м). Глубина до кровли фундамента по данным сейсморазведки, выполненной до проведения работ АМТЗ, оценивалась в 8 км и ожидалось, что осадочные породы на этом участке имеют достаточно большую мощность. Таким образом, результаты АМТЗ позволили существенно скорректировать выводы, полученные после проведения сейсморазведочных работ.

Геоэлектрические разрезы, построенные по результатам АМТЗ, характеризуют геологическое строение территории в переходной зоне от Балтийского щита к Баренцеву морю. Разрез отличается сложной структурой, наличием глубинных разломов и каскада сбросов фундамента с увеличением глубины его кровли по направлению к Баренцеву морю. Выделены проводящие зоны, связанные с повышенными проницаемостью и водонасыщенностью пород, в которых существуют условия для накопления углеводородов.

Работа выполнена при поддержке ресурсного центра “Геомодель” Санкт-Петербургского государственного университета.

Литература

- Бердичевский М.Н.** Модели и методы магнитотеллурики / М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев. М., Науч. мир, 2009, 673 с.
- Berdichevskiy, M.N., Dmitriev, V.I., 2009. Models and Methods of Magnetotellurics. Nauchnyi Mir, 673 pp. (in Russian)
- Вешев А.В.** Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. 2-е изд. Л., Недра, 1980, 391 с.
- Veshev, A.V., 1980. DC and AC Electro Profiling Surveys. Second Edition. Nedra, Leningrad, 391 pp. (in Russian)
- Сараев А.К., Антащук К.М., Пертель М.И. и др.** Аппаратурно-программный комплекс аудиоманнитотеллурических зондирований АКФ-4М // Материалы Пятой Всерос. школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ–2011. СПб., СПбГУ, 2011, кн. 2, с. 475–478.
- Saraev, A.K., Antashchuk, K.M., Pertel, M.I., Eremin, I.S., Golovenko, V.B., Larionov, K.A., 2011. The ACF-4M system for audio-frequency magnetotelluric surveys, in: Proc. 5th M.N. Berdichevsky and L.L. Vanyan Seminar on Electromagnetic Soundings of the Earth EMS–2011. St. Petersburg University, St. Petersburg, Volume 2, pp. 475–478.
- Сорохтин И.О., Козлов П.Е., Куликов Н.В. и др.** Эволюция северо-западной части Тимано-Варангерского нефтегазозонного бассейна // Вестн. Кольского науч. центра РАН, 2011, № 3, с. 3–21.
- Sorokhtin, I.O., Kozlov, P.E., Kulikov, N.V., Pozhilenko, V.I., Stupak, V.M., 2011. The evolution of the northwestern Timan-Varangerch oil and gas basin, in: Bull. Kola Science Center, No. 3, 3–21.
- Шаров Н.В., Исанина Э.В., Крупнова Н.А. и др.** Повышение достоверности геологических моделей земной коры района полуостровов Средний–Рыбачий на основе комплексирования сейсмических методов ОГТ, ГСЗ, МРС // Уральский геофиз. вестн., 2007, № 4 (13), с. 98–106.
- Sharov, N.V., Isanina, E.V., Krupnova, N.A., Glaznev, V.N., Chikirev, I.V., 2007. Improving the reliability of geological models for the crust of the Sredniy–Rybachiy Peninsulas by joint interpretation of seismic CMP, DSS, and magnetic surveys. Ural Geophys. Vestn., No. 4 (13), 98–106.
- Chave, A.D., Jones, A.G.** (Eds.). The Magnetotelluric Method. Theory and Practice. Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press, 2012, 552 p.
- Groom, R.W., Bailey, R.C.** Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion // J. Geophys. Res., 1989, vol. 94, p. 1913–1925.
- de Groot-Hedlin, C., Constable, S.** Occam’s inversion to generate smooth, two dimensional models from magnetotelluric data // Geophysics, 1990, vol. 55, No. 12, p. 1613–1624.
- Ingerov, O.I., Fox, L., Golyashov, A., Colln, A.** Non-grounded surface electroprospecting technique // 71st EAGE Conference & Exhibition (8–11 June 2009). Amsterdam, Netherlands, 2009, p. 251.
- Porokhova, L.N., Kharlamov, M.M.** The solution of the one-dimensional inverse problem for induction soundings by an efficient linearization technique // Phys. Earth and Planet. Interiors, 1990, vol. 60, p. 68–79.
- Sims, W.E., Bostick, F.X., Smith, H.W.** The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data // Geophysics, 1971, vol. 36, p. 938–942.
- Strangway, D.W., Swift, C.M., Holmer, R.C.** The application of audio-frequency magnetotelluric (AMT) to mineral exploration // Geophysics, 1973, vol. 38, p. 1159–1175.

*Поступила в редакцию
19 июня 2017 г.*