

УДК 550.834

ГЛУБИННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ЛИТОСФЕРЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО (ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО) ЩИТА В ПОЛЕ МОЩНЫХ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЛЭП (ЭКСПЕРИМЕНТ FENICS)

© 2011 г. А. А. Жамалетдинов^{1, 2, 3}, А. Н. Шевцов¹, Т. Г. Короткова¹, Ю. А. Копытенко², В. С. Исмагилов², М. С. Петрищев², Б. В. Ефимов³, М. Б. Баранник³, В. В. Колобов³, П. И. Прокочук³, М. Ю. Смирнов^{4, 10}, С. А. Вагин⁴, М. И. Пергель⁴, Е. Д. Терещенко⁵, А. Н. Васильев⁵, В. Ф. Григорьев⁵, М. Б. Гохберг⁶, В. И. Трофимчик⁷, Ю. М. Ямпольский⁸, А. В. Колосков⁸, А. В. Федоров⁹, Т. Корья (Т. Korja)¹⁰

¹Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, РОССИЯ

²Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, РОССИЯ

³Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, РОССИЯ

⁴Санкт-Петербургский Государственный университет, г. Санкт-Петербург, РОССИЯ

⁵Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, РОССИЯ

⁶Институт Физики Земли РАН, г. Москва, РОССИЯ

⁷Магистральные энергосети Северо-Запада, г. Кола, РОССИЯ

⁸Радиоастрономический институт НАН Украины, г. Харьков, УКРАИНА

⁹Геофизическая служба РАН, г. Апатиты, РОССИЯ

¹⁰Университет Оулу, г. Оулу, ФИНЛЯНДИЯ

В статье изложены методика и первые результаты уникального в мировой практике эксперимента по тензорному частотному электромагнитному зондированию с применением генераторов “Энергия-1” и “Энергия-2” мощностью до 200 кВт и двух взаимно-ортогональных промышленных линий электропередачи протяженностью 109 и 120 км (эксперимент FENICS (Fennoscandian Electrical conductivity from results of soundings with Natural I (and) Controlled Sources)). Зондирования выполнены в диапазоне частот 0.1–200 Гц. Сигналы измерены на территории Карело-Кольского региона, в Финляндии, на Шпицбергене и на Украине на удаленностях до 2150 км от источника. Параметры электропроводности литосферы исследованы до глубины порядка 50–70 км. Установлена высокая горизонтальная однородность (одномерность) электрического разреза земной коры на глубинах свыше 10–15 км. Наряду с этим выявлена область пониженного поперечного сопротивления земной коры в диапазоне глубин 20–40 км на площади порядка 80 тыс. кв. км. Контур аномалии обрамляет с северо-востока зону погружения границы Мохо на глубину до 60 км в Центральной Финляндии. Выполнено сопоставление полученных результатов с данными АМТ-МТ зондирований и проведена геодинамическая интерпретация результатов.

Ключевые слова: тензорное частотное зондирование, промышленные линии электропередачи, литосфера, Балтийский кристаллический щит.

ВВЕДЕНИЕ

Балтийский (Фенноскандинавский) кристаллический щит представляет собой благоприятный полигон для изучения глубинного строения и термодинамического состояния земных недр. Этому способствуют его значительная площадь (свыше 1 млн. кв. км) и высокая степень обнаженности. На дневную поверхность здесь выходят древнейшие породы архейского и протерозойского возраста. На территории Балтийского щита выполнен большой объем сейсмических, гравитационных и магнитных

съепок, электромагнитных зондирований. Изучено состояние вещества при обычных и высоких термодинамических параметрах. На основе имеющихся материалов разработан ряд геолого-геофизических моделей строения региона [Жамалетдинов; 1990; Глазнев, 2003]. Особыми перспективами при глубинных исследованиях здесь обладают электромагнитные методы. Благодаря отсутствию проводящего осадочного чехла, электромагнитные зондирования на кристаллических щитах позволяют с высоким разрешением получать косвенную информацию о

вещественном составе, флюидном режиме, температуре и напряженно-деформированном состоянии земных недр. На это было обращено внимание ведущими учеными еще на заре становления электромагнитных методов [Краев и др., 1947; Тихонов и др., 1967]. Однако, выполненные с тех пор многолетние исследования, наряду с новыми открытиями, привели к появлению целого ряда дискуссионных вопросов о природе и строении промежуточных проводящих слоев в земной коре, о параметрах “нормального” электрического разреза литосферы и ряде других. Их разрешение требует непрерывного совершенствования техники и методики электромагнитных зондирований с естественными и контролируруемыми источниками. В Кольском научном центре РАН, при творческом содружестве с Санкт-Петербургским филиалом ИЗМИРАН, начиная с 2005 года, совершенствуется техника глубинных электромагнитных зондирований с использованием промышленных линий электропередачи и генераторов “Энергия-1” и “Энергия-2” мощностью 100 и 200 кВт, соответственно. Исследования выполняются в рамках международного эксперимента FENICS. В измерениях электромагнитных сигналов приняли участие Геологический и Полярный геофизический институты Кольского научного центра РАН, Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Геофизическая служба РАН, Санкт-Петербургский Университет и Университет Оулу (Финляндия), Радиоастрономический институт НАН Украины (г. Харьков) и ряд других организаций. Вся работа по созданию генераторов “Энергия-1” и “Энергия-2” и по обеспечению излучения электромагнитного поля с использованием промышленных ЛЭП выполнена Центром физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН при поддержке Колэнерго и Магистральной энергосистемы Северо-запада РФ.

Измерения электромагнитных сигналов, возбуждаемых промышленными ЛЭП, выполнены как в пределах Балтийского щита, на удалениях до 700 км от источника, так и за его пределами, на Карельском перешейке ($r = 900$ км), на Шпицбергене ($r = 1300$ км) и на Украине ($r = 2150$ км). Измерения на больших удалениях от источника, за пределами Балтийского щита выполнены, главным образом, с целью изучения особенностей распространения электромагнитных сигналов в волноводе “Земля-ионосфера”, для задач дальней низкочастотной связи с погруженными объектами, для прогноза землетрясений и др.

В настоящей статье мы остановимся, главным образом, на рассмотрении результатов измерений, выполненных в пределах Балтийского кристаллического щита с целью изучения глубинной электропроводности и термодинамического режима литосферы и для разработки методики поисков и прогнозирования полезных ископаемых.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА FENICS

Главную особенность методики частотных электромагнитных зондирований в эксперименте FENICS составило использование двух взаимно-ортогональных промышленных линий электропередачи, подключаемых к мощному (до 200 кВт) генератору крайне низкочастотного (КНЧ) и сверхнизкочастотного (СНЧ) излучения в диапазоне частот 0.1–200 Гц. Это дает возможность “просвечивать” глубинное строение литосферы (здесь и далее под термином литосфера мы понимаем кристаллическую оболочку Земли, включающую в себя земную кору и верхнюю мантию) при двух взаимно-ортогональных поляризациях первичного поля. В свою очередь, это позволяет максимально приблизить технику зондирования с контролируруемыми источниками к традиционному методу аудиоманнитотеллурического (АМТ) и магнитотеллурического (МТ) зондирования, основанного на использовании энергии естественных источников грозового и магнитосферно-ионосферного происхождения. Отметим, что во всех крупных предыдущих экспериментах по глубинному и сверхглубинному зондированию литосферы с контролируруемыми источниками, известных в мировой практике, использовались, как правило, установки с одной ориентировкой питающей линией. Сами зондирования выполнялись в режиме постоянного тока [Краев и др., 1947; Cantwell et al., 1965; Van Zijl, 1969; Blohm et al., 1977] или становления поля на фронтах прямоугольных импульсов тока [Сапужак, Эненштейн, 1980; Жамалетдинов и др., 1982]. Ни в зарубежной, ни в отечественной практике глубинных электромагнитных зондирований литосферы не имеется прямых аналогов описанной в данной работе методики на основе мощных КНЧ-СНЧ излучающих систем и двух взаимно-ортогональных промышленных линий электропередачи (ЛЭП).

Принципиальная схема зондирования с контролируемым источником в тензорном варианте представлена на рис. 1. Мы называем эту методику магнитотеллурическим зондированием с контролируемым источником – control source magnetotellurics (CSMT) [Жамалетдинов и др., 2007]. В сравнении с хорошо известным методом аудиоманнитотеллурического зондирования с контролируемым источником в звуковом диапазоне частот (CSAMT) [Boerner, 1991; Zonge, Hughes, 1991], методика CSMT зондирований предназначена для работы в диапазоне крайне- и сверх низких частот (КНЧ-СНЧ) на границе частотного диапазона между МТ и АМТ методами (0.1–200 Гц) и применяется для изучения электропроводности литосферы на глубинах от первых единиц до 50–70 км. Однако, такая большая глубина проникновения поля в данном частотном диапазоне может быть достигнута только на участках земной поверхности, имеющих высокое электрическое сопротивление ($\rho \geq 10^4$ Ом м), то есть,

только на кристаллических щитах. Соответствующие оценки глубины зондирования в условиях плоской волны можно получить, пользуясь выра-

$$h_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \rho}{2f}} \text{ м, [Жданов, 1986].}$$

Нетрудно оценить, что в платформенных областях, где сопротивление осадочного чехла составляет, в среднем, 10 Ом м, наибольшая глубина зондирования, достигаемая в КНЧ диапазоне (0.1 Гц и выше), составит лишь первые единицы километров.

Для регистрации сигналов по методике CSMT используются широкодиапазонные пятикомпонентные 24-х разрядные цифровые станции (рис. 1) Естественные вариации электромагнитного поля Земли и сигналы от контролируемого источника регистрируются одновременно одними и теми же МТ-АМТ станциями. Гармонические сигналы контролируемого источника выделяются на фоне вариаций МТ-АМТ поля посредством процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ) или любых других методов цифровой фильтрации. Использование двух взаимно-ортогональных линий электропередачи (поляризацйй) позволяет оценивать размерность нижнего полупространства на этапе интерпретации данных и учесть возможное влияние горизонтальной двумерной или трехмерной неоднородности изучаемой среды по аналогии с тем, как это делается в методе МТЗ. Дополнительно для этой цели могут быть применены специальные приемы анализа первичных данных, основанные на учете свойств нормального поля контролируемого источника. В настоящей статье мы рассмотрим, главным образом, методику и результаты измерений с контролируемым источником. Сопоставление с результатами МТ-АМТ зондирований будет приведено по мере рассмотрения материала.

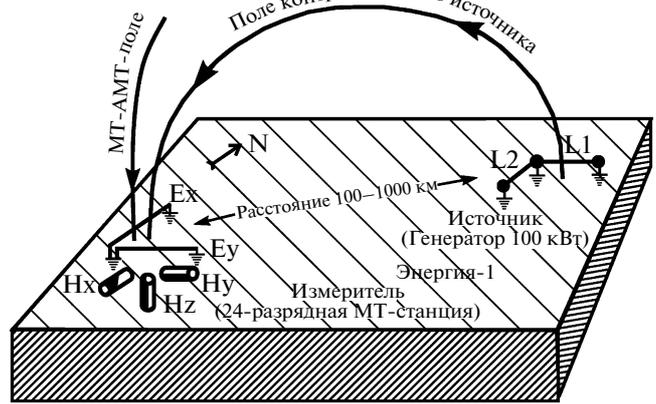


Рис. 1. Принципиальная схема установки тензорного частотного электромагнитного зондирования в поле двух взаимно-ортогональных излучающих линий (промышленных ЛЭП) в КНЧ-СНЧ диапазоне – установка Control Source Magnetotellurics (CSMT).

СХЕМА ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Структурная схема установки зондирования с применением промышленных ЛЭП приведена на рис. 2. На рисунке показан пример подключения генератора “Энергия-2” к ЛЭП “Кола-Мончегорск” протяженностью 120 км. Питание КНЧ-СНЧ генератора “Энергия-2” может осуществляться от любого трехфазного трансформатора с выходным напряжением 380 В, обеспечивающего необходимую потребляемую мощность 100–200 кВт (стационарный трансформатор собственных нужд электрической подстанции или передвижной дизель-генератор). Напряжение трехфазного трансформатора поступает на повышающий преобразователь (ПП). На выходе ПП формируется постоянное напряжение

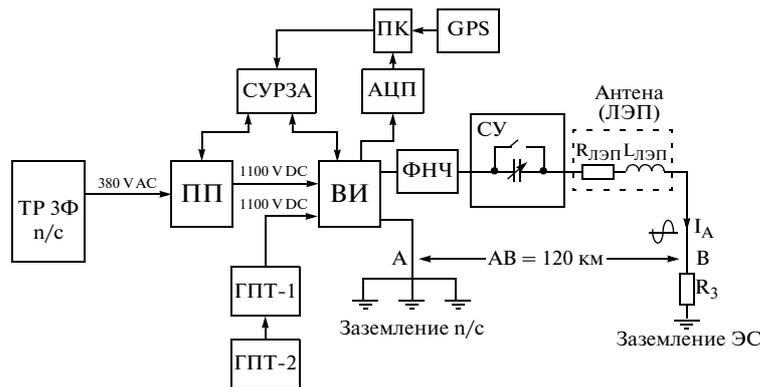


Рис. 2. Обобщенная структурная схема КНЧ-СНЧ генератора “Энергия-2”.

Условные обозначения: ТР 3Ф – питающий трехфазный трансформатор подстанции; ГПТ-1, ГПТ-2 – генераторы постоянного тока а/м ЗИЛ-131, в кунге которого смонтирован генератор “Энергия-2”; ПП – повышающий преобразователь; ВИ – высоковольтный инвертор; ФНЧ – фильтр низкой частоты; СУ – согласующее устройство (батарея компенсирующих емкостей); СУРЗА – система управления, регулировки, защиты и автоматики; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер; GPS – модуль ГЛОНАС/GPS синхронизации времени.

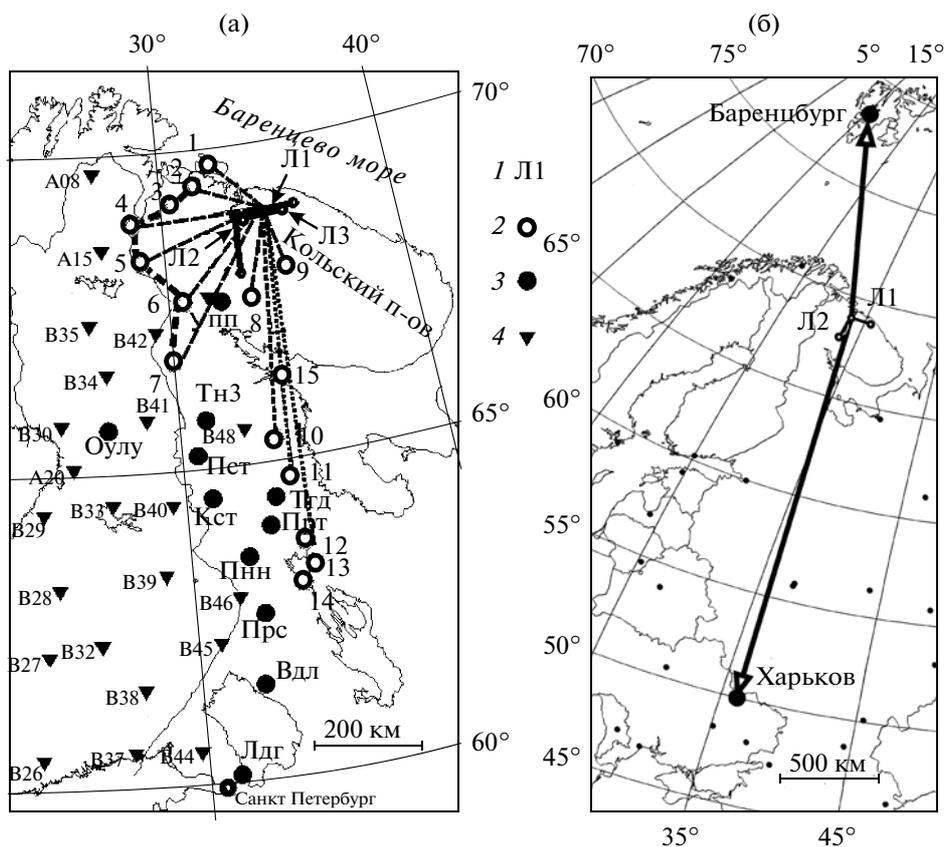


Рис. 3. Положение питающих и приемных линий в эксперименте FENICS: (а) — положение “ближних” приемных точек, в пределах восточной части Балтийского щита; (б) — положение “дальних” приемных точек.

Условные обозначения на рис. 3а: 1 — питающие линии L1, L2 и L3; 2 — точки зондирования FENICS-2009; 3 — точки зондирования FENICS-2007; 4 — точки МТЗ эксперимента BEAR-1998 [Korja et al., 2002]. Расшифровка географических названий точек зондирования в экспериментах FENICS-2007 и FENICS-2009 дана в табл. 1 в тексте.

величиной 1100 В. Это напряжение поступает на высоковольтный инвертор (ВИ), который формирует в нагрузке (антенне) ток синусоидальной формы заданной частоты (для этого используется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ)). Форма тока, в зависимости от поставленной задачи, может быть произвольной — синус, меандр, треугольник. Максимальное амплитудное значение напряжения на выходе ВИ достигает 1100 В.

В генераторе “Энергия-2” предусмотрена также возможность питания от двух собственных генераторов постоянного тока (ГПТ-1 и ГПТ-2 на рис. 2) автомобиля ЗИЛ-131, в кунге которого смонтированы все основные блоки генератора “Энергия-2”. Генераторы постоянного тока, имеющие выходное напряжение по 500 В, соединены последовательно, что позволяет сформировать на выходе постоянное напряжение величиной 1000 В. Это напряжение поступает непосредственно на высоковольтный инвертор ВИ. При автономном режиме работы мощность в нагрузке определяется максимальной выходной мощностью ГПТ (30 кВт).

Описание главных функциональных блоков генератора “Энергия-2” (ПП и ВИ на рис. 2) дано в публикациях [Терещенко и др., 2008; Баранник и др., 2009] и здесь не приводится.

Положение питающих линий генераторной установки в эксперименте FENICS показано на рис. 3. Субширотная линия L1 “Кола-Серебрянка” имеет длину 109 км. Линия L2 “Кола-Мончегорск” направлена с севера на юг и имеет длину 120 км. Кроме линий L1 и L2 иногда использовалась линия L3 — одна из антенн СНЧ-источника “Зевс” длиной 55 км [Велихов и др., 1994]. Сила тока первой гармоники в линии L1 изменялась от 170–235 А на низких частотах (0.1–10 Гц) до 25–60 А на высоких частотах (100–200 Гц). Линия L2 имеет сопротивление почти вдвое выше, чем линия L1 и поэтому ток в ней изменялся по другому закону — от 100–120 А на низких частотах (0.1–10 Гц) до 40–80 А на высоких частотах (100–200 Гц). На частотах 5–10 Гц и выше выполнялась компенсация реактивного сопротивления ЛЭП с помощью согласующего устройства (СУ на рис. 2). Ток в излучающих антеннах, имевший синусоидальную форму записывался на персональ-

Таблица 1. Точки зондирования

Обознач. точки	Географическое название	Организация	Обознач. точки	Географическое название	Организация
Упл	Уполокша	ГИ КНЦ РАН	3	Шуони-Печенга	ГИ КНЦ РАН
Тнз	Тунгохеро	»	4	Раякоски	»
Пст	Писто	»	5	Светлое	»
Кст	Костомукша	»	6	Ковдор	»
Пнн	Пенинга	»	7	Алакуррти	»
Прс	Поросозеро	»	8	Апатиты	ГС РАН
Тгд	Тунгуда	»	9	Ловозеро	ПГИ КНЦ РАН
Прт	Пертозеро	НИИФ СПбГУ	10	Кузема	СПбФИЗМИРАН
Вдл	Видлица	СПбФИЗМИРАН	11	Лехта	»
Лдг	Ладога	НИИЗК СПбГУ	12	Сегежа	»
Оулу	Оулу	Ун-т Оулу, Финл.	13	ПоповПорог	»
1	Рыбачий	ГИ КНЦ РАН	14	Сегозеро	»
2	Карик-явр	»	15	о. Белый	НИИФ СПбГУ

ный компьютер через АЦП E-140 с частотой дискретизации 5 кГц имел. Стабильность по частоте составляла 10^{-7} Гц. Ток в передающих антеннах и сигналы на приемных станциях были синхронизированы между собой посредством глобальной спутниковой системы GPS с точностью не хуже 10^{-2} с.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Наблюдения в эксперименте FENICS выполнены в Кольско-Карельском регионе СЗ России, в Северной Финляндии, на Шпицбергене и на Украине. Положение питающих линий и пунктов зондирования показано на рис. 3а для “ближних” пунктов зондирования, расположенных в пределах восточной части Балтийского щита и его обрамления, и на рис. 3б — для “дальних” точек, расположенных на обсерватории Баренцбург (Шпицберген) и в районе Харьковца (Украина). Расшифровка географических названий точек зондирования на рис. 3а с указанием организаций, принимавших участие в измерениях, дана ниже в виде табл. 1.

Временные ряды с результатами измерений занесены в однородную базу первичных данных эксперимента FENICS. Создана программа спектральной обработки измеренных сигналов синхронно с записями тока в излучающих антеннах. На рис. 4 приведен пример спектральной обработки электрических и магнитных компонент поля в эксперименте FENICS-2007.

Результаты первичной обработки данных представлены в значениях спектральной плотности мощности (СПМ). Все измерения, приведенные на рис. 3, выполнены в поле субширотной линии Л1. Соответствующая кривая СПМ силы тока в линии

Л1 показана в нижнем левом углу рис. 4. Анализ СПМ диаграмм на рис. 4 дает первое представление о типе глубинного электрического разреза. Отчетливое увеличение напряженности электрических и магнитных компонент поля в среднем диапазоне частот 2–20 Гц указывает на то, что удельное сопротивление средней части литосферы увеличивается с глубиной и затем уменьшается, то есть, глубинный разрез относится к типу “К” ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$). На всех графиках естественного шума отчетливо проявлена первая гармоника шумановского резонанса в районе 8 Гц и его более высокие гармоники.

Результаты регистрации сигналов эксперимента FENICS-2009 на удалении 2150 км приведены на рис. 5. Регистрация осуществлялась на низкочастотной обсерватории (НЧО) Радиоастрономического института НАН Украины (с. Мартовое, Харьковской обл., $49^{\circ}56'$ с.ш., $36^{\circ}57'$ в.д.). Прием излучения проводился при помощи двух устройств: феррозондового магнитометра Lem1-017 (0–0.5 Гц) и СНЧ комплекса на индукционных датчиках (0.5–40 Гц) [Пазнухов и др., 2010]. Спектральный анализ выполнен со временем накопления $T = 500$ сек (частотное разрешение 0.002 Гц). Выбранный интервал анализа позволил добиться точного соответствия частот в восстанавливаемых спектрах УНЧ-СНЧ сигналов, создаваемых генератором “Энергия-2”. Сигналы зарегистрированы от субширотной линии Л1 на частотах 0.642, 0.942, 1.422, 3.822, 6.422, 9.422, 19.42, 38.22 Гц. На рис. 5 изображен характерный пример амплитудного спектра сигнала на частоте 0.642 Гц. Видно, что сигнал наиболее четко проявлен в меридиональной компоненте B_x (ортогональной к направлению питающей линии) и существенно слабее в компоненте B_y (продольной к направлению питающей линии), что полностью согласуется с диаграммой направленности первичного поля.

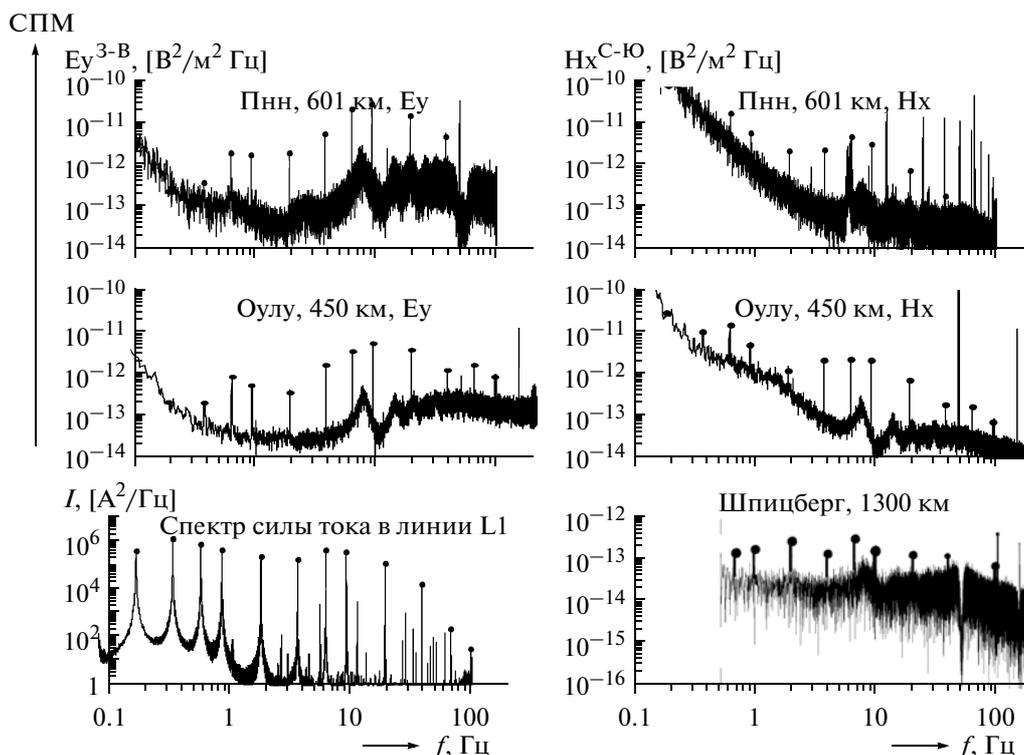


Рис. 4. Диаграммы спектральной плотности мощности (СПМ) по результатам обработки данных эксперимента FENICS-2007: электрическая (E_y , Восток-Запад) и магнитная (H_x , Север-Юг) компоненты измерены в поле субширотной линии L1 на разных удалениях от нее – (1) 450 км, Северная Финляндия, Университет Оулу, станция MTU2000, (2) 601 км, Южная Карелия, Пенинга, ГИ КНЦ РАН, станция СЧЗ-2002, и (3) 1300 км, Шпицберген, Баренцбург, станция ПГИ КНЦ РАН). СПМ I – спектр силы тока первой гармоники в линии L1. Положение питающей линии L1 и приемных пунктов показано на рис. 2.

Сигналы субмеридиональной излучающей антенны L2 зафиксировать не удалось. Это означает, что точка приема находится в пределах квазистационарной волновой зоны излучения, где влияние токов смещения еще недостаточно велико, чтобы привести к повороту диаграммы направленности на 90 градусов согласно расчетам, приведенным в работах [Бернштейн и др., 1974; Акиндинов и др., 1976].

Нормировка измеренных сигналов в значения кажущегося удельного электрического сопротивления выполнялась с применением двух типов нормировок – по входному импедансу и по электрическому полю. При нормировке, опирающейся на входной импеданс, по аналогии с методикой обработки магнитотеллурических данных [Бердичевский, 1968], достаточно знать амплитуду напряженности электрического и магнитного поля и частоту генератора:

$$\rho_T^{xy}(f) = 0.127T \left| \frac{E_x(f)}{H_y(f)} \right|^2, \quad \rho_T^{yx}(f) = 0.127T \left| \frac{E_y(f)}{H_x(f)} \right|^2,$$

$$\Phi_Z^{xy} = \Phi_{E_x} - \Phi_{H_y}, \quad \Phi_Z^{yx} = \Phi_{E_y} - \Phi_{H_x},$$

где T – период сигнала в секундах, $E_x(f)$ и $E_y(f)$ – напряженность электрического поля на частоте f в единицах В/м в направлениях север-юг и восток-запад соответственно, $H_x(f)$ и $H_y(f)$ – напряженность магнитного поля в единицах мА/м в тех же направлениях.

Нормировка, опирающаяся на электрическую компоненту по волновой зоне [Ваньян, 1965], требует знания не только напряженности поля в точке приема сигнала, но и параметров приемной и питающей установок, включая ток генератора в излучающей антенне. Значения кажущегося сопротивления вычисляются в этом случае с помощью выражений

$$\rho_k^{E_x}(f) = K \frac{E_x(f)}{I(f)} \quad \text{и} \quad \rho_k^{E_y}(f) = K \frac{E_y(f)}{I(f)},$$

где $E_x(f)$ и $E_y(f)$ – напряженность электрического поля в В/м, измеренная на частоте f в направлениях север-юг и восток-запад, соответственно, $I(f)$ – ток первой гармоники в амперах, и K – геометрический коэффициент установки, учитывающий взаимное расположение и размеры питающих и приемных линий. В дипольном приближении, для квазистационарной дальней (волновой) зоны, геометрический коэффициент K имеет вид:

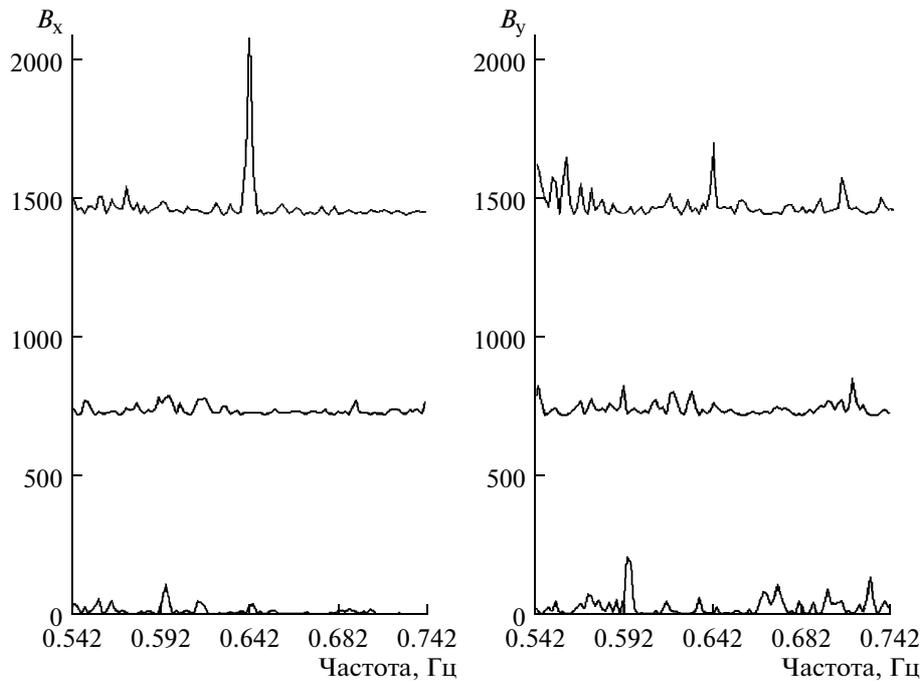


Рис. 5. Спектры сигналов субширотной линии Л1 на удалении 2150 км в районе Харькова на частоте 0.642 Гц по результатам эксперимента FENICS-2009 (Станция Lemі-017 и СНЧ-комплекс. Низкочастотная обсерватория Радиоастрономического института НАН Украины).

$$K = \frac{2\pi r^3}{AB(3 \cos^2 \theta - 2)},$$

где AB — длина передающей заземленной линии в метрах, r — расстояние между передатчиком и приемником в метрах, и θ — угол между линией AB , соединяющей концы заземлений питающей линии (ЛЭП), и направлением от середины AB на точку

приема. В условиях эксперимента FENICS, где длины питающих линий сопоставимы с разносоми, геометрический коэффициент K рассчитывался в каждой точке на основе реальной конфигурации питающего кабеля ЛЭП и с учетом недипольности установки [Шевцов, 2006].

На рис. 6 приведены результаты спектральной обработки данных в пунктах Лехта (11 на рис. 3) ($r =$

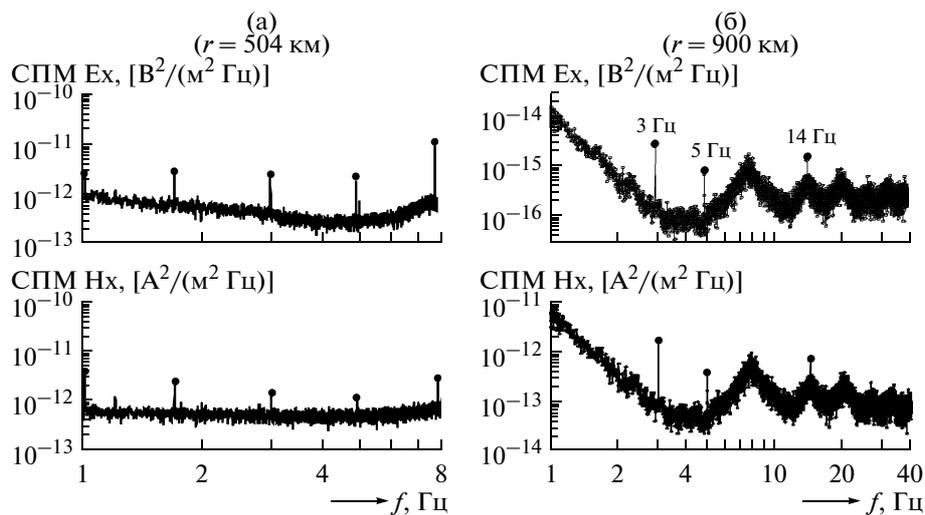


Рис. 6. Диаграммы спектральной плотности мощности (СПМ) электрических и магнитных компонент поля по результатам обработки сигналов, создаваемых линией Л1 в точке Лехта (а) — удаление 504 км и линией Л3 в точке Ладога (б) — удаление 900 км. Положение питающих линий Л1, Л3 и точек измерений показано на рис. 3а (Лехта обозначена под номером 11 и Ладога обозначена Лдг).

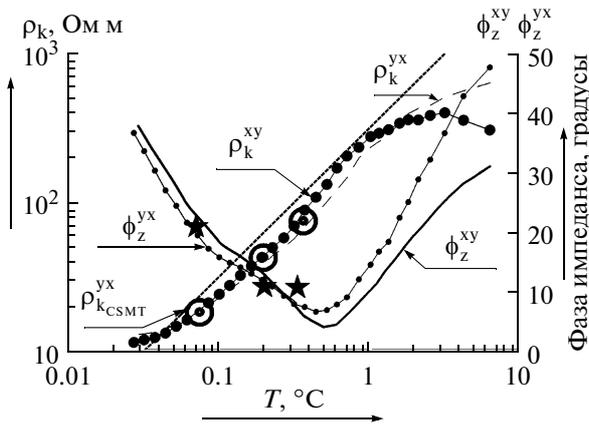


Рис. 7. Кривые кажущегося удельного сопротивления и фазы импеданса по данным CSMT и АМТ-МТ зондирований в точке Ладога на удалении 900 км от субширотной питающей линии ЛЗ. Положение линии ЛЗ и точки приема Ладога (Лдг) показано на рис. За.

Условные обозначения на кривых: ρ_k^{yx} и ρ_k^{xy} – кривые кажущегося сопротивления в поле естественных МТ-АМТ вариаций; ϕ_z^{yx} , ϕ_z^{xy} – то же, кривые фазы импеданса. ρ_{kCSMT}^{yx} (кружки с точками) – значения кажущегося сопротивления по результатам CSMT измерений в поле линии ЛЗ на частотах 3, 5 и 14 Гц. ϕ_{zCSMT}^{yx} (звездочки) то же, значения фазы импеданса.

= 504 км) и Ладога (Лдг на рис. 3) ($r = 900$ км) на примере широтной электрической (E_y) и меридиональной магнитной (H_x) компонент поля. Измерения в пункте Лехта выполнены от субширотной промышленной линии электропередачи Л1 длиной 109 км, с помощью станции GI MTS-1 на торсионных магнитометрах (СПБФ ИЗМИРАН). Измерения в пункте Ладога выполнены с помощью станции АКФ-4 на индукционных датчиках (НИИЗК СПбГУ) при излучении от субширотной линии ЛЗ (СНЧ-антенна “Зевс”, питаемая генератором Энергия-1). Можно видеть, что в точке Ладога амплитуда СПМ по магнитному полю ниже почти на полтора порядка, а по электрическому полю – на три порядка. Это обусловлено, прежде всего, почти вдвое большей удаленностью точки Ладога, а также тем, что антенна ЛЗ имеет длину 55 км, вдвое меньшую в сравнении с линией Л-1. Кроме того, линия ЛЗ имеет вдвое большее сопротивление кабеля и заземлений. Поэтому ток в ней был почти вдвое меньше, чем в линии Л1. Тем не менее, несмотря на столь сильную разницу в амплитуде излучения в точках Ладога и Лехта, соотношение “сигнал/шум” на записях магнитного поля на рис. 6 примерно одинаково и находится в пределах от 5 до 20 дБ. Это подтверждает очевидное преимущество индукционных датчиков перед торсионными при регистрации КНЧ-СНЧ сигналов.

Необходимо также заметить, что точка Ладога расположена на площади развития хорошо проводящих докембрийских глин на внешнем обрамлении Балтийского щита. Этим также определяется низкая интенсивность электрической компоненты поля. Например, на частоте 5 Гц спектр плотности мощности (СПМ) составляет 10^{-15} В²/м² Гц. Шаг по частоте $\Delta f = 0.005$ Гц. Пользуясь выражением $E = \sqrt{СПМ \Delta f}$, нетрудно определить напряженность электрического поля $E_y = 2.3 \times 10^{-3}$ мВ/км. Длина приемной линии равна 100 м, следовательно измеренное напряжение ΔU на входе станции составляло ничтожно малую величину, равную 2.3×10^{-7} В (230 нВ). Интенсивность шума естественного поля на той же самой частоте приблизительно равна 10^{-3} мВ/км (100 нВ на линии 100 м). СПМ внутреннего шума оборудования на частоте 5 Гц оценивается величиной 1.6×10^{-15} В²/м² Гц. Шаг по частоте в обоих случаях один и тот же – 0.005 Гц. Следовательно, напряжение внутреннего шума на частоте 5 Гц – приблизительно равно 2.8 нВ, что почти на два порядка меньше чем измеренное напряжение 230 нВ. Приведенные оценки показывают широкие возможности современных цифровых станций по регистрации слабых сигналов контролируемых источников на фоне помех.

Кажущееся удельное сопротивление и фаза импеданса, полученные по результатам обработки АМТ-МТ и CSMT зондирований в точке Ладога, представлены на рис. 7. На этом рисунке можно видеть рост кажущегося удельного сопротивления на кривых АМТ-МТ зондирования с увеличением периода T , что указывает на присутствие неглубоко залегающего плохо проводящего кристаллического основания. Восходящая ветвь ρ_T наклонена к оси периодов T под углом 45 градусов, что соответствует углу наклона 63 градуса в координатах (ρ_T , \sqrt{T}). Это позволяет оценить продольную удельную проводимость S осадочного покрытия, применяя асимптотическое выражение $S = 356 \sqrt{T/\rho}$, где T , ρ – координаты любой точки на восходящей асимптоте кажущегося сопротивления [Бердичевский, 1968]. Приблизительная оценка S составляет 25 см. Среднее удельное сопротивление верхних осадочных отложений, судя по левой высокочастотной ветви, составляет 10–20 Ом м, следовательно, глубина до основания находится в пределах 0.25–0.5 км.

На рис. 7 можно видеть также хорошее совпадение значений кажущегося удельного сопротивления и фазы импеданса, полученных по результатам АМТ-МТ зондирования в поле естественных вариаций и по результатам CSMT в поле контролируемого источника. Это позволяет предположить, что глубинное зондирование с контролируемым источником не дает никакого преимущества в сравнении с АМТ-МТ зондированием и, следовательно, нет

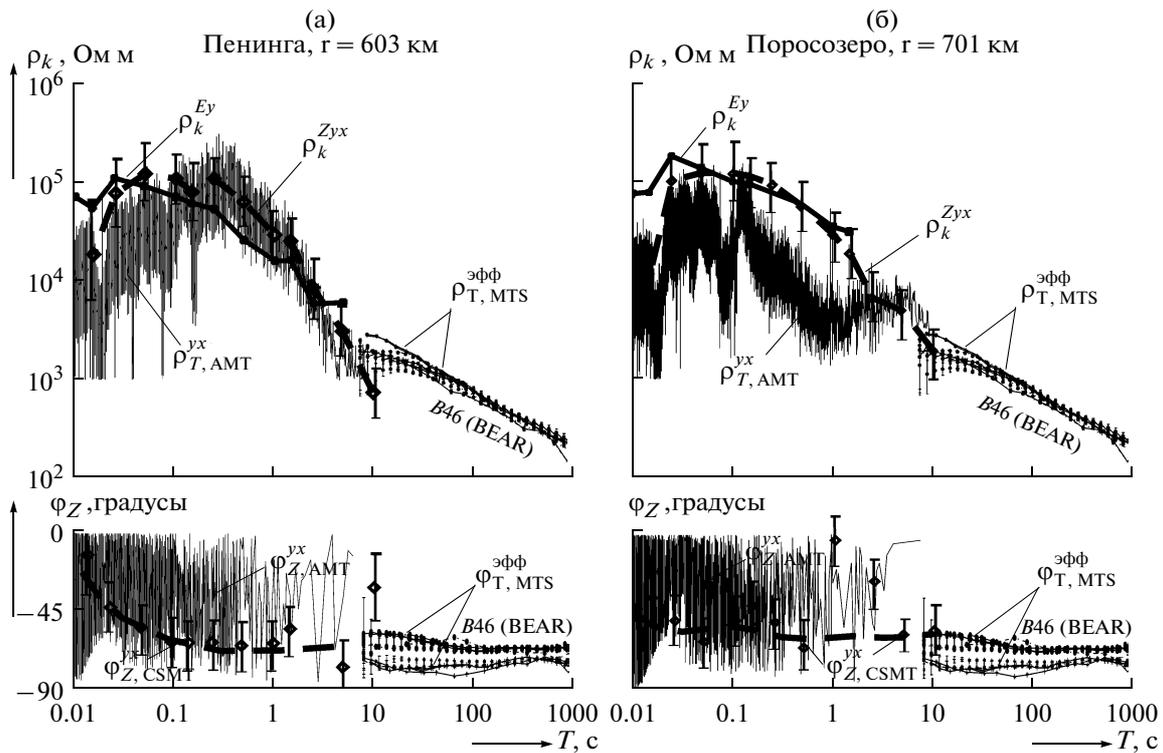


Рис. 8. Результаты обработки данных CSMT зондирований в поле промышленной ЛЭП Л1 в точках Пенинга (а) и Поросозеро (б) в комплексе с результатами обработки данных АМТ-МТ зондирований в естественных полях (измерения со станцией СЧЗ-2002, ГИ КНЦ РАН).

Условные обозначения на кривых: ρ_k^{Zyx} и ϕ_Z^{yx} – кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса, измеренные в поле субширотной линии Л1; $\rho_k^{E_y}$ – то же, кривые кажущегося сопротивления по электрической компоненте E_y ; $\rho_{T, AMT}^{yx}$ и $\phi_{Z, AMT}^{yx}$ – кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса, измеренные в поле АМТ-МТ вариаций; $\rho_{T, MTS}^{эфф}$ и $\phi_{T, MTS}^{эфф}$ – эффективные кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса МТЗ в точке В-46 эксперимента BEAR. Положение линии Л1 и точек Пенинга (Пнн), Поросозеро (Прс) и В-46 показано на рис. 3а.

необходимости использовать сложный CSMT метод, требующий применения громоздких и дорогостоящих генераторных устройств. Но этот вывод более или менее справедлив лишь при зондировании на поверхности хорошо проводящих пород, где глубина проникновения электромагнитного поля мала. В этих условиях меньше также влияние горизонтальной неоднородности пород и пренебрежимо мало влияние промышленных помех и грозových разрядов на первичную структуру АМТ поля. Не развивая дальше эту тему, требующую специального рассмотрения, вернемся к основному предмету настоящей работы, связанному с изучением глубинной электропроводности Балтийского щита.

Важным преимуществом CSMT зондирований является возможность совместного анализа результатов обработки данных на основе импедансного и геометрического (компонентного) подходов. В комплексе с АМТ-МТ зондированием это расши-

ряет диапазон информативных параметров. Пример такого анализа приведен на рис. 8.

На рис. 8 приведены результаты измерений в точках Пенинга ($r = 603$ км) и в точке Поросозеро ($r = 701$ км). Измерения выполнены станцией СЧЗ-2002, ГИ КНЦ РАН в поле субширотной линии Л1.

По тому же массиву данных выполнена обработка естественных вариаций для задачи АМТ-зондирования на основе компонент E_y и H_x . Значения кажущегося сопротивления ($\rho_{T, AMT}^{yx}$) и фазы ($\phi_{Z, AMT}^{yx}$) показаны в виде фона на рис. 8 без осреднения. Длиннопериодные (правые) ветви кривых сопротивления и фазы импеданса дополнены данными МТЗ в близко расположенной точке В-46 на сети BEAR [Varentsov et al., 2]. Данные BEAR приведены на рис. 8 после поворота матрицы тензора импеданса на 45 градусов в диагональное положение. Можно видеть в целом хорошее согласие CSMT и АМТ-МТ данных. Но наряду с этим необходимо

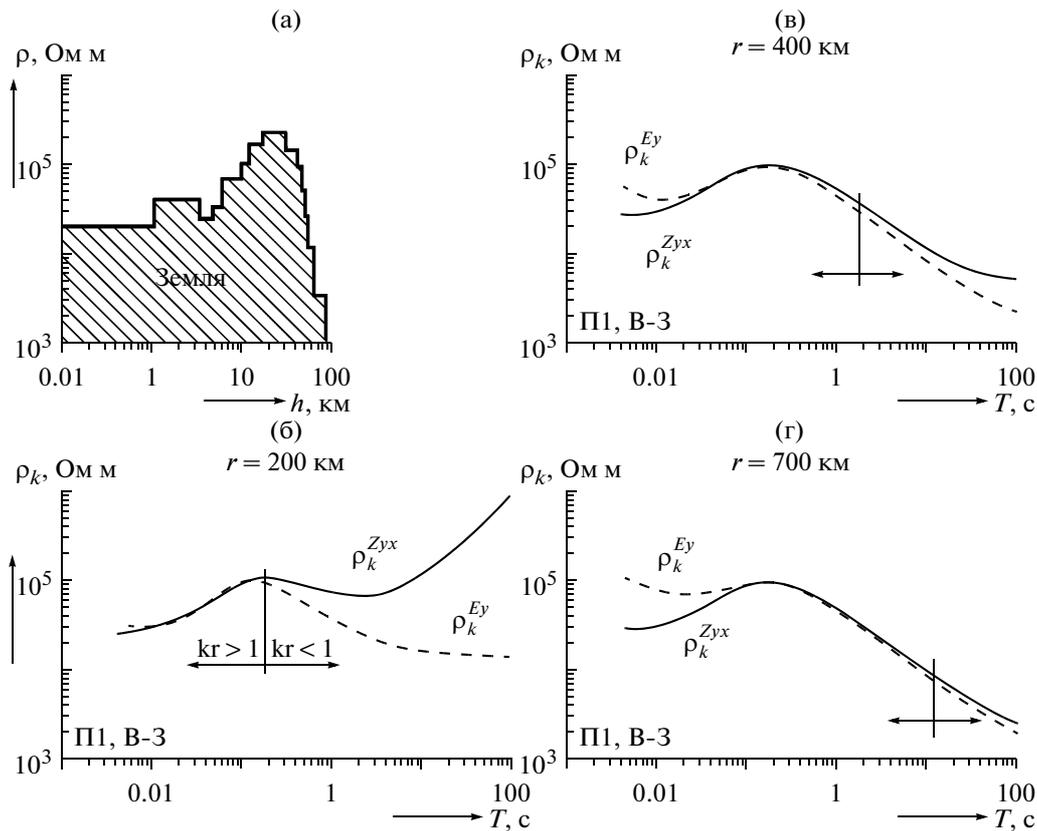


Рис. 9. Теоретические кривые кажущегося сопротивления, рассчитанные по входному импедансу (ρ_k^{Zyx}) и по широтной компоненте электрического поля (ρ_k^{Ey}) на удалениях 200, 400 и 700 км для дипольной экваториальной установки (аналог зондирования в поле широтной питающей линии Л1). Модель нижнего полупространства показана на рис. 9а. Вертикальной линией и горизонтальными стрелками на рис. 9б, 9в и 9г показана граница между волновой зоной ($kr > 1$) и зоной постоянного тока ($kr < 1$). Расчеты выполнены с учетом влияния ионосферы и токов смещения. Параметры ионосферы приняты для ночного времени ($\tau = 105$ Ом м, мощность — 2 км, высота над дневной поверхностью — 150 км [Maeda, Matsumoto, 1962]).

заметить, что CSMT данные сохраняют более высокую стабильность по амплитуде и по форме, несмотря на то, что отстоят друг от друга на 102 км. Это является важным подтверждением того, что точки Пенинга и Поросозеро были выбраны правильно и находятся в одинаковой геолого-тектонической обстановке — в пределах древнейшего Карельского мегаблока.

На рис. 8 можно видеть, что в средней полосе частот (1–30 Гц) значения ρ_k^{Zyx} и ρ_k^{Ey} совпадают между собой. Разброс значений не превышает 10–20%. На более низких частотах (ниже 1 Гц) кривые кажущегося сопротивления расходятся из-за влияния ближней зоны. На более высоких частотах (выше 30 Гц) эти кривые расходятся из-за влияния на кривую ρ_k^{Ey} ионосферы и токов смещения [Жамалетдинов и др., 1999]. Влияние токов смещения на столь низких частотах (100 Гц и выше) обнаруживается по той причине, что толщина скин-слоя в воздухе в этом слу-

чае составляет 500 км и меньше, что сопоставимо с расстоянием между источником и приемником.

Совпадение значений кажущегося сопротивления по входному импедансу ρ_k^{Zyx} и по электрической компоненте ρ_k^{Ey} является важным критерием, свидетельствующим: (1) о высокой надежности калибровки измерительных каналов, (2) о выполнении условий дальней зоны (плоская неоднородная волна) в соответствующей полосе частот и на данном расстоянии [Veshev, 1980; Wait, 1982] и (3) об однородности разреза и близости параметров нижнего полупространства под излучателем и под источником [Дрейзин, Шамраев, 1986].

Для проверки описанных выше (рис. 8) экспериментальных данных ниже приведены результаты теоретических расчетов прямой задачи поля электрического диполя для рассмотренных установок над слоистой моделью “нормального” разреза. Разрез показан на рис. 9а; он подобран для

данного региона путем решения обратной задачи эксперимента FENICS. Расчеты выполнены по входному импедансу (ρ_k^{Zyx}) и по широтной компоненте электрического поля (ρ_k^{Ey}) на удалениях 200, 400 и 700 км от источника для дипольной экваториальной установки. Это примерно соответствует зондированию в поле широтной питающей линии Л1 в эксперименте FENICS. В расчетах учтено влияние ионосферы и токов смещения. Параметры ионосферы приняты для ночного времени – удельное сопротивление ионосферы $\rho = 10^5$ Ом м, мощность – 2 км, высота над дневной поверхностью – 150 км [Maeda, Matsumoto, 1962]. Анализ теоретических кривых позволяет заключить, что влияние ионосферы и токов смещения приводит к аномальному росту значений кажущегося сопротивления по электрической компоненте ρ_k^{Ey} с ростом частоты, тогда как кривые кажущегося удельного сопротивления по входному импедансу ρ_k^{Zyx} свободны от влияния ионосферы и токов смещения согласно граничным условиям М.А. Леонтовича: в пределах волновой зоны значения ρ_k^{Zyx} зависят только от свойств нижележащего полупространства.

Важнейшим вопросом при анализе результатов CSMT зондирований является выяснение границ действия волновой зоны. Эта граница может быть отслежена по совпадению значений кажущегося сопротивления, вычисленных по импедансу ρ_k^{Zyx} и по электрической компоненте ρ_k^{Ey} (рис. 8). Кроме того, граница волновой зоны может быть оценена по величине волнового параметра kr , где r – расстояние между излучателем и приемником и k – волновое число ($k = \sqrt{i\omega\mu_0/\rho}$). Соответствующая граница, оцениваемая путем подстановки в выражение для волнового числа k значения кажущегося сопротивления на соответствующей частоте, показана вертикальными штрихами на рис. 9. Область, где $kr > 1$ соответствует волновой зоне, а область, где $kr < 1$ соответствует зоне постоянного тока.

Дополнительным методом, позволяющим отследить границы волновой зоны и возможное влияние горизонтальной неоднородности среды, является анализ кривых зондирования, измеренных при двух взаимно-ортогональных поляризациях первичного поля. В эксперименте FENICS-2007 такие измерения удалось провести в трех точках – Пенинга, Костомукша и Тунгозеро. Результаты их обработки представлены на рис. 10а кривыми кажущегося сопротивления по входному импедансу. Можно видеть, что по мере увеличения расстояния между источником и приемником кривые ρ_k экваториального (линия Л1) и осевого (линия Л2) зондирования расходятся между собой на все более и

более низких частотах. (8 Гц на разnose 379 км, точка Тнз; 2 Гц на разnose 505 км, точка Кст, и 0.5 Гц на разnose 603 км, точка Пнн). При этом указанные координаты точек расхождения кривых весьма точно совпадают с границами волновой зоны, оцениваемыми численно для каждой точки по волновому параметру kr (рис. 10а).

Наблюдаемый на рис. 10а характер изменения кривых кажущегося сопротивления при смене ориентирования первичного поля проиллюстрирован на рис. 10б графиками спектра плотности мощности (СПМ) электрических и магнитных компонент на примере измерений в точке Тунгозеро (Тнз, $r = 379$ км). Можно видеть на рис. 10б, что при практически одинаковом характере частотной зависимости СПМ силы тока в линиях Л1 и Л2 частотная зависимость СПМ напряженности электрических и магнитных компонент поля при включении линий Л1 и Л2 существенно различна и совпадает с характером соответствующих кривых кажущегося сопротивления. Особенно нагляден характер поведения электрического поля. При включении субширотной линии Л1 напряженность поля E_y уменьшается с понижением частоты и соответственно уменьшаются с понижением частоты значения ρ_k^{Zyx} на рис. 10а. При включении субмеридиональной линии Л2 напряженность поля E_x увеличивается с понижением частоты и, соответственно, увеличиваются значения ρ_k^{Zxy} (рис. 10а).

Отмеченные на рис. 10 характерные черты поведения экспериментальных кривых кажущегося сопротивления полностью согласуются с теоретическими оценками. Согласно [Вешев, 1980] напряженность электрического поля заземленного диполя для экваториальной (E_θ) и осевой (E_r) установок может быть определена выражением $E_{\theta,r} = E^0 e_{\theta,r}$, где $E^0 = \frac{\rho_1 IAB}{2\pi r^3}$ – поле диполя на постоянном токе, а $e_{\theta,r}$ – электрическое число, показывающее зависимость поля от частоты.

Для экваториальной установки $e_\theta = 2 - (1 + kr)e^{-kr}$.

Для осевой установки $e_r = 1 + (1 + kr)e^{-kr}$.

В теории частотных зондирований принято выполнять нормировку поля по волновой зоне [Ваньян, 1965]. В этом случае кривые кажущегося сопротивления над слоистым полупространством для осевой и экваториальной установок совпадают. С понижением частоты и с выходом в зону постоянного тока значения кажущегося сопротивления для экваториальной установки понижаются вдвое, а для осевой установки – увеличиваются вдвое. Приведенные теоретические оценки находят экспериментальное подтверждение на рис. 10а.

При анализе приведенной выше ситуации в применении к кривым кажущегося сопротивления по

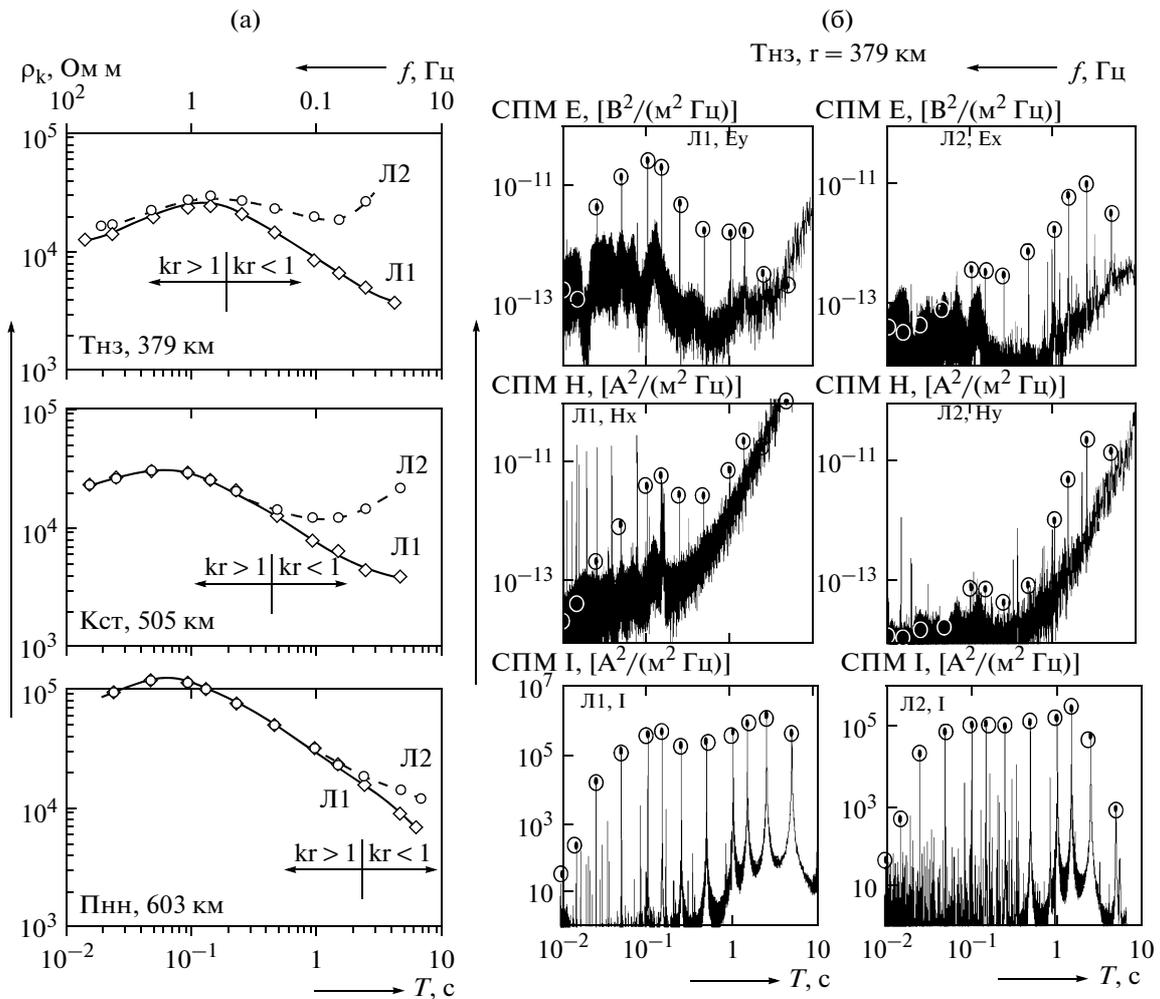


Рис. 10. Экспериментальные кривые кажущегося сопротивления CSMT по входному импедансу в точках Тунгозеро (Тнз), Костомукша (Кст) и Пенинга (Пнн) в поле линий Л1 и Л2 (а) и спектры плотности мощности (СПМ) электрических и магнитных компонент в поле линий Л1 и Л2 в точке Тунгозеро (Тнз) и соответствующие СПМ силы тока I в линиях Л1 и Л2 (б). Субширотная линия Л1 создает поле экваториальной установки; субмеридиональная линия Л2 – осевой установки. Измерения выполнены со станцией СЧЗ-2002, ГИ КНЦ РАН. Положение питающих линий и точек приема показано на рис. 3а. Остальные обозначения те же, что на рис. 9.

входному импедансу необходимо учитывать также поведение магнитных компонент. Ограничившись волновой зоной, приведем выражения для электрических и магнитных компонент поля горизонтального электрического диполя, ориентированного вдоль оси X по данным [Вешев, 1980] (с учетом перехода от системы СГС к СИ):

$$E_x = \frac{IL_{AB}(3\cos^2\theta - 2)}{2\pi r^3} \rho,$$

$$H_y = -\frac{IL_{AB}(3\cos^2\theta - 2)}{2\pi r^3 \sqrt{i\omega\mu}} \sqrt{\rho},$$

где I – сила тока в Амперах, L_{AB} – длина диполя АВ в метрах, ρ – удельное электрическое сопротивление в Ом метрах, r – разнос в метрах, θ – угол между осью диполя и направлением на точку

приема, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота в радианах, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [Гн/м] – магнитная проницаемость вакуума.

Из приведенных выражений можно видеть, что напряженность магнитного поля зависит от удельного сопротивления среды под корнем и, следовательно, свойства поля при переходе из волновой зоны в зону постоянного тока определяются, главным образом, электрическими компонентами поля входного импеданса.

Для проверки приведенных на рис. 10 результатов экспериментальных наблюдений нами проведены теоретические расчеты кривых кажущегося сопротивления электрического диполя по входному импедансу на удалениях 200, 400 и 700 км от источника для экваториальной установки (аналог зондирования в поле широтной линии Л1) и для осевой установки (аналог зондирования в поле ме-

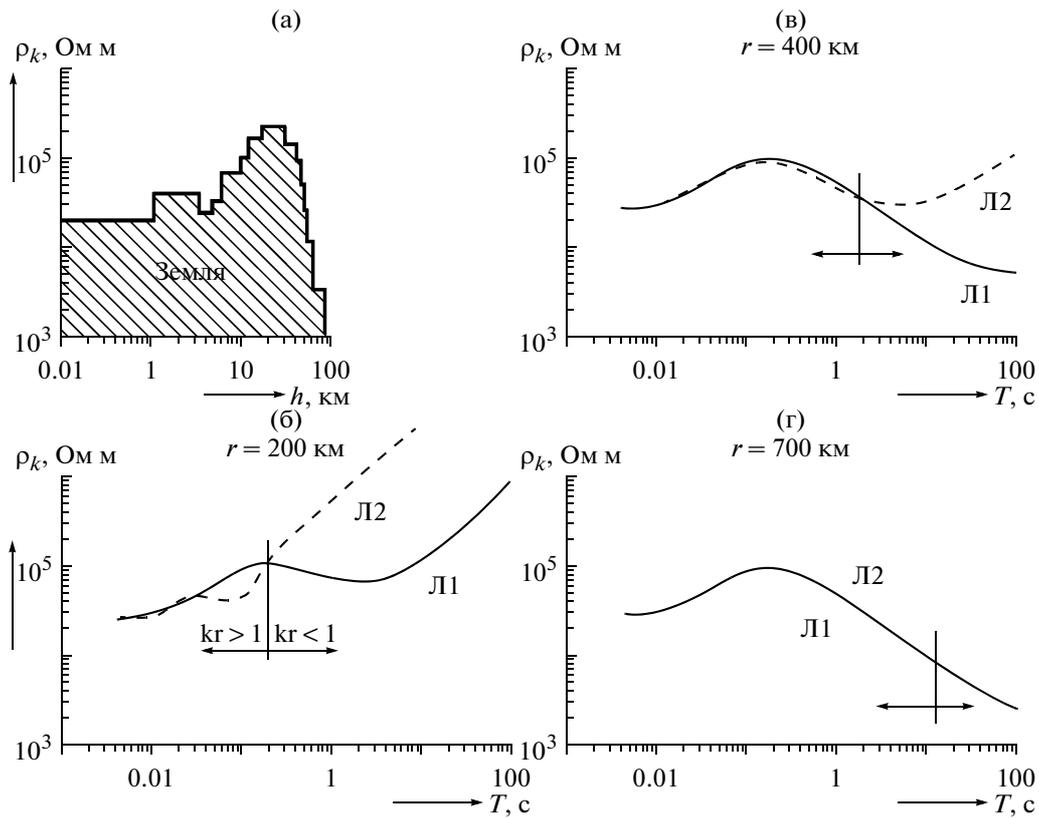


Рис. 11. Теоретические кривые кажущегося сопротивления CSMT по входному импедансу на удалениях 200, 400 и 700 км от источника для экваториальной дипольной установки (Л1) для осевой дипольной установки (Л2). Положение линий Л1 и Л2 показано на рис. 3а. Остальные обозначения те же, что на рис. 9.

ридиональной линии Л2). Результаты расчетов приведены ниже на рис. 11.

Из сравнения рис. 10а и рис. 11 можно видеть полное согласие экспериментальных и теоретических данных. Кривые на рис. 10а и рис. 11 настолько близки между собой по характеру, что можно предположить, что экспериментальные замеры были выполнены не в реальной геологической среде, неоднородной по составу и строению, а в электролитической ванне. Обращает на себя внимание одна важная особенность поведения кривых кажущегося сопротивления экваториальной установки. Как по экспериментальным, так и по теоретическим данным они имеют нисходящий характер во всем диапазоне частот, на расстояниях 400 км и более. Это указывает на сохранение условий волновой зоны вплоть до самых низких частот. Отмеченный феномен может быть объяснен, прежде всего, градиентным увеличением с глубиной электропроводности литосферы, начиная с глубин 10–15 км и более. Это приводит к тому, что по мере понижения частоты электромагнитное поле, создаваемое линией Л1 (экваториальная установка), захватывает все более глубокие и более проводящие породы. Благодаря этому, с понижением частоты длина электромаг-

нитной волны в литосфере увеличивается слабо и поле во всем диапазоне низких частот остается в условиях волновой зоны. При зондировании с линией Л2 (осевая установка) этот эффект проявлен слабее или не наблюдается совсем по той причине, что осевая зондирование обладает вдвое меньшей глубиной в сравнении с экваториальным [Заборовский, 1963; Spice, 1989]. Необходимо учесть также, что центр линии Л2 находится примерно на 50 км ближе к пунктам зондирования на меридиональном профиле по сравнению с положением центра линии Л1. Это также сокращает глубину зондирования с линией Л2.

Описанные выше (рис. 8–рис. 11) свойства экваториальной и осевой установок, обнаруженные по данным эксперимента FENICS-2007, получили полное подтверждение в результатах эксперимента FENICS-2009. На рис. 12, в качестве примера, приведены результаты измерений, выполненных в 2009 году в точке “Попов порог” (точка 13 на рис. 3) с применением станции GI MTS-1 (СПбФ ИЗМИРАН).

Обработка выполнена по полному электрическому полю. На рис. 12 можно отчетливо просле-

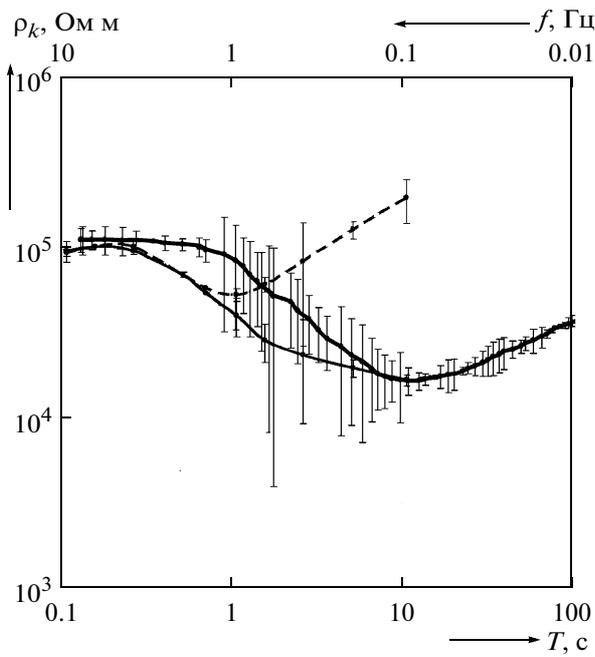


Рис. 12. Результаты CSMT зондирования с промышленными линиями Л1 и Л2 в точке “Попов порог” (г 635 км) в сопоставлении с данными АМТ-МТ зондирования в той же точке: ρ_k^{Etot} , Л1 – кривая CSMT по полному электрическому полю (линия Л1, экваториальная установка); ρ_k^{Etot} , Л2 – то же (линия Л2, осевая установка). $\rho_T^{эфф}$ – кривая МТЗ по полному полю. Положение питающих линий Л1, Л2 и точки приема “Попов порог” (13) показано на рис. 3а (измерения выполнены станцией GI-MTS-1, СПбФ ИЗМИРАН).

дить совпадение экваториальной ρ_k^{Etot} , Л1 и осевой ρ_k^{Etot} , Л2 кривых кажущегося сопротивления в волновой зоне в диапазоне частот 1–10 Гц. Ниже 1 Гц наблюдается резкое отклонение вверх кривой кажущегося сопротивления ρ_k^{Etot} , Л2 для осевой установки, свидетельствующее о завершении условий волновой зоны. По этим же данным в точке “Попов порог” выполнена обработка МТЗ с использованием модифицированной программы В.Ю. Семенова. Можно видеть, что данные МТЗ весьма удовлетворительно сходятся с результатами CSMT на максимуме кривых зондирования, но существенно отклоняются в сторону аномально высоких значений кажущегося сопротивления на частотах 2–0.2 Гц.

Можно предположить, что наблюдаемые на рис. 8 и рис. 12 расхождения между CSMT и МТ-АМТ данными обусловлены недостаточным временем накопления МТ-АМТ вариаций. Отсюда можно сделать вывод, что для полного совпадения результатов достаточно увеличить время наблюдений в естественных полях. Ниже приведен пример со-

поставления МТЗ и CSMT в точке “Пертозеро” (рис. 13), который ставит под сомнение такое предположение. Измерения в точке “Пертозеро” проводились в течение 7 дней непрерывно. Каждый день шла регистрация ночных сигналов субширотной линии Л1 на фоне МТ-вариаций. Запись велась с применением станции GI MTS-1 (НИИФ СПбГУ) с торсионными магнитометрами в частотном диапазоне 0–8 Гц со скоростью оцифровки 50 Гц. Результаты обработки данных приведены на рис. 13.

Кривая $\rho_T^{МТЗ}$ на рис. 13 представляет результат суммирования данных МТЗ за все 7 дней. Обработка велась по программе В.Ю. Семенова. Значения $\rho_T^{МТЗ}$ даны по эффективным значениям. Результаты зондирования CSMT в поле линии Л1 также просуммированы за все 7 ночных сеансов регистрации. При этом использовались полные значения импеданса, поскольку амплитуда поля была примерно одинакова по обоим горизонтальным компонентам как электрического, так и магнитного полей, несмотря на то, что точка приема находилась на экваториальной оси питающего диполя Л1 (рис. 3). Это может свидетельствовать о локальной горизонтальной неоднородности среды в районе точки наблюдений Пертозеро. Возможной причиной является то, что точка наблюдений располагалась на оси протяженного разлома. Этим же можно объяснить и то, что кривая CSMT зондирования располагается примерно на половину порядка ниже “нормальной” кривой кажущегося сопротивления, наблюдаемой на большинстве точек CSMT зондирования в пределах Карельского мегаблока. Но еще более низкое положение занимает левая, высокочастотная ветвь кривой МТЗ. Ее формальная интерпретация по S-асимптотике указывает на то, что в верхней части разреза залегает проводящий слой с продольной проводимостью порядка 5 см. Такой вывод не согласуется с представлением о геoeлектрическом разрезе в данном районе, основанном на результатах зондирования с контролируруемыми источниками как на переменном, так и на постоянном токе. Последние указывают на то, что продольная проводимость осадочного чехла (морены) в данном районе составляет сотые доли Сименса, а обнаруживаемый в диапазоне глубин 2–10 км промежуточный проводящий “ДД-слой”, как это было оценено ранее [Жамалетдинов и др., 2005] и будет показано ниже на рис. 14, имеет продольную проводимость в десятки доли Сименса.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА FENICS

Основным материалом для комплексной геолого-геофизической интерпретации данных эксперимента “FENICS” явились результаты CSMT зондирования по субмеридиональному профилю

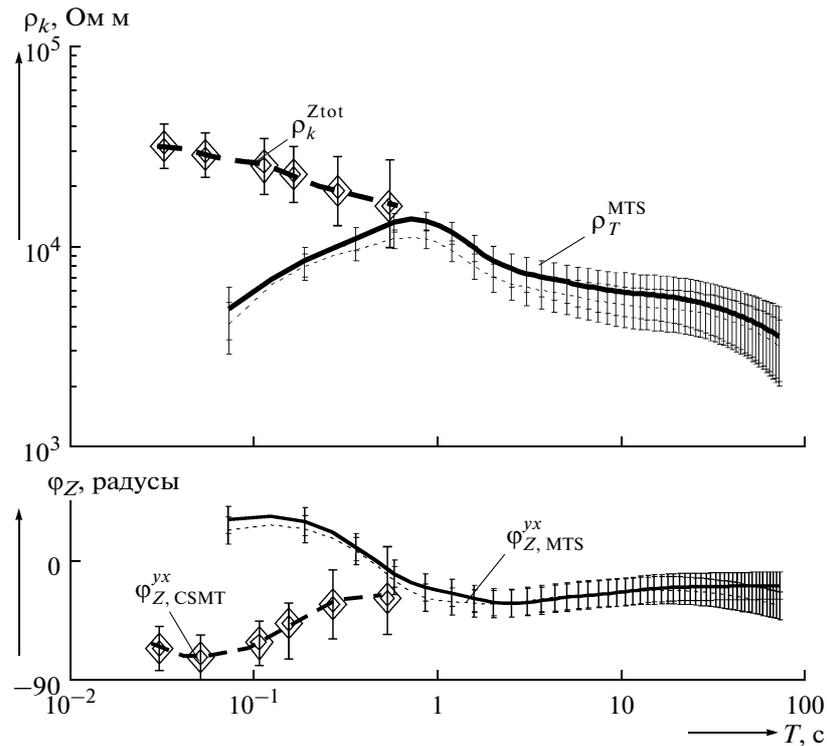


Рис. 13. Сопоставление результатов CSMT зондирования в поле линии Л1 и результатов МТЗ в точке “Пертозеро” ($r = 570$ км): ρ_k^{Ztot} – кажущееся сопротивление CSMT в поле линии Л1 по полному импедансу, $\phi_{Z,CSMT}^{YX}$ – то же, фаза импеданса УХ; $\rho_T^{эфф}$ и $\phi_{Z,MTS}^{YX}$ – эффективное кажущееся сопротивление и фаза импеданса УХ по результатам МТЗ. Измерения выполнены со станцией GI-MTS-1, СПбГУ. Положение точки “Пертозеро” (Прт) и линии Л1 показано на рис. 3а.

Уполокша-Поросозеро протяженностью 700 км. Результаты первичной обработки данных по профилю и их одномерной инверсии приведены на рис. 14.

Расстояния между измерительными станциями и излучающими антеннами Л1 и Л2 изменяются от 186 км (Упл) до 701 км (Прс). Основная информация о глубинном разрезе получена по результатам зондирований в низкочастотном диапазоне 0.1–200 Гц. Наряду с этим получены высокочастотные ветви кривых кажущегося удельного сопротивления ($f > 1000$ Гц), несущие информацию о самой приповерхностной части разреза. Эти данные получены путем пересчета в частотную область кривых кажущегося сопротивления зондирований на постоянном токе. Зондирования на постоянном токе выполнялись в каждой точке CSMT измерений. Расстояния между передатчиком и приемником изменялись от 2 до 10–15 км. Все зондирования на постоянном токе выполнены в двух взаимно-ортогональных направлениях, чтобы изучить возможное влияние анизотропии. В большинстве случаев коэффициент анизотропии $\lambda = \rho_k^{max} / \rho_k^{min}$ не превышал 1.2. Кривые кажущегося удельного сопротивления были

трансформированы в частотную область в два этапа. На первом этапе кривые кажущегося удельного сопротивления на постоянном токе были инвертированы в 1D модели удельного сопротивления нижнего полупространства. На втором этапе решалась прямая одномерная задача частотного зондирования в дальней зоне для модели удельного сопротивления верхней коры, полученной при зондировании на постоянном токе. Далее высокочастотная ветвь кривой кажущегося удельного сопротивления, полученная при зондировании на постоянном токе, интерполировалась с данными CSMT зондирования в поле промышленных ЛЭП (кривые 4 на рис. 14а).

Рассмотрение кривых кажущегося сопротивления на рис. 14а позволяет отметить их конформный характер, указывающий на общие черты изменения удельного сопротивления пород с глубиной на всем протяжении профиля длиной 700 км. В частности, на всех кривых наблюдается снижение сопротивления в районе 100 Гц, связываемое с неоднородной промежуточной проводящей областью, “слоем ДД” в диапазоне глубин от 2–3 до 5–10 км [Жамалетдинов и др., 2005]. На всех кривых CSMT

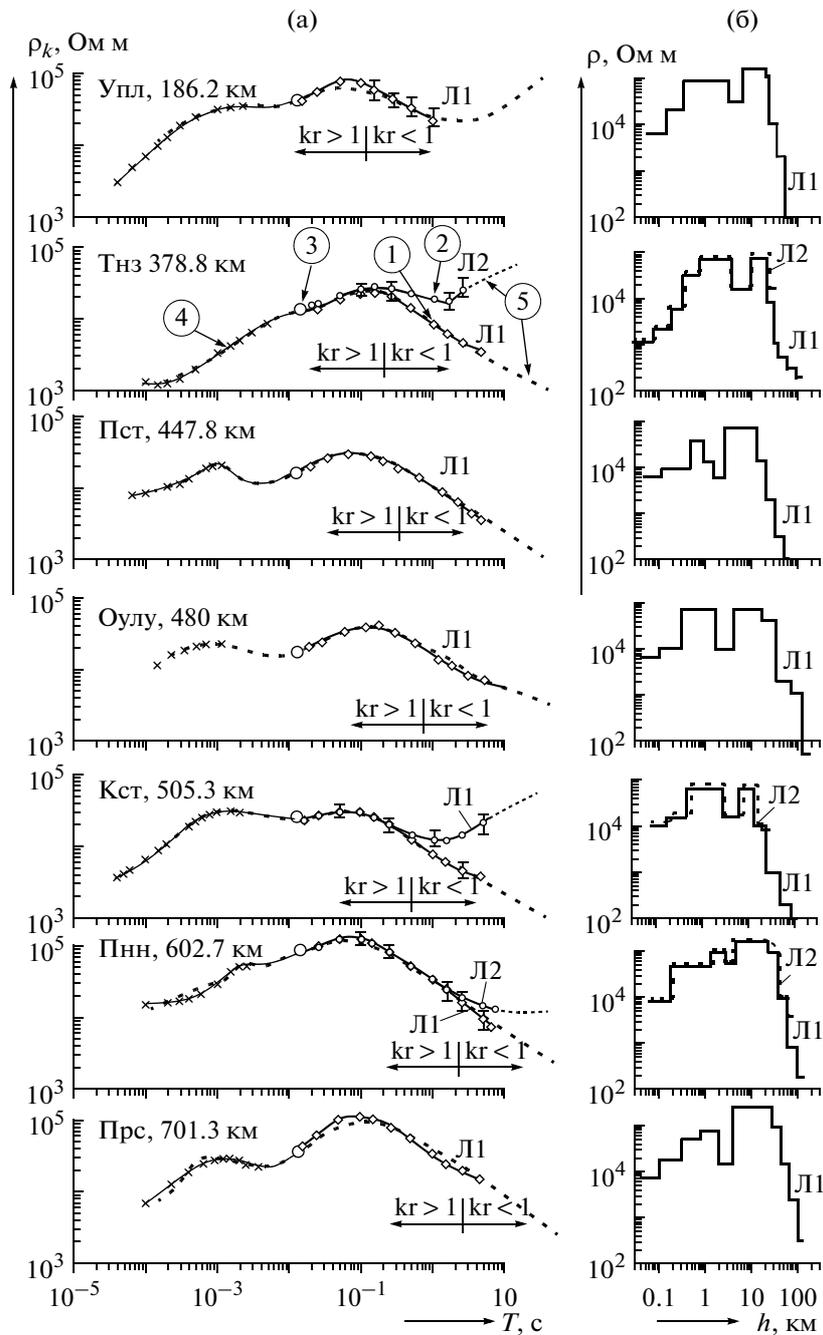


Рис. 14. Сводная диаграмма результатов зондирования CSMT на профиле Уполокша – Поросозеро протяженностью 700 км: (а) – кривые кажущегося сопротивления; (б) – одномерные разрезы $\rho(h)$ по результатам решения обратной задачи. Условные обозначения – цифры в кружках на примере точки Тнз, $r = 378.8$ км: 1 – кривая ρ_k^{Zyx} в поле линии Л1; 2 – кривая ρ_k^{Zxy} в поле линии Л2; 3 – кривая ρ_k^{Zyx} в поле линии Л3 на частоте 82 Гц; 4 – кривая ρ_ω частотного зондирования, рассчитанная теоретически по данным зондирования на постоянном токе с разносами до 10 км; 5 – теоретические кривые ρ_k по результатам решения обратной задачи. Положение линий Л1, Л2 и пунктов зондирования показано на рис. 3а.

зондирования наблюдается широкий максимум в районе 5–10 Гц со значениями кажущегося сопротивления в интервале от 30 до 100 тысяч Ом м. Примечательно, что хорошее согласие кривых кажущегося

сопротивления получено, несмотря на то, что измерения были выполнены в разные годы, разными станциями и от разных источников. Измерения сигналов от линий Л1 и Л2 проводились с интерва-

лом в одну неделю при полностью новых расстановках электрических линий и магнитных датчиков. Кружками под № 4 отмечены точки зондирования в поле СНЧ-антенны “Зевс” (линия Л3 на рис. 3), измеренные в 2008 году. Они также уверенно согласуются с другими данными.

Задача инверсии была решена для кривых кажущегося удельного сопротивления по входному импедансу. За основу принято решение прямой задачи для поля горизонтального электрического диполя в горизонтально-слоистом пространстве. Программа разработана А.Н. Шевцовым [2001; 2006] на основе теоретических концепций, изложенных в работах [Chave, 1983; Chave, 1984; Voerner, 1991]. Источник и точка приема имеют сферические координаты (r', φ', z') и (r, φ, z) , соответственно. Все пространство горизонтально-слоистое с параметрами k -го слоя: σ_k — удельная проводимость; ε_k — абсолютная диэлектрическая проницаемость, μ_k — абсолютная магнитная проницаемость, h_k — мощность. Все компоненты поля в слоистом пространстве определяются следующим выражением:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \frac{I(\omega)}{4\pi} \int_0^\infty \tilde{F} \begin{bmatrix} \partial_{xx} \\ \partial_{xy} \\ \partial_x \\ \partial_y \\ 1 \end{bmatrix} \lambda J_0(\lambda \xi) d\lambda$$

$I(\omega)$ — ток в источнике в зависимости от круговой частоты,

$J_0(\lambda \xi)$ — функция Бесселя первого рода нулевого ряда,

$\xi = \sqrt{r'^2 + r^2 - 2rr' \cos(\varphi' - \varphi)}$ — расстояние между источником и приемником на проекции к горизонтальной плоскости,

\tilde{F} — универсальная исходная матрица (6×5) .

На основе этого решения прямой задачи выполнены все численные расчеты, представленные на рис. 8 и рис. 12. Это же решение прямой задачи использовалось и для инверсии данных, основанной на рассмотрении полного поля без разделения его на дальнюю, ближнюю или промежуточную зоны. Сама инверсия выполнена с использованием трех различных приемов — на основе метода эффективной линеаризации (МЭЛ) [Porokhova, Kharlamov, 1990], метода контролируемой трансформации [Бердичевский, Дмитриев, 1992] и обычного метода подбора [Бердичевский, Дмитриев, 1992]. Последний оказался наиболее эффективен при выполнении бимодальной интерпретации. Все инверсии были сделаны с использованием фазы. При этом она рассчитывалась по кривой кажущегося сопротивления по

формуле Вайдельта и играла вспомогательную роль в качестве “индикатора гладкости” кривой кажущегося сопротивления.

Одномерные разрезы удельного электрического сопротивления по результатам инверсии показаны на рис. 14б. Для трех пунктов, где были измерены сигналы от линий Л1 и Л2 (Тнг, Кст и Прс), была выполнена бимодальная инверсия с учетом обеих поляризаций поля Л1 и Л2. Согласие результатов бимодальной инверсии с экспериментальными данными, полученными при двух квазиортогональных поляризациях первичного поля, является важным дополнительным аргументом в пользу однородной (одномерной) структуры глубинной электропроводности литосферы Восточной Фенноскандии.

Общий анализ результатов глубинных электромагнитных зондирований, выполненных в рамках эксперимента FENICS позволяет сделать три следующих основных вывода.

1. Отмечается полное согласие по форме и амплитуде кривых кажущегося сопротивления, зафиксированных на территории Восточной части Балтийского щита и, в том числе, на субмеридиональном профиле протяженностью 700 км.

2. Наблюдается совпадение с погрешностью не более 10–20 процентов кривых кажущегося удельного сопротивления, рассчитанных по электрической компоненте и по входному импедансу, а также кривых кажущегося сопротивления, измеренных при широтной и меридиональной поляризациях первичного поля, в пределах волновой зоны.

3. Наблюдается согласие экспериментальных и теоретических оценок границ волновой зоны и особенностей ее проявления на кривых кажущегося сопротивления CSMT зондирований при осевой и экваториальной расстановках питающих и приемных линий.

Отмеченные выше наблюдения за характером первичных данных глубинных зондирований (рис. 8, рис. 10, рис. 12, рис. 13, рис. 14а), анализ результатов теоретических расчетов (рис. 9, рис. 11) и решений обратной задачи (рис. 14б) позволяют сделать главный вывод о том, что структура глубинной электропроводности литосферы восточной части Балтийского щита отличается существенной горизонтальной однородностью (стратификацией) электрических свойств в диапазоне глубин от 15–20 до 50–70 км. Этот вывод находится в противоречии с многолетним опытом магнитотеллурических исследований, указывающих на резкую электрическую неоднородность литосферы Балтийского щита [Рокитянский и др., 1963], в том числе, и с результатами МТЗ, приведенными в настоящей работе, для своего разрешения требует проведения дополнительных исследований.

На фоне в среднем однородного геоэлектрического разреза литосферы Балтийского щита в северо-западной части Карельского мегаблока и в Фин-

Таблица 2. Поперечное сопротивление литосферы по результатам эксперимента FENICS

Пункт	$T = \sum h_i \rho_i, 10^9 \text{ Ом м}^2$	Расстояние, км
Упл	4.0	186
Тнз	1.2	379
Пст	0.8	448
Оулу	1.4	480
Кст	0.8	505
Тгд	11.2	510
Пнн	5.2	603
Прс	7.6	701

ландии (район Оулу) выделяется область пониженного положения кривых кажущегося сопротивления (рис. 14а) и, соответственно, пониженных значений поперечного сопротивления литосферы на площади порядка 80 тыс.кв.км. Поперечное электрическое сопротивление T определяется выражением $T = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i$, где h_i – толщина и ρ_i – удельное электрическое сопротивление в i -ом слое литосферы в диапазоне глубин 10–50 км (табл. 2).

Фоновое (“нормальное”) значение поперечного сопротивления литосферы оценивается величиной порядка 10^{10} Ом м². Отметим, что полученное значение совпадает с величиной поперечного сопротивления литосферы по данным МГД-эксперимента “Хибинь” [Жамалетдинов, 1990] и близко к значению среднего поперечного сопротивления континентальной коры, полученному в работе

[Fainberg, et al., 1990] по данным солнечно-суточных вариаций (3×10^9 Ом м²). В пределах аномалии величина поперечного сопротивления уменьшается до 10^9 Ом м². Ее контуры аномалии показаны изолиниями T на рис. 15а.

Сравнение контуров аномалии поперечного сопротивления со схемой распространения “коровых” проводящих объектов [Жамалетдинов, 1990; Korja и др., 2002] не позволяет найти между ними общие черты. Это “несовпадение” указывает на глубинный характер аномалии поперечного сопротивления, поскольку природа коровых аномалий полностью определяется влиянием электронно-проводящих сульфидно-углеродистых пород в приповерхностной зоне [Жамалетдинов, 1990].

На рис. 16а контуры аномалии поперечного сопротивления литосферы T сопоставлены с обобщенной геологической схемой района исследований [Глазнев, 2003]. Однако, и в этом случае не наблюдается никакого соответствия между положением T -аномалии и картой поверхностной геологии. С другой стороны, на рис. 16б можно видеть, что изолинии T хорошо согласуются с положением аномалии Мохо, установленной по сейсмическим данным в Центральной Финляндии [Павленкова, 2006]. Изолинии T огибают с северо-востока обширную область погружения границы Мохо до глубины 60 км. Отметим, что на большей части Балтийского щита мощность коры по сейсмическим данным не превышает 37–40 км.

Осредненные по всем описанным выше данным кривые кажущегося сопротивления для “нормального” и “аномального” разрезов литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского)

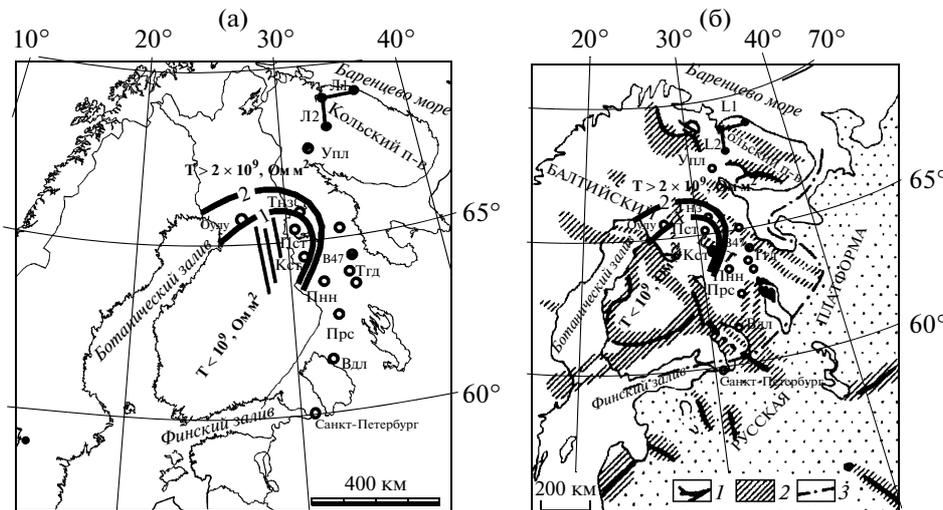


Рис. 15. Схема изолиний поперечного электрического сопротивления литосферы T в Ом м² (а) и ее сопоставление со схемой распространения “коровых” аномалий электропроводности (б) [Жамалетдинов, 1990; Korja et al., 2002]. Условные обозначения: 1 – оси аномалий электропроводности, $S \geq 1000$ см; 2 – области пониженного сопротивления коры, $S = 10–100$ см; 3 – граница между Балтийским щитом и Русской платформой.

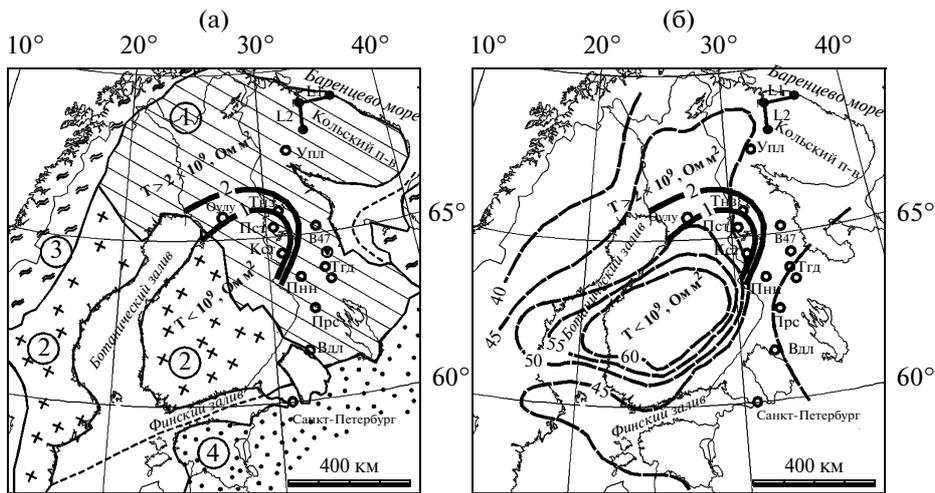


Рис. 16. Схема изолиний поперечного сопротивления литосферы T по данным эксперимента FENICS в сопоставлении с геологической схемой (а) [Пожиленко, 2002] и с картой изогипс границы Мохо по сейсмическим данным (б) [Павленкова, 2006]. Обозначения на геологической схеме (а): 1 – архейские комплексы; 2 – Свектофенский протерозойский комплекс; 3 – каледониты, 4 – осадочный чехол Русской платформы; (б) – изолинии глубин Мохо даны в километрах.

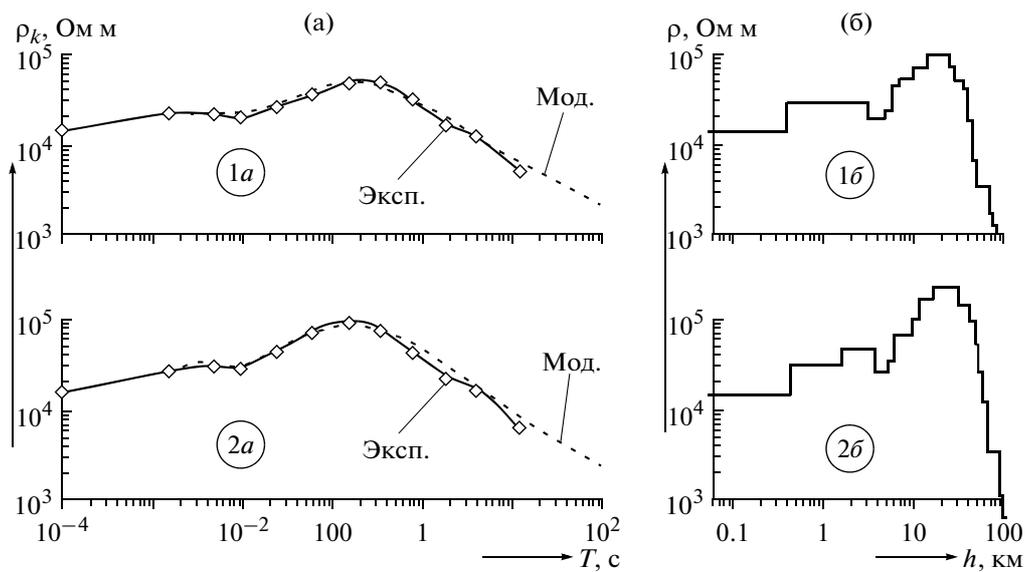


Рис. 17. Кривые кажущегося сопротивления (а) и разрезы (б) по результатам CSMT зондирования в северо-восточной части Балтийского щита для литосферы с “нормальным” ($T \geq 2 \times 10^9$ Ом м², рис. 1а и 1б) и “аномальным” ($T \leq 10^9$ Ом м², рис. 2а и 2б) типами разрезов, показанных изолиниями T на рис. 15 и 16. Обозначения на кривых – “Эксп.” – экспериментальные, “Мод.” – теоретические

щита приведены в левой части рис. 17. Они обозначены кривыми 1а и 2а, соответственно. В правой части рис. 17 приведены результаты решения обратной задачи для “нормального” и “аномального” разрезов (кривые 1б и 2б, соответственно). Максимальный перепад удельного сопротивления на разрезах 1б и 2б приходится на глубину 20 км – от 300–

400 тысяч Ом м для “нормальной” области до порядка 100 тысяч Ом м для “аномальной” области. В целом область понижения сопротивления литосферы в аномальной зоне соответствует диапазон у глубин от 10 до 40 км.

Природа понижения удельного сопротивления литосферы в аномальной области, по-видимому,

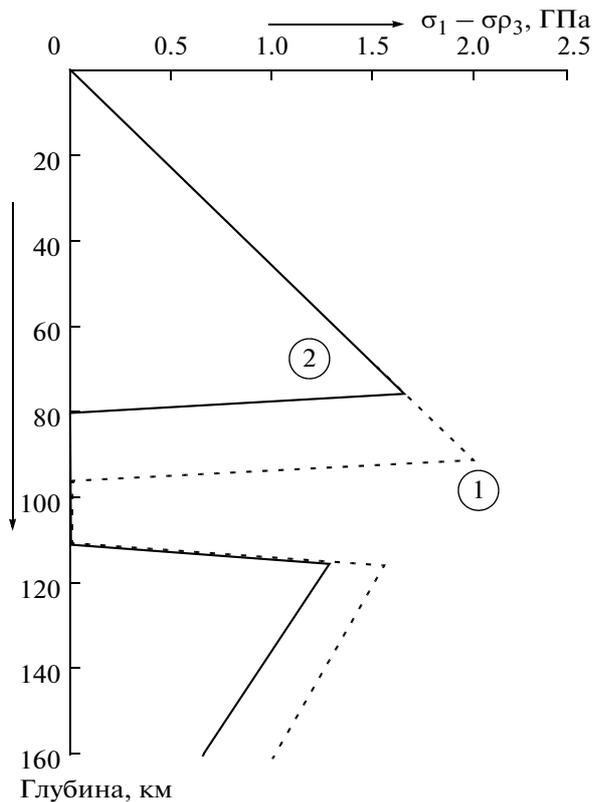


Рис.18. Реологические профили восточной части Балтийского щита по результатам интерпретации геоэлектрических данных эксперимента FENICS. Обозначения кривых: 1 – реологический профиль для “нормального” разреза (16 на рис. 17); 2 – то же для “аномального” разреза (26 на рис. 17). Положение областей развития “нормального” и “аномального” типов электрического разреза литосферы показано на рис. 15 и рис. 16 изолиниями поперечного сопротивления.

обусловлена примесной проводимостью, связываемой с дефектами кристаллической решетки, тогда как свободные флюиды, скорее всего, отсутствуют или играют незначительную роль в виду общего высокого сопротивления вещества – 100 тысяч Ом м и выше. Примесная проводимость имеет полупроводниковую природу. Электрический ток может переноситься как отрицательными зарядами – электронами, так и положительными “дырками” [Жарков, 1983]. На характер наблюдаемой аномалии существенное влияние оказывает также возрастающая с глубиной температура. Температурную зависимость удельного сопротивления полупроводников принято описывать экспоненциальным законом [Иоффе, 1974].

$$\rho = \sum_{i=1}^{i=n} \rho_0^i e^{E_0^i/k^0 T},$$

где ρ_0^i – предэкспоненциальный коэффициент, численно равный удельному сопротивлению i -го носителя электричества при $^0T \rightarrow \infty$ [Пархоменко, 1982]. E_0^i – энергия активации в электрон-вольтах, k – постоянная Больцмана (1.38×10^{-23} Дж/К), 0T – температура по шкале Кельвина.

Приведенные выше геоэлектрические разрезы на рис. 17 могут быть использованы для моделирования реологических характеристик литосферы. За основу при моделировании принимаются описанные выше приемы геотермической интерпретации данных глубинной геоэлектрики, а также результаты лабораторных исследований электропроводности образцов горных пород при высоких термодинамических параметрах [Пархоменко, Бондаренко, 1972]. Ниже приведен первый опыт таких расчетов, основанный на использовании кулоновского закона при относительно низких температурах $T < 0.5T_s$, где T_s – температура плавления. В этом случае $\sigma_1 - \sigma_3 \geq \beta(1 - \theta)P(z)$, где $\sigma_1 - \sigma_3$ – разность между максимальным и минимальным сжимающими напряжениями, $P(z)$ – литостатическое давление, β – коэффициент статического трения, θ – отношение порового давления к литостатическому. Для высоких температур $T > 0.5T_s$, в области пластической деформации использовалось уравнение установившейся ползучести (дислокационного крипа)

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{A}\right)^{1/n} \exp\left(\frac{E}{nRT(z)}\right),$$

$\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, R – газовая постоянная, E – энергия активации, $T(z)$ – температура от глубины z ; A и n – константы определенного типа геоматериала.

В нижней части геоэлектрического разреза на рис. 17 для оливинов при большом давлении (свыше 200 МПа) использовалось выражение для закона Дорна [Kaikkonen et al., 2000].

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_D \left(1 - \left(-\frac{RT}{E_D} \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{A_D}\right)\right)^{1/2}\right).$$

В расчетах использовано значение скорости деформации $\dot{\epsilon} = 3 \times 10^{-15} \text{ с}^{-1}$. Остальные расчетные параметры взяты из табл. 1 в работе [Kaikkonen et al., 2000].

Результаты моделирования реологических характеристик литосферы для измеренных кривых кажущегося сопротивления представлены на рис. 18. Расчеты выполнены для двух типов “нормального” разреза. Первый тип разреза, условно “холодный”, обладает поперечным сопротивлением $T = 10^{10} \text{ Ом м}^2$. Он зафиксирован по данным эксперимента FENICS в восточной части Карельского мегаблока и на Кольском полуострове (кривая 1 на рис. 17). Второй тип разреза, условно “прогретый”,

обладает пониженным поперечным сопротивлением $T = 10^9$ Ом м². Он зафиксирован по данным эксперимента FENICS в западной части Карельского мегаблока и в центральной Финляндии (кривая 2 на рис. 17).

Второй тип разреза характеризуется на 50 градусов более высокой температурой в низах коры и более высоким положением верхней границы крипа (80 км) в сравнении с первым (холодным) типом разреза, где эта граница находится на глубине 110 км. Область спада дифференциального напряжения ($\sigma_1 - \sigma_3$, ГПа) до нуля свидетельствует о пластичном состоянии вещества.

Представленные расчеты следует рассматривать как начальный этап последующих более обстоятельных исследований в области использования данных глубинной геоэлектрики для исследования термодинамического режима и реологических параметров литосферы. Приведенные выше варианты объяснения природы аномального снижения сопротивления в юго-западной части исследованной территории — только гипотеза, основанная на физических предпосылках. Уменьшение удельного сопротивления может быть связано также с изменением состава вещества литосферы в аномальном районе на более темноцветный или с геодинамическими явлениями. В любом случае решение проблемы комплексной интерпретации геоэлектрических и сейсмических данных требует проведения дополнительных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований.

ВЫВОДЫ

1. Создан и испытан уникальный в мировой практике генераторно-измерительный комплекс для глубинного зондирования литосферы с применением промышленных ЛЭП и генератора “Энергия-2” мощностью до 200 кВт в частотном диапазоне 0.1–200 Гц.

2. Выполнены эксперименты FENICS-2007 и FENICS-2009 по тензорному частотному зондированию литосферы восточной части Балтийского щита на удалениях до 700 км от источника в частотном диапазоне 0.1–200 Гц. Отдельные измерения электромагнитного поля, создаваемого генератором “Энергия-2” в промышленных ЛЭП, выполнены на удалениях до 2150 км от источника.

3. Установлена высокая степень горизонтальной однородности (стратификации) литосферы восточной части Балтийского щита в диапазоне глубин от 15–20 до 50–70 км.

4. Выявлена область аномального понижения поперечного сопротивления литосферы в северо-западной части Карельского мегаблока и в Финляндии, обрамляющая с северо-востока область погружения сейсмической границы Мохо на глубину до 60 км.

5. Исследованы свойства “нормального” глубинного геоэлектрического разреза литосферы северо-восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита. Выполнена оценка реологических параметров литосферы на основе полученных геоэлектрических разрезов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 06-07-64429-а и 07-08-00181-а), Отделения наук о Земле РАН, Проект № 6 “Геодинамика и механизмы деформации литосферы” и Академии Наук Финляндии (грант 107424). Участие в эксперименте Радиоастрономического института частично поддержано в рамках НИР Национальной академии наук Украины: “Ятаган”, “Шпицберген” и “Окружение”. Авторы выражают глубокую благодарность главному инженеру Колэнерго А.В. Маслову и начальнику КСР КП МЭС Северо-Запада И.Г. Решетняку за помощь в организации работ на промышленных ЛЭП а также д.т.н. В.Е. Корепанову за содействие а организации измерений сигналов на максимальном удалении 2150 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акиндинов В.В., Нарышкин В.И., Рязанцев А.М. Электромагнитные поля в морской воде (обзор) // Радиотехника и электроника. 1976. Т. XXI. Вып. 5. С. 913–944.
- Баранник М.Б., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов В.В., Прокопчук П.И., Селиванов В.Н., Шевцов А.Н., Копытенко Ю.А., Жамалетдинов А.А. Высоковольтный силовой инвертор генератора “Энергия-2” для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 2. С. 5–23.
- Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра. 1968. 255 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально однородных сред. М.: Недра. 1991. 201 с.
- Бернстайн С.Л., Барроуз М., Эванс Д.Э., Гриффитс Э.С., Макнейл Д.А., Ниссен Ч.У., Ричер А., Уайт Д.П., Уиллим Д.К. Дальняя связь на крайне низких частотах // ТИИЭР, Proceedings IEEE. 1974. Т. 62. С. 5–30.
- Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра. 1965. 108 с.
- Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., Васин Н.Д., Окулеский Б.А., Шиловский П.П. О нормальном геоэлектрическом разрезе // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1980. № 2. С. 73–76.
- Вареницов И.М., Энгельс М., Корья Т., Смирнов М.Ю. и рабочая группа BEAR. Генерализованная модель электропроводности Фенноскандии: база данных для 3D моделирования данных эксперимента BEAR // Физика Земли. 2002. № 10. С. 64–105.
- Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А., Вешев А.В., Сараев А.К., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Васильев А.В., Сонников А.Г., Яковлев А.В. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с

- применением мощной антенны СНЧ-диапазона // Докл. РАН СССР. 1994. Т. 338. № 1. С. 106–109.
- Вешев А.В.* Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра. 1980. 391 с.
- Глазнев В.Н.* Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: “КаэМ”. 2003. 252 с.
- Дрейзин Ю.А., Шамраев И.М.* К теории электромагнитной разведки с мощными источниками // Докл. РАН СССР. 1986. Т. 288. № 4. С. 837–841.
- Жамалетдинов А.А.* Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л.: Наука. 1990. 159 с.
- Жамалетдинов А.А., Ковалевский В.Я., Павловский В.И., Таначев Г.С., Токарев А.Д.* Глубинное электроразведывание с ЛЭП постоянного тока 800 кВ “Волгоград-Донбасс” // Докл. РАН СССР. Т. 265. № 5. 1982. С. 1101–1105.
- Жамалетдинов А.А., Короткова Т.Г., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Невретдинов Ю.М., Зархи И.М., Копытенко Ю.А., Копытенко Е.А., Гохберг М.Б., Песин Л.Б., Шеринев Ю.А.* Сверхглубинное зондирование литосферы Балтийского щита с применением промышленных ЛЭП // Докл. РАН. 2005. Т. 405. № 5. С. 666–669.
- Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Токарев А.Д., Кононов Ю.М., Ваньян Л.Л.* Влияние ионосферы и токов смещения на результаты глубинных электромагнитных зондирований в поле СНЧ-антенны // Докл. РАН. 1999. Т. 366. № 5. С. 688–691.
- Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Короткова Т.Г., Ефимов Б.В., Баранник М.Б., Колобов В.В., Прокончук П.И., Копытенко Ю.А., Исмаилов В.С., Песин Л.Б.* Глубинные зондирования с промышленными ЛЭП в комплексе с МТЗ // Физика Земли. 2007. № 3. С. 74–80.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение земли и планет. М.: Наука. 1978. 191 с.
- Жданов М.С.* Электроразведка. М.: Недра. 1986. 316 с.
- Заборовский А.И.* Электроразведка. М.: ГНТИНГТПЛ. 1963. 423 с.
- Иоффе А.Ф.* Механические и электрические свойства кристаллов. Избранные труды. Т. 1. Л.: Наука. 1974. 326 с.
- Ковтун А.А., Моисеев О.Н., Вагин С.А., Варданянц И.Л., Коквина Е.Л., Савельев А.А., Успенский Н.И.* МТ- и АМТ-зондирования на Кольском полуострове и в Карелии. Глубинная электропроводность Балтийского щита / Под ред. Ваньяна Л.Л., Хьелта С.Э. Петрозаводск: изд-во Карельск. фил. АН СССР. 1986. С. 34–48.
- Кононов Ю.М., Жамалетдинов А.А.* Системы СНЧ-радиосвязи и мониторинг среды – перспективное направление конверсионной политики России. М.: Информмост “Радиоэлектроника и телекоммуникации”. 2002. С. 4–6.
- Краев А.П., Семенов А.С., Тархов А.Г.* Сверхглубокое электроразведывание // Разведка недр. 1947. № 3. С. 40–41.
- Павленкова Н.И.* Структура литосферы Балтийского щита по данным ГСЗ. Структура и динамика литосферы Восточной Европы. М.: Геокарт, ГЕОС. 2006. С. 33–58.
- Пазнухов В.Е., Буданов О.В., Рохман А.Г., Аристов Ю.В.* Приемно-измерительный комплекс СНЧ диапазона с УКВ ретранслятором // Радиофизика и радиоастрономия. 2010. Т. 15. № 1. С. 39–49.
- Пархоменко Э.И., Бондаренко А.Т.* Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах. Л. 1972. 279 с.
- Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В.* Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты: МПР РФ. 2002. 359 с.
- Рокитянский И.И., Зыбкин К.Ю., Рокитянская Д.А., Щепетнев Р.В.* Магнитотеллурическое исследование массива на геофизических станциях Борок, Ловозеро и Петропавловск-Камчатский. Электромагнитные зондирования и магнитотеллурические методы разведки / Под ред. Брюнелли Б.Е. Л.: ЛГУ. 1963. С. 124–130.
- Сапужак Я.С., Эненштейн Б.С.* Использование электрических токов линий электропередач для электромагнитных зондирований Земли // Докл. РАН. 1980. Т. 252. № 4. С. 838–841.
- Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Баранник М.Б., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов В.В., Прокончук 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.
- Тихонов А.Н., Эненштейн Б.С., Скугаревская О.А.* Изучение внутреннего строения кристаллического фундамента электромагнитным зондированием // Докл. РАН СССР. 1967. Т. 173. № 5. С. 1062–1064.
- Шевцов А.Н.* Метод частотного зондирования при изучении электропроводности верхней части земной коры Балтийского щита. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. СПб.: Изд. СПбГУ. 2001. 21 с.
- Шевцов А.Н.* Прямая и обратная задачи частотного электромагнитного зондирования с промышленными линиями электропередачи. Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах. Апатиты: изд-во КНЦ РАН. 2006. С. 171–181.
- Blohm E.K., Worzyk P., Scriba H.* Geoelectrical deep soundings in Southern Africa using the Cabora Bassa power line // Journal of Geophysics. 1977. V. 43. P. 665–679.
- Boerner D.E.* Controlled source electromagnetic deep sounding: theory, results and correlation with natural source results. Invited Review Paper for the 10th Workshop on EM Induction. Ensenada: Mexico. 1991. P. 3–50.
- Cantwell T., Nelson P., Webb J., Orange A.S.* Deep resistivity measurements in the Pacific north-west // Journal of Geophysical Research. 1965. V. 70. № 8. P. 1931–1937.
- Chave A.D.* Numerical integration of related Hankel transforms by quadrature and continued fraction expansion // J. Geophysics. 1983. № 48. P. 1671–1686.
- Chave A.D.* The Fresnel derivatives of electromagnetic induction / J. Geophys. Res. 1984. № 89. P. 3373–3380.
- Fainberg E.B., Kuvshinov A.V., Singer B.Sh.* Electromagnetic induction in a spherical earth with nonuniform ocean and continents in electric contact with the under lying medium-I. Theory, method and example // Geophys. J. Int. 1990. V. 102. P. 273–281.
- Fainberg E.B., Kuvshinov A.V., Singer B.Sh.* Electromagnetic induction in a spherical earth with nonuniform ocean and continents in electric contact with the under lying medium-II. Bimodal global geomagnetic sounding of the lithosphere // Geophys. 1990. J. Int. V. 102. P. 283–286.

- Kaikkonen P., Moisio K., Heeremans M.* Thermomechanical lithospheric structure of the central Fennoscandian Shield // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2000. № 119. P. 209–235.
- Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A., Palshin N.A., Smirnov M.Yu., Tokarev A.D., Asming V.E., Vanyan L.L., Vardaniants I.L.* and the BEAR WG. Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductivity in Fennoscandian shield // *Earth, Planets, Space*. 2002. № 54. P. 535–558.
- Maeda K., Matsumoto H.* Conductivity of the ionosphere and current system // *Rept Ionosph. Space Res. Jap.* 1962. № 16. P. 1–26.
- Porokhova L.N., Kharlamov M.M.* The solution of the one-dimensional inverse problem for induction soundings by an efficient linearization technique // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1990. V. 60. P. 68–79.
- Spice B.R.* Depth of investigation in electromagnetic sounding methods // *Geophysics*. 1989. V. 54. № 7. P. 872–888.
- Van Zijl J.S.V.* A deep Slumberger sounding to investigate the electrical structure of the of the crust and upper mantle in South Africa // *Geophysics*. 1969. V. 34. № 3. P. 450–462.
- Zonge K.L., Hughes L.J.* Controlled Source Audio-Frequency Magnetotellurics. *Electromagnetic methods in Applied Geophysics – Theory and Practice*. Soc. Expl. Geophys / Eds. Nabighian M.N. 1991. V. 2B. P. 713–809.