DOI: *10.18454/PMI.2017.2.178*

УДК 550.837

ЧАСТОТНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ С ПРОМЫШЛЕННЫМИ ЛЭП НА КАРЕЛО-КОЛЬСКОМ ГЕОТРАВЕРСЕ

А.Н.ШЕВЦОВ[1], А.А.ЖАМАЛЕТДИНОВ[1], В.В.КОЛОБОВ[2], М.Б.БАРАННИК[2]
[1] *Геологический институт Кольского научного центра РАН, г.Апатиты, Россия*
[2] *Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН, г.Апатиты, Россия*

Описаны теория, методика и первые результаты экспериментальных исследований взаимодействия электромагнитных волн крайне низкочастотного и сверхнизкочастотного диапазона (0,1-200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле двух взаимно ортогональных промышленных линий электропередачи длиной 109 и 120 км в ходе эксперимента FENICS (Fennoscandian Electrical conductivity from Natural and Induction Control Source soundings). Основное внимание уделено результатам наблюдений по линии Карело-Кольского геотраверса на удалениях до 700 км от источника. Установлена высокая горизонтальная однородность геоэлектрического разреза литосферы восточной части Балтийского щита в диапазоне глубин от 10-15 до 50-70 км. Уточнены параметры «нормального» разреза литосферы до глубины 60-70 км. По результатам решения обратной задачи на западе Карелии и в Центральной Финляндии обнаружена область пониженных значений поперечного сопротивления на глубинах 50-60 км, совпадающая с установленной по сейсмическим данным областью погружения границы Мохо до этих же глубин.

***Ключевые слова*:** электромагнетизм, глубинное зондирование, контролируемые источники, промышленные линии электропередачи, удельное электрическое сопротивление, интерпретация

***Как цитировать эту статью*:** Частотное электромагнитное зондирование с промышленными ЛЭП на Карело-Кольском геотраверсе / А.Н.Шевцов, А.А.Жамалетдинов, В.В.Колобов, М.Б.Баранник // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 178-188. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.178

Введение. Отсутствие проводящего осадочного чехла создает благоприятные условия для глубинного электромагнитного зондирования литосферы на территории Фенноскандинавского щита. Первые глубинные зондирования проводились с применением контролируемых источников [8]. Начиная с середины 60-х годов прошлого века преимущественное применение при глубинных зондированиях Фенноскандинавского щита получил магнитотеллурический (МТ) метод, благодаря его большей глубинности и более низкой стоимости работ по сравнению с другими методами. В начале 70-х годов прошлого столетия возобновился интерес к технике электромагнитных исследований с контролируемыми источниками в связи с проведением широкомасштабного эксперимента «Хибины» по глубинному зондированию с использованием магнитогидродинамического генератора мощностью 80 МВт [6, 16]. Позднее, в начале 1990-х годов, был выполнен ряд экспериментов по глубинному зондированию с использованием сверхнизкочастотной антенны «Зевс» мощностью порядка 2 МВт [9]. Приведенные работы позволили получить новые данные о глубинном электрическом разрезе земной коры и о строении коровых аномалий электропроводности. Недостатком этих, как и всех предшествующих (выполненных в мире) экспериментов по глубинному зондированию с мощными контролируемыми источниками, явилось использование только одной поляризации первичного поля.

Данная работа является первой попыткой заполнить этот пробел путем проведения глубинного зондирования применением двух взаимно ортогональных линий электропередачи длиной 109 и 120 км, служащих в качестве антенн разной поляризации. Наблюдения выполнены на удалениях до 856 км от источника. Результаты наблюдений дали возможность осуществить глубинное зондирование в условиях волновой зоны в широком диапазоне низких частот (0,1-200 Гц) и достигнуть больших глубин зондирования (50-70 км) в условиях плохо проводящего кристаллического фундамента. Эксперимент получил кодовое название FENICS (Fennoscandian Electrical conductivity from Natural and Induction Control Source soundings). Первые зондирования серии FENICS были выполнены в 2007 и 2009 годах [5, 6]. В данной статье приведено описание теоретических основ, методики и результатов интерпретации на основе предшествующих материалов в комплексе с новыми результатами эксперимента FENICS, полученными в 2014 г.

Методика исследований. Принципиальная схема эксперимента FENICS показана на рис.1. Передающий генератор «Энергия-2» мощностью 200 кВт [2, 3] поочередно подключается к двум взаимно ортогональным промышленным линиям электропередачи и создает в них переменный ток в частотном диапазоне 0,1-200 Гц. Такая установка позволяет «просвечивать» глубинную структуру литосферы при двух взаимно ортогональных поляризациях первичного поля. Экспе-

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.178

римент FENICS-2014 проводился в два этапа. На первом этапе (с 23 по 30 августа 2014 г.) ток подавался в широтную линию L1; на втором этапе (с 1 по 8 сентября 2014 г.) – в меридиональную линию L2. На обоих этапах эксперимента работа осуществлялась в ночное время, с 01:00 до 05:00 часов московского времени. На большинстве точек зондирования FENICS исследованы электрические свойства верхней части разреза путем проведения зондирований на постоянном токе с разносами от 2 до 15 км.

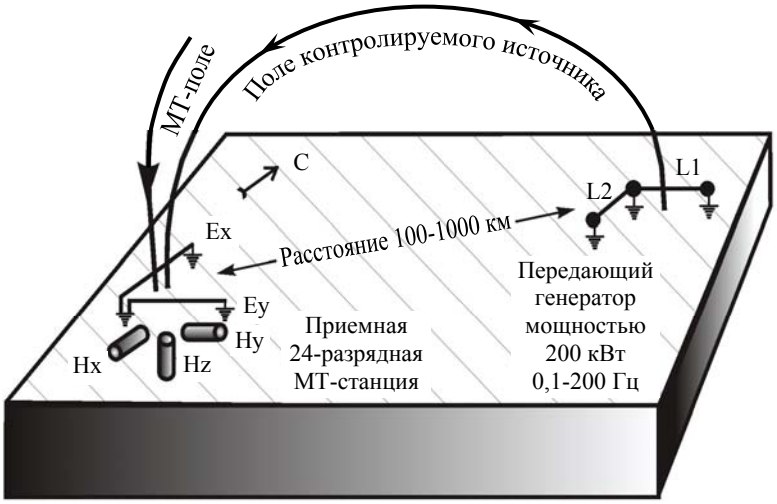


Рис.1. Схема частотного электромагнитного зондирования с использованием двух взаимно ортогональных источников

Блок-схема подключения крайне-сверхнизкочастотного (КНЧ-СНЧ) генератора «Энергия-2», использовавшегося в эксперименте FENICS, представлена на рис.2. Генератор «Энергия-2» с максимальной выходной мощностью 200 кВт специально разработан для эксперимента FENICS [7]. Питание генератора осуществляется от трехфазного трансформатора собственных нужд подстанции 1 с выходным напряжением 380 В и мощностью более 200 кВт. Входное переменное напряжение повышается и выпрямляется силовым преобразователем (СП) 2. Напряжение на выходе СП составляет 1100 В. Высоковольтный инвертор (ВИ) 3 формирует синусоидальный ток необходимой частоты и амплитуды в нагрузке (антенне) методом широтно-импульсной модуляции. В зависимости от решаемых задач форма тока может быть синусоидальной, треугольной или меандром. Максимальная амплитуда напряжения на выходе ВИ достигает 1100 В. Фильтр низких частот (ФНЧ) 4 подавляет высокочастотные помехи, возникающие при широтно-импульсной модуляции. Согласующее устройство (СУ) 6 используется для компенсации индуктивности линии электропередачи на частотах более 5 Гц путем подключения продольных емкостей. Схема защиты от перенапряжений (СЗП) 7 защищает выход высоковольтного инвертора от внешних перенапряжений (например, от молниевых разрядов).

Первая выходная клемма генератора (*A* на рис.2) подключена к заземлению основной подстанции, где размещается генератор «Энергия-2». Вторая клемма подключена к трем параллельно соединенным фазным проводам воздушной линии электропередачи. Ток проходит по линии электропередач и возвращается через заземление удаленной подстанции (*B* на рис.2) и через землю. Длина передающих антенн – линий электропередач – составляет 109 км для линии L1 и 120 км для линии L2.

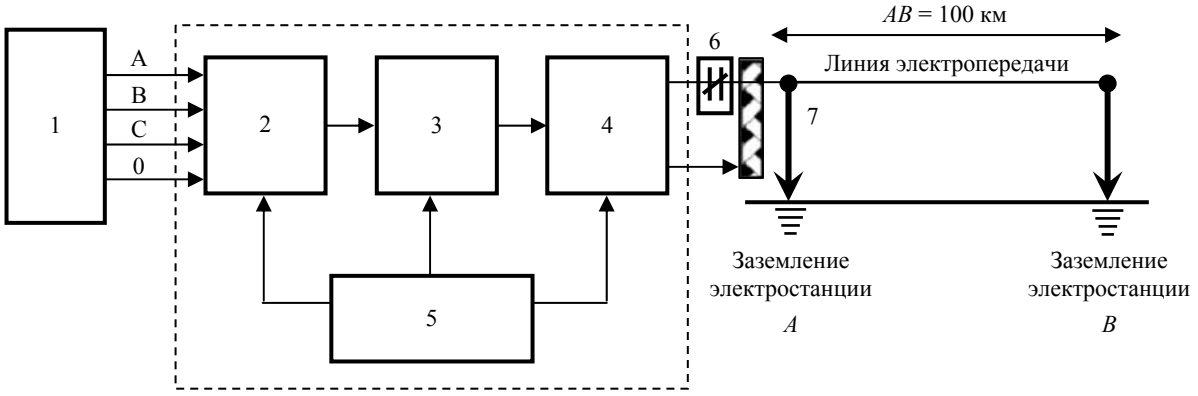


Рис.2. Схематическая диаграмма подключения генератора «Энергия-2» к промышленной линии электропередачи *AB*

1 – трехфазный трансформатор собственных нужд подстанции 380 В; 2 – силовой преобразователь AC-DC; 3 – высоковольтный инвертор; 4 – фильтр низких частот; 5 – система управления, регулирования, защиты и автоматики; 6 – согласующее устройство; 7 – система защиты от перенапряжений

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.178

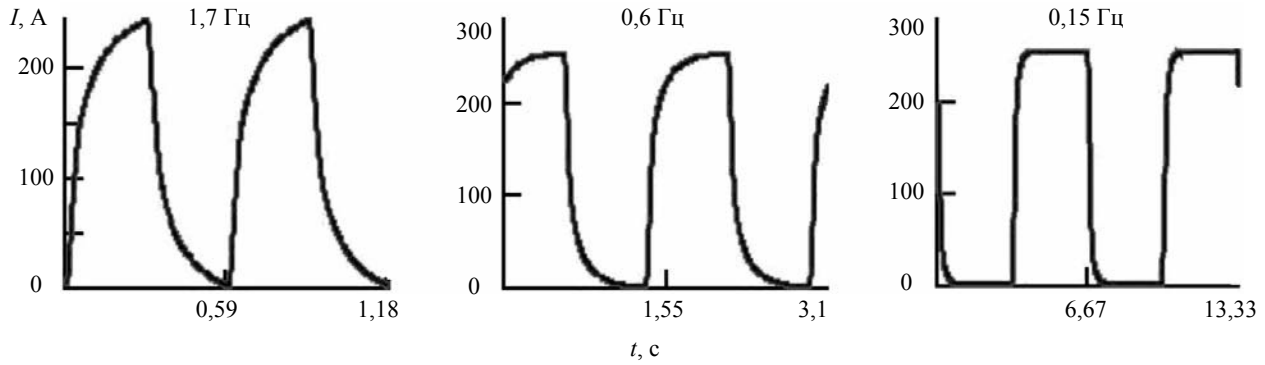


Рис.3. Форма сигналов на низких частотах на примере записи тока в линии L1

При проведении частотных зондирований с длинными заземленными электрическими линиями необходимо учитывать такие показатели, как индуктивное сопротивление проводов («внутреннее» индуктивное сопротивление), реальную конфигурацию токонесущего провода, который не всегда прямолинеен, изменение силы тока (амплитуды) вдоль провода ЛЭП в зависимости от частоты, а также сопротивление возвратного тока, текущего в нижнем полупространстве («внешнее» индуктивное сопротивление).

Ток первой гармоники в широтной линии L1 (см. рис.1) изменялся в интервале 170-235 А на низких частотах (0,1-10 Гц) и в интервале 25-60 А на высоких частотах (100-200 Гц). Вторая линия электропередачи L2 (Кола – Мончегорск) имеет меридиональное направление (север-юг) и длину 120 км. Общее сопротивление постоянному току линии электропередачи L2 составляет 6 Ом, что более чем вдвое превышает сопротивление линии L1 (2,5 Ом). В результате ток в линии L2 имеет другой вид: он изменяется от 100-120 А на низких частотах (0,1-10 Гц) до 40-80 А на высоких частотах (100-200 Гц). На частотах, превышающих 5-10 Гц, индуктивное сопротивление обеих линий электропередачи компенсировалось с помощью емкостного согласующего устройства (рис.2, поз.6). Ток в передающих антеннах записывался на персональный компьютер через аналого-цифровой преобразователь E140 с частотой дискретизации 5 кГц. Форма тока в передающих линиях изменялась от синусоидальной на высоких частотах до треугольной, трапециевидной и меандра на низких частотах (рис.3). Стабильность частоты поддерживалась не хуже 10^{-7} Гц. Ток в передающих антеннах и сигналы в приемных станциях были синхронизированы с помощью глобальной системы спутникового позиционирования GPS с точностью не менее 1 мс.

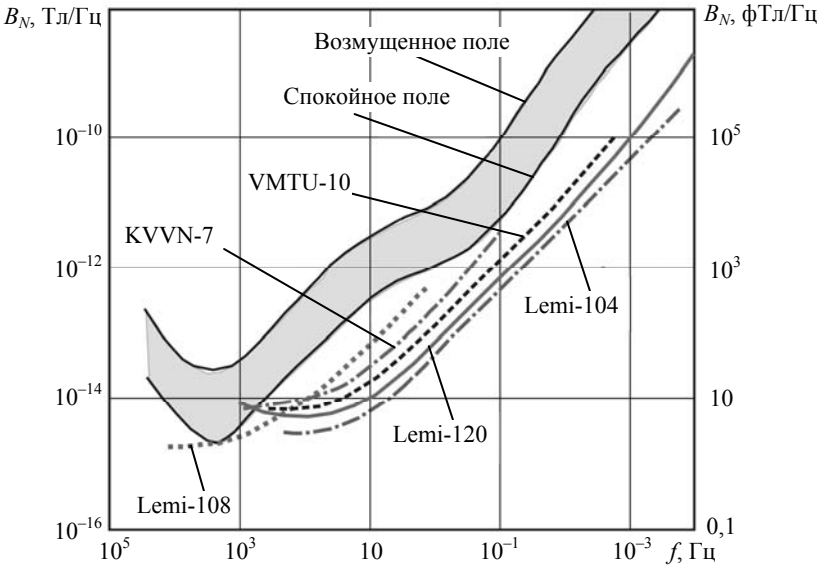


Рис.4. Спектральная плотность амплитуды собственных шумов B_N в зависимости от частоты f для индукционных датчиков, использованных в эксперименте FENICS (VMTU-10 и KVVN-7) в сопоставлении с датчиками серии Lemi

Приемные станции. Записи сигналов проводились с использованием широкополосных пятикомпонентных 24-разрядных магнитотеллурических и аудимагнитотеллурических (МТ-АМТ) цифровых станций. Гармонические сигналы контролируемого источника отфильтровывались от МТ-АМТ-вариаций с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ-процедура).

Основным показателем качества МТ-станций является уровень собственных шумов магнитных датчиков. На рис.4 приведена

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.178

сводная диаграмма спектральных характеристик собственных шумов магнитных датчиков станций, использованных в эксперименте FENICS (VMTU-10 и KVVN-7), в сопоставлении с широко известными датчиками серии Lemi (г. Львов, Украина). Серой полосой показана частотная характеристика шумов, создаваемых естественными вариациями МТ-АМТ-поля.

Качество индукционных датчиков определяется, прежде всего, положением частотной характеристики его собственных шумов по отношению к частотной характеристике среднего распределения природных шумов (серая полоса на рис.4). Если собственные шумы датчика ниже естественного шума, то это свидетельствует о высоком качестве датчиков. Такой датчик может надежно регистрировать амплитуду и фазу вариаций естественного поля и одновременно решать задачу электромагнитного зондирования в поле контролируемых источников. В настоящее время наблюдается тенденция сближения и перекрытия глубинности исследований в технике зондирований с естественными и контролируемыми источниками. Это происходит благодаря использованию прецизионных индукционных датчиков в широком диапазоне частот от (10^{-3} до 10^{3} Гц) и возможностей аналого-цифрового преобразования записей в широком динамическом диапазоне (24 разряда и более). Эта тенденция открывает новые перспективы для совместного проведения зондирований с естественными и контролируемыми источниками. Эксперимент FENICS является попыткой движения в этом направлении. Из рис.4 видно, что измерительные станции, использованные в эксперименте FENICS (VMTU-10 и KVVN-7), имеют спектральные характеристики, близкие к лучшим аналогам серии Lemi, которые представляют высокий стандарт в технике современных МТ-АМТ-исследований [18].

Обработка данных. Обработка первичных данных выполнена путем расчета отношений спектральных плотностей авто- и кросс-корреляционных функций стационарных случайных процессов с использованием теоремы Винера – Хинчина [17], которая устанавливает связи автокорреляционной функции $R_{xx}(\tau)$ случайного процесса x в зависимости от временного сдвига τ и взаимнокорреляционной функции $R_{xy}(\tau)$ двух случайных процессов – x и y с соответствующими спектральными плотностями $S_{xx}(\omega)$, $S_{xy}(\omega)$ в зависимости от циклической частоты ω посредством прямого и обратного Фурье-преобразования:

$$S_{xx}(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}R_{xx}(\tau)\exp(-i\omega\tau)d\tau;$$

$$S_{xy}(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}R_{xy}(\tau)\exp(-i\omega\tau)d\tau,$$

где $R_{xx}(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}S_{xx}(\omega)\exp(i\omega\tau)d\omega$; $R_{xy}(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}S_{xy}(\omega)\exp(i\omega\tau)d\omega$.

Для определения амплитудных значений компонент измеренного поля использовались максимальные значения автокорреляционной функции данной компоненты поля на частоте работы генератора тока в источнике. По значениям фазы спектральной плотности взаимнокорреляционной функции соответствующих компонент поля определялся фазовый сдвиг между этими компонентами. При этом учитывались амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики датчиков, азимуты магнитного склонения, длина измерительных линий и т.д. Измеренное поле преобразовывалось в декартову систему координат – ось X направлена с юга на север, ось Y – с запада на восток и ось Z – сверху вниз. Далее выполнялся спектральный анализ и оценивалась автокорреляционная спектральная плотность мощности для каждой компоненты поля и кросс-корреляционные спектральные плотности мощности для сопряженных и антисопряженных пар измеренных компонент поля. При спектральном анализе использовался метод Уэлча со скользящим окном Блэкмана – Харриса на основе БПФ [19]. Перекрытие изменялось от 20 до 50 % в зависимости от ширины окна и длины временных рядов.

Была выполнена спектральная обработка электрических *Ex*, *Ey* и магнитных *Hx*, *Hy* компонент поля на расстоянии 752 км от питающей линии L1. Результаты обработки представлены в виде диаграммы спектра плотности мощности сигналов контролируемых источников по регист-

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.178

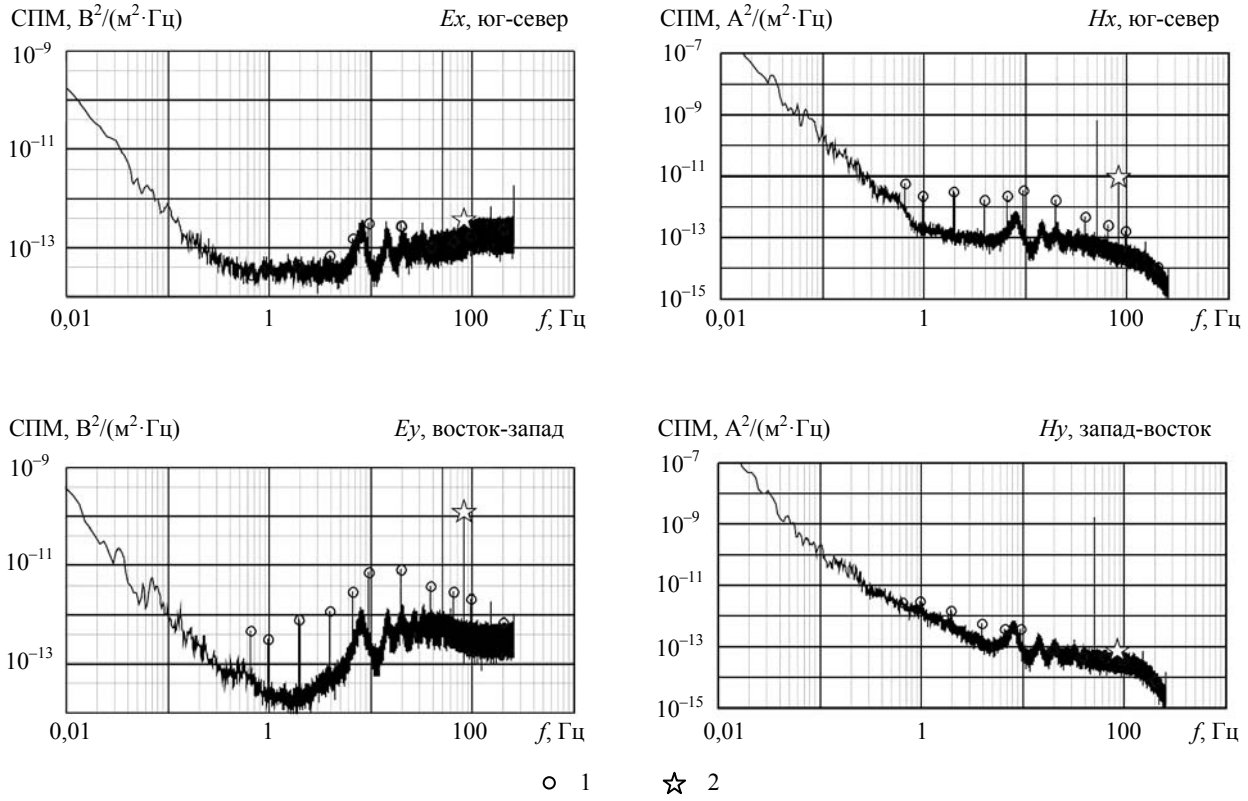


Рис.5. Диаграммы спектральной плотности мощности (СПМ) сигналов по данным эксперимента FENICS-2014, точка 7v, r = 752 м

1 – сигналы от ЛЭП L-1; 2 – сигналы от СНЧ-антенны «Зевс»

рируемым компонентам электромагнитного поля (рис.5). Сигналы хорошо видны только на главных, сопряженных компонентах поля – широтная компонента электрического поля *Ey* (параллельная L1) и меридиональная магнитная компонента *Hx* (ортогональная L1).

Анализ СПМ-диаграмм (рис.5) дает общее представление о типе глубинного геоэлектрического разреза. Явное увеличение интенсивности электрических и магнитных компонент поля в среднем диапазоне частот 2-20 Гц при постоянном значении амплитуды тока (порядка 100 А) указывает на то, что сопротивление средней части литосферы с глубиной возрастает, а затем уменьшается, т.е. разрез принадлежит к типу «К». На всех графиках отчетливо выделяется первая гармоника резонанса Шумана (7,5 Гц) и более высокие гармоники, вплоть до 4-й. На частоте 82 Гц на сопряженных компонентах *Hx* и *Ey* (отмечены звездочками на рис.5) наблюдаются максимумы СПМ, создаваемые полем СНЧ-антенны «Зевс» [9], расположенной в окрестности питающей линии L1 и имеющей также субширотное направление. На частоте 50 Гц (и на нечетных гармониках) по всем четырем компонентам поля наблюдаются резкие максимумы, создаваемые промышленным шумом.

На следующем этапе обработки рассчитывалось кажущееся удельное электрическое сопротивление по отдельным компонентам поля

$$\rho_{Ex,y} = k_{Ex,y}\left(\frac{Ex,y}{I}\right);\ \rho_{Hx,y} = \omega\mu_0\left[k_{Hx,y}\left(\frac{Hx,y}{I}\right)\right]^2;\ \rho_{Hz} = \omega\mu_0 k_{Hz}\frac{Hz}{I},$$

где $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м – электродинамическая постоянная; $k_{Ex,y}$, $k_{Hx,y}$, k_{Hz} – геометрические коэффициенты для электрических и магнитных компонент поля.

Значения геометрических коэффициентов принимались для дипольного приближения равными обратной величине соответствующих компонент нормального поля источника в квазистационарном приближении над однородным полупространством с удельным сопротивлением, равным единице при силе тока 1 А [1]:

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.178

$$\left.\begin{aligned} k_{Ex} &= \frac{2\pi r^3}{AB(3\cos^2\theta - 2)};\ k_{Ey} = \frac{2\pi r^3}{3AB\sin\theta\cos\theta};\\ k_{Hx} &= \frac{2\pi r^3}{3AB\sin\theta\cos\theta};\quad k_{Hy} = \frac{2\pi r^3}{AB(1-3\sin^2\theta)};\\ k_{Hz} &= \frac{2\pi r^4}{3AB\sin\theta}, \end{aligned}\right\}$$

где r – расстояние между серединой питающей линии и точкой измерений поля м; AB – длина питающей линии м; θ – угол между осью питающего диполя и направлением на точку измерений из середины питающей линии.

Кроме того, рассчитывалось кажущееся удельное сопротивление ρ_{Zxy} и ρ_{Zyx} по компонентам входного импеданса Zxy и Zyx, где $Zxy = Ex/Hy$; $Zyx = -Ey/Hx$; $\rho_{Zxy} = (\omega\mu_o)^{-1}|Zxy|^2$; $\rho_{Zyx} = (\omega\mu_o)^{-1}|Zyx|^2$.

Геолого-геофизическая интерпретация. Профиль наблюдений на Карельском геотраверсе 1а-6а (рис.6, *в*) пересекает центральную часть Карельского мегаблока, наименее нарушенную горизонтальными неоднородностями и наименее подверженную воздействию промышленных шумов. Кривые кажущегося сопротивления по профилю представлены на рис.6, *а*, *б*. Точки наблюдения располагаются со средним шагом по профилю 100 км.

Основная информация о глубинном разрезе получена по результатам зондирований в низкочастотном диапазоне 0,1-200 Гц. Наряду с этим использовались высокочастотные данные, полученные путем пересчета в частотную область результатов зондирований на постоянном токе.

Анализ кривых кажущегося сопротивления на рис.6, *а* 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 около 100 Гц, связываемое с неоднородной промежуточной проводящей областью, предположительно дилатантно-диффузионной (ДД) природы. При формальной одномерной интерпретации данная область проявляется в виде проводящих слоев (рис.7) в диапазоне глубин от 2-3 до 5-10 км, эта область была названа нами «слоем ДД» [12]. На всех кривых глубинного зондирования наблюдается широкий максимум в районе 5-10 Гц с значениями кажущегося сопротивления в интервале от 30 до 100 тысяч ом-метров.

Обратная задача решалась на основе кривых кажущегося сопротивления, рассчитанных по входному импедансу, для функции отклика *Zyx* [14]. Одномерные разрезы, полученные в результате инверсии, приведены на рис.7, *а*.

Бимодальная инверсия с использованием обеих поляризаций (от линий L1 и L2) выполнена в трех точках (2а, 4а, 5а), где были измерены сигналы от обеих линий электропередачи. Согласие результатов инверсии для двух взаимно ортогональных поляризаций первичного поля является аргументом в пользу однородной (одномерной) модели глубинной электропроводности литосферы восточной части Балтийского щита и, следовательно, обоснованием для использования «нормального» (стандартного) глубинного геоэлектрического разреза, относительно которого можно оценивать параметры электропроводности аномальных блоков земной коры.

Отношение значений кажущегося удельного сопротивления, измеренного на максимумах экваториальных и осевых кривых частотного зондирования (в пределах квазистационарной волновой зоны), не превышает 20 % почти во всех точках наблюдения. Это позволяет сделать вывод, что в интервале глубин от 10-15 до 50-70 км земная кора (литосфера) изотропна. Коэффициент анизотропии не превышает 1,2.

На фоне в среднем однородного геоэлектрического разреза литосферы Балтийского щита в северо-западной части Карельского мегаблока и в Центральной Финляндии выделяется область пониженных значений кажущегося сопротивления (рис.8, *б*). Эта область охватывает площадь порядка 80 тыс. км^2. Интегральным параметром электропроводности литосферы является поперечное сопротивление *T*.

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.178

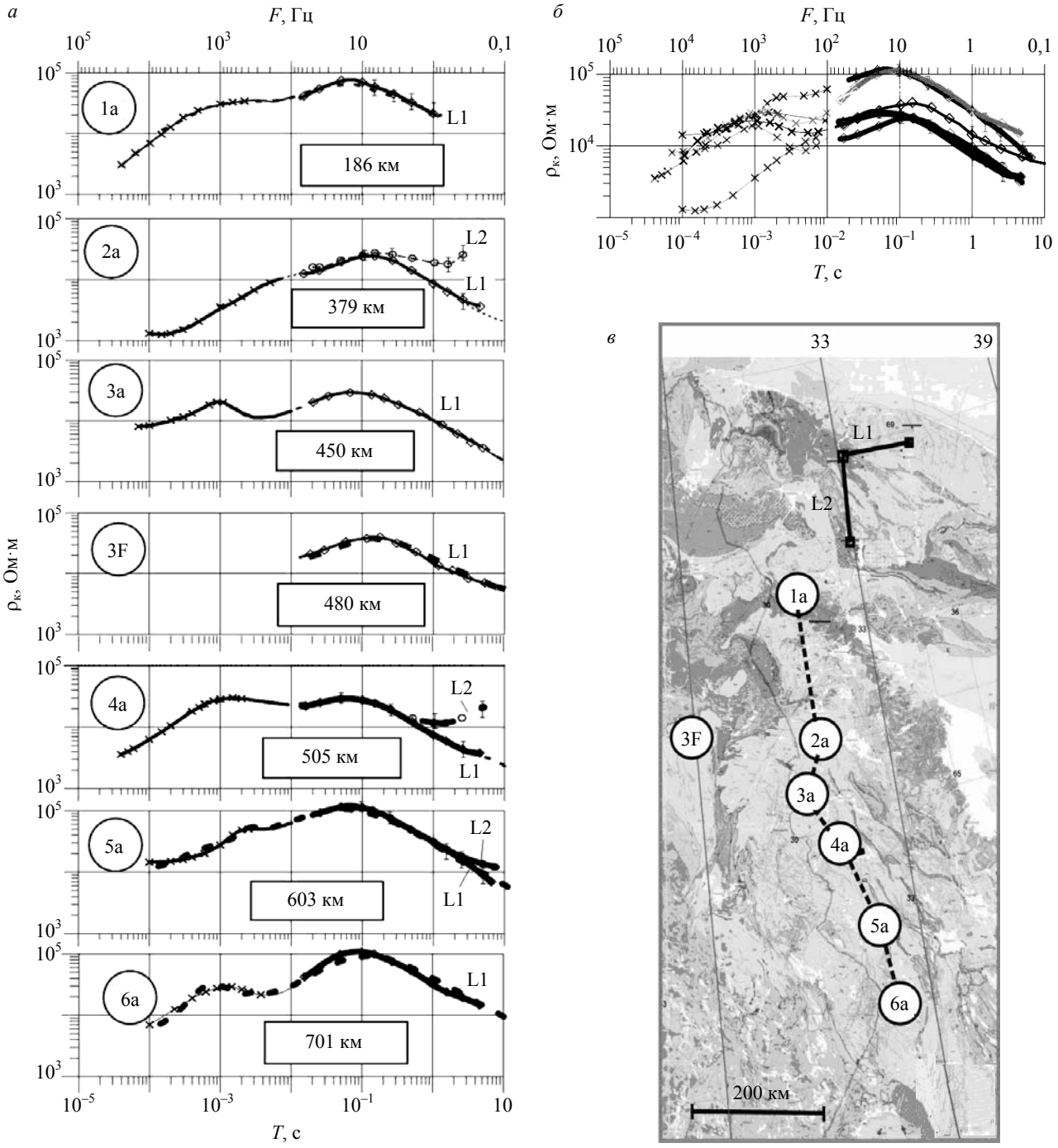


Рис.6. Результаты частотного зондирования с параллельной (экваториальной) установкой в поле широтной линии L1: *а* – кривые кажущегося сопротивления в точках 1а-6а и 3F; *б* – сводная диаграмма кривых кажущегося сопротивления; *в* – положение линии L1 и профиля 1а-6а

Значение T после процедуры инверсии определяется выражением

$$T = \sum_{i=1}^{i=n} h_i \cdot \rho_i \ ,$$

где h_i – толщина и ρ_i – удельное электрическое сопротивление в i-м слое литосферы.

Фоновое, «нормальное» значение поперечного сопротивления литосферы порядка $5 \cdot 10^9$ Ом·м^2. В пределах обнаруженной аномалии эта величина уменьшается до 10^9 Ом·м^2 и ниже. Контуры аномалии показаны изолиниями T (жирные сплошные линии $1 \cdot 10^9$ и $2 \cdot 10^9$ Ом·м^2) и косой штриховкой на рис.8, *а*. Аномалия подтверждена также тремя точками 1F-3F, измеренными на территории Финляндии.

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.178

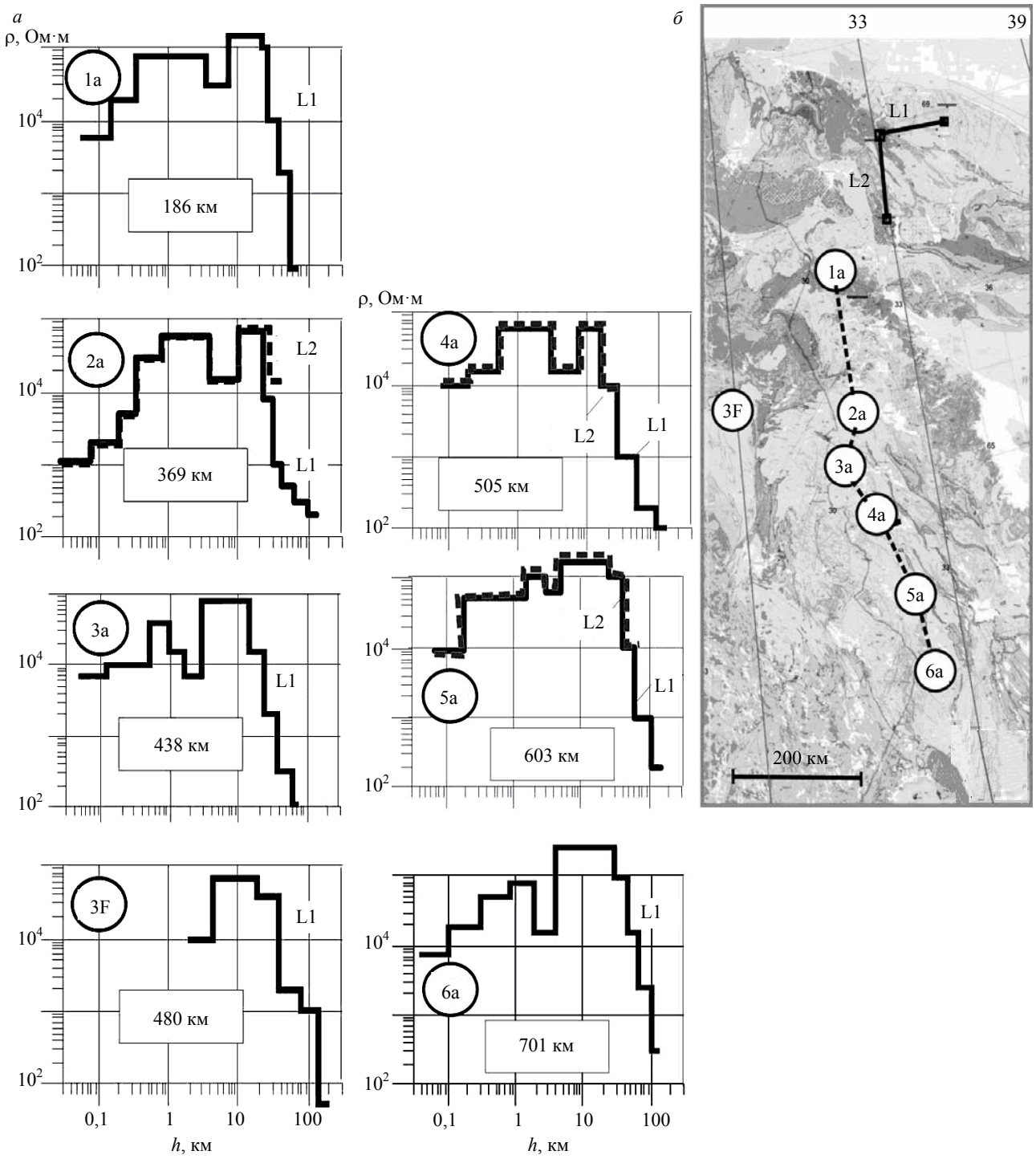


Рис.7. Результаты решения обратной задачи частотного глубинного зондирования в поле линий L1 и L2 в эксперименте FENICS по профилю 1а-6а и в точке 3F (*а*) и положение пунктов зондирования и питающих линий (*б*)

На рис.8, *б* контуры аномалии поперечного сопротивления литосферы *T* сопоставлены с обобщенной геологической картой района исследований [4]. Однако никакого согласия между положением *T*-аномалии и картой поверхностной геологии не наблюдается. Сравнение контуров аномалии поперечного сопротивления с картой коровой электрической проводимости [18], приведенное на рис.8, *г*, также не позволяет найти общие черты. Это «несовпадение» указывает на глубинный характер аномалии поперечного сопротивления, поскольку природа коровых аномалий проводимости полностью определяется присутствием электронопроводящих пород в верхнем слое земной коры мощностью порядка 10 км.

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.178

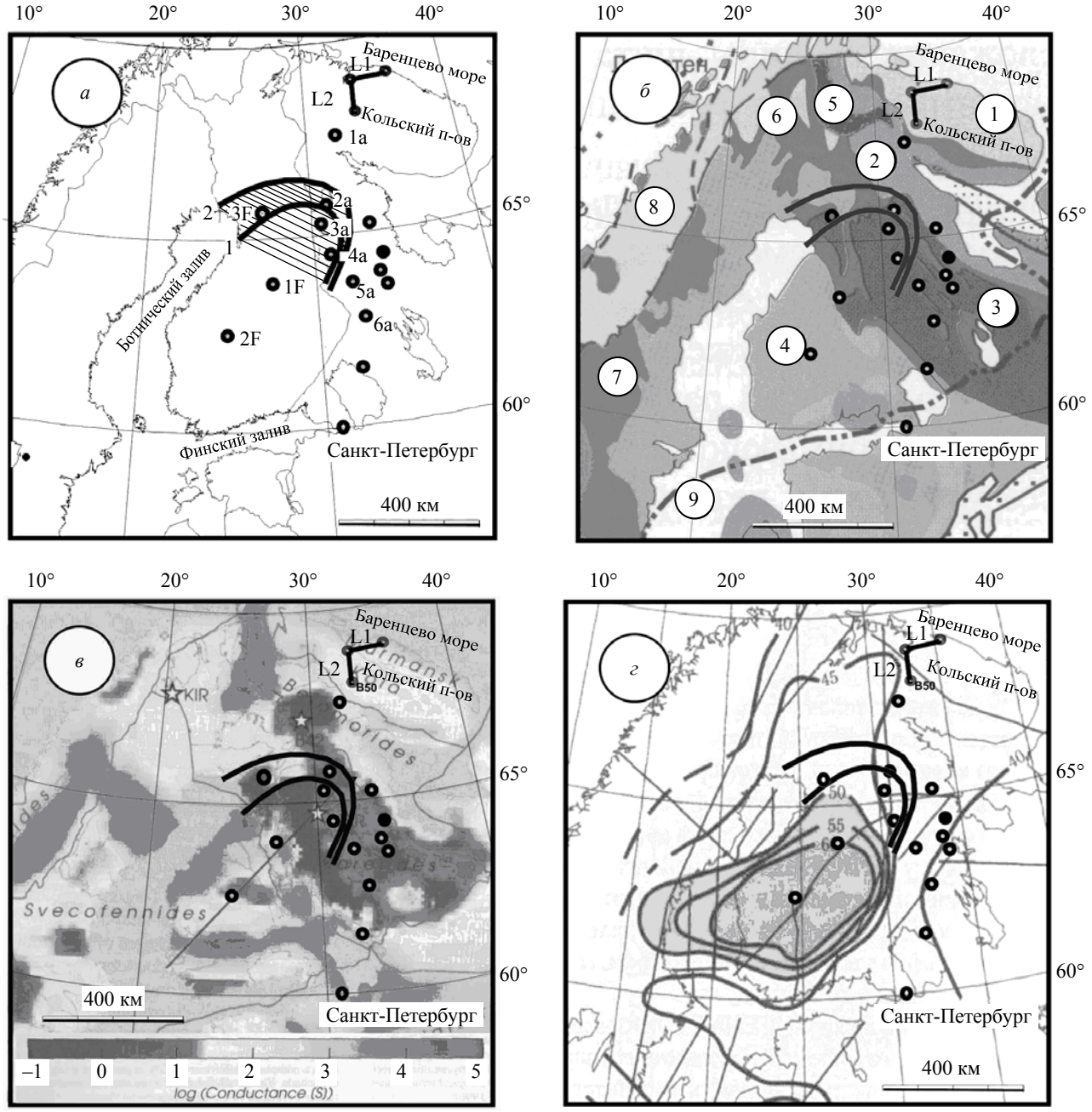


Рис.8. Результаты эксперимента FENICS в изолиниях поперечного сопротивления (жирные сплошные линии 1 – $1 \cdot 10^9$ и 2 – $2 \cdot 10^9$ Ом·м^2) T (*а*) и их сопоставление с геологией [4] (*б*), с коровыми аномалиями проводимости [15] (*в*) и со схемой изоглубин границы Мохо [10] (*г*).

Жирные кружки – пункты измерений в ходе эксперимента FENICS-2014. Пункты 1а-6а на рис.8, *а* – участок профиля, представленного на рис.6, 7; пункты 1F-3F – положение станций FMTU-2008 (М.Смирнов, Университет Оулу, Финляндия) в районе аномалии поперечного сопротивления. Цифрами в кружках на рис.8, *б* обозначены: 1-3 – архейские комплексы (1 – Кольский, 2 – Беломорский, 3 – Карельский); 4 – Свекофенский протерозойский комплекс; 5 – гранулитовый пояс; 6 – зеленый каменный пояс; 7 – метавулканиты; 8 – акледониды; 9 – граница Русской платформы

На рис.8, *г* положение изолиний T хорошо согласуется с положением аномалии Мохо, установленной по сейсмическим данным в Центральной Финляндии [10] и позднее показанной в работе [13]. Изолинии T огибают с северо-востока обширную область погружения границы Мохо до глубины 60 км. Отметим, что на большей части Фенноскандинавского щита мощность коры, по сейсмическим данным, не превышает 40 км.

Понижение удельного сопротивления литосферы в аномальной области, относимое к глубинам 50-60 км, по-видимому, обусловлено примесной проводимостью, связываемой с дефектами

DOI: *10.18454/PMI.2017.2.178*

кристаллической решетки, поскольку свободные флюиды на этих глубинах должны отсутствовать ввиду общего высокого сопротивления вещества (более 100 тысяч ом-метров) и «отжимания» флюидов к дневной поверхности под действием литостатического давления [11].

Выводы

1. Выполнен уникальный для мировой практики эксперимент по глубинному частотному зондированию литосферы Фенноскандинавского щита с использованием двух взаимно ортогональных промышленных ЛЭП в частотном диапазоне 0,1-200 Гц и на удалениях до 856 км между передающими линиями и приемными станциями.

2. Установлена высокая степень горизонтальной однородности (одномерности) геоэлектрического разреза литосферы восточной части Балтийского щита в диапазоне глубин от 10-15 до 50-70 км с коэффициентом анизотропии не выше 1,2.

3. Установлена область пониженного поперечного сопротивления литосферы до 10^9 Ом·м^2, совпадающая с областью погружения границы Мохо до 55-60 км, установленной по сейсмическим данным на западе Карелии и в Центральной Финляндии.

Благодарности. *Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-05-12044. Авторы выражают благодарность сотруднику Университета Оулу М.Ю.Смирнову за участие в измерениях и присланные результаты.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ваньян Л.Л.* Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 218 с.

2. Высоковольтный выпрямитель генератора «Энергия-2» для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений / М.Б.Баранник, А.Н.Данилин, Б.В.Ефимов, В.В.Колобов, П.И.Прокопчук, В.Н.Селиванов, Ю.А.Копытенко, А.А.Жамалетдинов // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 3. С. 5-13.

3. Высоковольтный силовой инвертор генератора «Энергия-2» для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений / М.Б.Баранник, А.Н.Данилин, Б.В.Ефимов, В.В.Колобов, П.И.Прокопчук, В.Н.Селиванов, А.Н.Шевцов, Ю.А.Копытенко, А.А.Жамалетдинов // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 2. С. 5-23.

4. *Глазнев В.Н.* Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: КаэМ, 2003. 252 с.

5. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент FENICS) / А.А.Жамалетдинов, А.Н.Шевцов, Т.Г.Короткова, Ю.А.Копытенко, В.С.Исмагилов, М.С.Петрищев, Б.В.Ефимов, М.Б.Баранник, В.В.Колобов, П.И.Прокопчук, М.Ю.Смирнов, С.А.Вагин, М.И.Пертель, Е.Д.Терещенко, А.Н.Васильев, В.Ф.Григорьев, М.Б.Гохберг, В.И.Трофимчик, Ю.М.Ямпольский, А.В.Колосков, А.В.Федоров, Т.Корья // Физика Земли. 2011. № 1. С. 4-26.

6. *Жамалетдинов А.А.* Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л.: Наука., 1990. 159 с.

7. *Колобов В.В.* Генераторно-измерительный комплекс «Энергия» для электромагнитного зондирования литосферы и мониторинга сейсмоактивных зон / В.В.Колобов, М.Б.Баранник, А.А.Жамалетдинов. СПб: СОЛО, 2013. 240 с.

8. *Краев А.П.* Сверхглубокое электрозондирование / А.П.Краев, А.С.Семенов, А.Г.Тархов // Разведка недр. 1947. № 3. С. 40-41.

9. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона / Е.П.Велихов, А.А.Жамалетдинов, Л.А.Собчаков и др. // Доклады Академии наук. 1994. Т. 338. № 1. С. 106-109.

10. *Павленкова Н.И.* Структура литосферы Балтийского щита по данным ГСЗ. Структура и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE / Н.И.Павленкова, А.Ф.Морозов, Н.В.Межеловский. М.: Геокарт, ГЕОС, 2006. Вып.2. С. 33-58.

11. *Родкин М.Ф.* Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике. М.: Нац. Геоф. Ком., 1993. 194 с.

12. Частотное электромагнитное зондирование земной коры на территории Центрально-Финляндского гранитоидного комплекса / А.А.Жамалетдинов, А.Н.Шевцов, А.Д.Токарев, Т.Корья // Известия РАН. Физика Земли. 2002. № 11. С. 54-68.

13. *Шаров Н.В.* Скоростные неоднородности литосферы Фенноскандинавского (Балтийского) щита / Н.В.Шаров, Ф.П.Митрофанов // Доклады Академии наук. 2014. Т. 454. № 2. С. 221-224.

14. *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.

15. Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield / T.Korja, M.Engels, A.A.Zhamaletdinov, A.A.Kovtun, N.A.Palshin, M.Yu.Smirnov, A.D.Tokarev, V.E.Asming, L.L.Vanyan, I.L.Vardaniants and the BEAR Working Group // Earth, Planets and Space. 2002. Vol. 54. P. 535-558.

16. Electromagnetic Studies on the Kola Peninsula and in Northern Finland by Means of a Powerfull Controlled source / Ye.P.Velikhov, A.A.Zhamaletdinov, I.V.Belkov, G.I.Gorbunov, S.E.Hjelt, A.S.Lisin, L.L.Vanyan, M.S.Zhdanov, T.A.Demidova,

T.Korja, S.K.Kirillov, Y.I.Kuksa, A.Y.Poltanov, A.D.Tokarev, V.V.Yevstigneyev // Journal of Geodynamics. 1986. Vol. 5. Iss. 2. P. 237-256.

17. *Khintchine Alexander*. Korrelationstheorie der stationären stochastischen Prozesse // Mathematische Annalen. 1934. 09 (1). P. 604-615.

18. *Korepanov V.Ye.* Electromagnetic sensors for microsatellites // Proceedings of IEEE «Sensors», 2002. P. 1718-1722.

19. *Smith J.O*. Spectral Audio Signal Processing. Stanford, California: W3K Publishing, 2011. 674 p.

***Авторы*: А.Н.Шевцов,** *канд. физ.-мат. наук*, *старший научный сотрудник*, *anshev2009-01@rambler.ru* (*Геологический институт Кольского научного центра РАН*, *г.Апатиты*, *Россия*), **А.А.Жамалетдинов,** *д-р геол.-минерал. наук*, *главный научный сотрудник*, *abd.zham@mail.ru* (*Геологический институт Кольского научного центра РАН*, *г.Апатиты*, *Россия*), **В.В.Колобов,** *канд. техн. наук*, *ведущий научный сотрудник*, *1_i@mail.ru* (*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН*, *г.Апатиты*, *Россия*), **М.Б.Баранник,** *научный сотрудник*, *maxbar@ien.kolasc.net.ru* (*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН*, *г.Апатиты*, *Россия*).

Статья принята к публикации 07.07.2016.