

УДК 550.834

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ FENICS ПО ТЕНЗОРНОМУ ЧАСТОТНОМУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ ЛИТОСФЕРЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО (ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО) ЩИТА

© 2009 г. А. А. Жамалетдинов, А. Н. Шевцов, Т. Г. Короткова, Ю. А. Копытенко, В. С. Исмаилов, 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, М. Б. Гохберг, Т. Корья

Представлено академиком А.О. Глико 21.01.2009 г.

Поступило 26.01.2009 г.

Балтийский (Фенноскандинавский) щит сложен древнейшими кристаллическими породами архейского и протерозойского возраста. Он 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 его территории выполнен большой объем сейсмических, гравитационных и магнитных съемок, электромагнитных зондирований. Изучено состояние вещества при обычных и высоких термодинамических параметрах. На основе имеющихся материалов разработан ряд геолого-геофизических моделей строения региона [1, 2]. Особыми перспективами при глубинных исследованиях, наряду с другими геофизическими методами, обладают электромагнитные зондирования. Данные об удельном электрическом сопротивлении несут косвенную

информацию о вещественном составе, флюидном, температурном и напряженно-деформированном состояниях земных недр. На это обращали внимание ведущие ученые уже на заре становления электромагнитных методов [3, 4]. Однако выполненные с тех пор многолетние исследования наряду с новыми открытиями вызвали ряд новых дискуссионных вопросов [5, 6]. Их разрешение требует непрерывного совершенствования техники и методики электромагнитных зондирований, прежде всего с применением мощных контролируемых источников.

В настоящем сообщении представлены первые результаты тензорного частотного глубинного электромагнитного зондирования (эксперимент FENICS – Fennoscandian Electrical Conductivity from Soundings with Natural I (and) Control Sources). Главной особенностью эксперимента FENICS явилось использование двух взаимно ортогональных промышленных линий электропередачи (ЛЭП) в качестве излучающих антенн. Это позволило получить информацию о компонентах тензора импеданса и в благоприятных условиях дальней (волновой) зоны выполнить обработку данных на общих подходах с магнитотеллурическими зондированиями. Положение промышленных ЛЭП показано на рис. 1. Их протяженность составляет 109 км (линия Л1, запад–восток) и 120 км (линия Л2, север–юг). В отдельных случаях использовалась также субширотная СНЧ-антенна “Зевс” протяженностью 60 км (линия Л3 на рис. 1) [7]. Диапазон генерируемых частот составил 0.1–200 Гц. В качестве источника переменного тока использовался генератор Энергия-1 мощностью 100 кВт, питаемый от промышленной трехфазной сети 380 В.

Эксперимент FENICS проводился с 2006 по 2008 г. Главный этап зондирований с промышленными ЛЭП был осуществлен в 2007 г. Работа по

*Геологический институт
Кольского научного центра Российской Академии наук,
Апатиты Мурманской обл.*

*Санкт-Петербургский филиал
Института земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской Академии наук*

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера
Кольского научного центра Российской Академии наук,
Апатиты Мурманской обл.*

*Санкт-Петербургский государственный
университет*

*Полярный геофизический институт
Кольского научного центра Российской Академии наук,
Мурманск*

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской Академии наук, Москва*

Университет Оулу, Финляндия

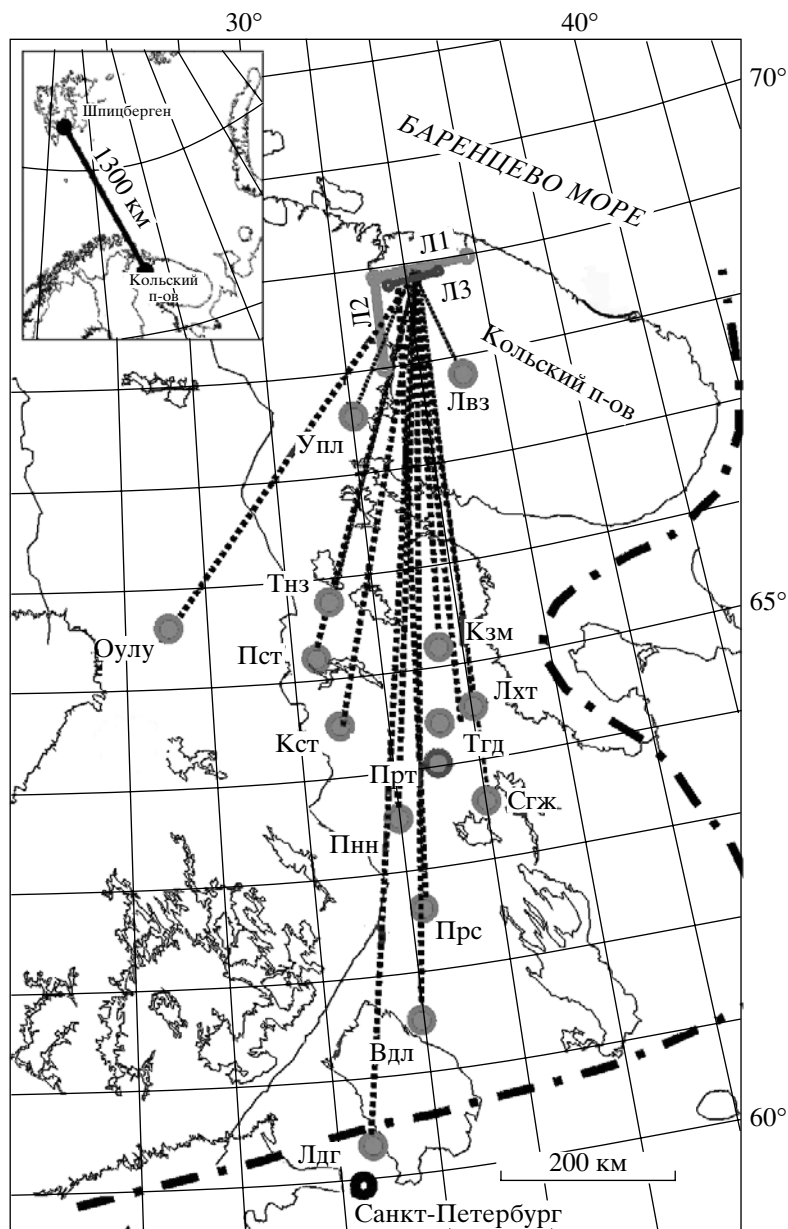


Рис. 1. Схема расположения питающих и приемных линий в эксперименте FENICS. Питающие линии: Л1 и Л2 – промышленные ЛЭП, Л3 – СЧ-антенна “Зевс”. Точки – пункты зондирования (табл. 1). Штрихпунктирная линия – юго-восточная граница Балтийского щита.

созданию генератора Энергия-1 и его подключению к промышленным ЛЭП выполнена Центром физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН. Основная часть работы по измерению сигналов на полевых точках и организации эксперимента FENICS выполнена Геологическим институтом Кольского научного центра РАН. Наряду с этим важное значение имели измерения, выполненные Санкт-Петербургским филиалом ИЗМИРАН, Санкт-Петербургским государственным университетом, Полярным геофизическим институтом КНЦ РАН и

Университетом Оулу (Финляндия). Схема расположения точек наблюдений приведена на рис. 1.

Ток генерировался в ночное время, когда можно было переключать ЛЭП в режим работы по схеме провод–земля по согласованию с диспетчерской службой Колэнерго. Ток, подаваемый от генератора Энергия-1 в ЛЭП через систему контурных заземлений, имел синусоидальную форму. Сила тока первой гармоники в антеннах изменялась от 120–200 А на низких частотах (0.1–10 Гц) до десятков ампер на высоких частотах (100–200 Гц). Ток в антенне записывался цифровым регистратором

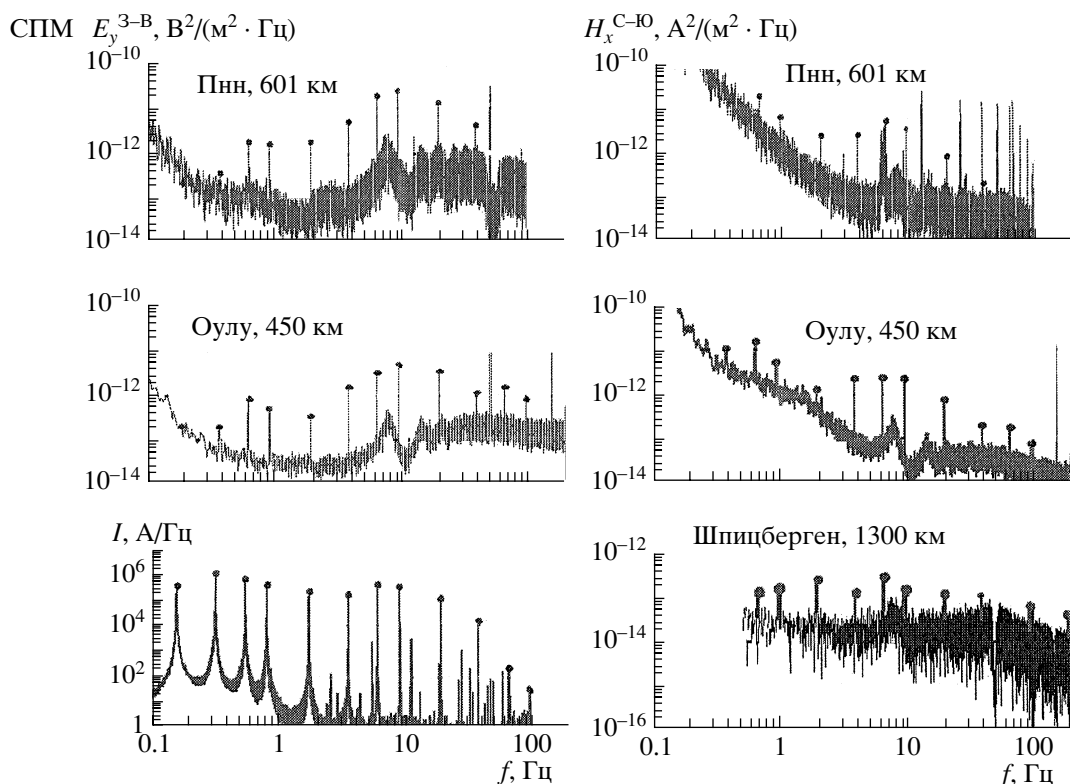


Рис. 2. Диаграммы спектральной плотности мощности (СПМ), силы тока I в питающей ЛЭП Л1, сигналов электрического поля E_y и магнитного поля H_x , зарегистрированных на разных удалениях от линии Л1. Ось y ориентирована в направлении восток–запад.

со скоростью оцифровки 5 кГц. Метки времени подавались с привязкой к глобальной спутниковой системе GPS (приемник Blue Tooth Globalsat BT-359) с точностью синхронизации не хуже 10^{-6} с. Точность тактовой частоты была не хуже 10^{-7} Гц благодаря применению системы термостабилизации.

Сигналы на всех приемниках измерялись в открытом канале. Это позволяло синхронно с записью сигналов от промышленных ЛЭП выполнять магнитотеллурическое (МТЗ) и частично аудиоманнитотеллурическое зондирование (АМТ). Сигналы контролируемого источника и АМТ–МТЗ-вариаций разделялись путем цифровой фильтрации. С этой целью были созданы компьютерные программы синхронной спектральной обработки сигналов на полевых точках и тока генератора в промышленных линиях электропередачи на основе пакета программ Power Graph. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены примеры спектральной обработки сигналов, измеренных на удалениях 450, 601 и 1300 км от источника. Наиболее уверенно над естественными шумами фиксируются сигналы в диапазоне частот от 0.3 до 30 Гц. Максимум интенсивности наблюдается в районе 3–10 Гц.

Нормировку измеренных сигналов в значения кажущегося электрического сопротивления про-

изводили по входному импедансу в значениях ρ_T (без учета силы тока и геометрии установки, по аналогии с МТЗ) и по отдельным компонентам в значениях ρ_k (с учетом силы тока и геометрии установки, по аналогии с частотным зондированием). Наиболее надежное совпадение значений ρ_T и ρ_k с точностью порядка 5% наблюдалось в диапазоне частот 3–30 Гц, что служило главным критерием правильности определения чувствительностей измерительных каналов. На более низких частотах значения ρ_T и ρ_k расходились из-за влияния ближней зоны, на более высоких частотах – из-за влияния ионосферы и токов смещения [8].

На рисунке 3 приведены сводные диаграммы кривых кажущегося сопротивления $\rho_T(T)$ и графики разрезов удельного сопротивления $\rho_k(h)$ по результатам одномерной инверсии методом эффективной линеаризации [9, 10]. При построении левых (высокочастотных) ветвей кривых $\rho_T(T)$ на рис. 3 использованы результаты зондирований на постоянном токе, пересчитанные в частотную область путем последовательного решения обратной и прямой задач. Зондирования на постоянном токе выполнялись с дипольными и ВЭЗ установками с максимальными разносами от 2–3 до 10–15 км на всех точках измерения сигналов ЛЭП станция-

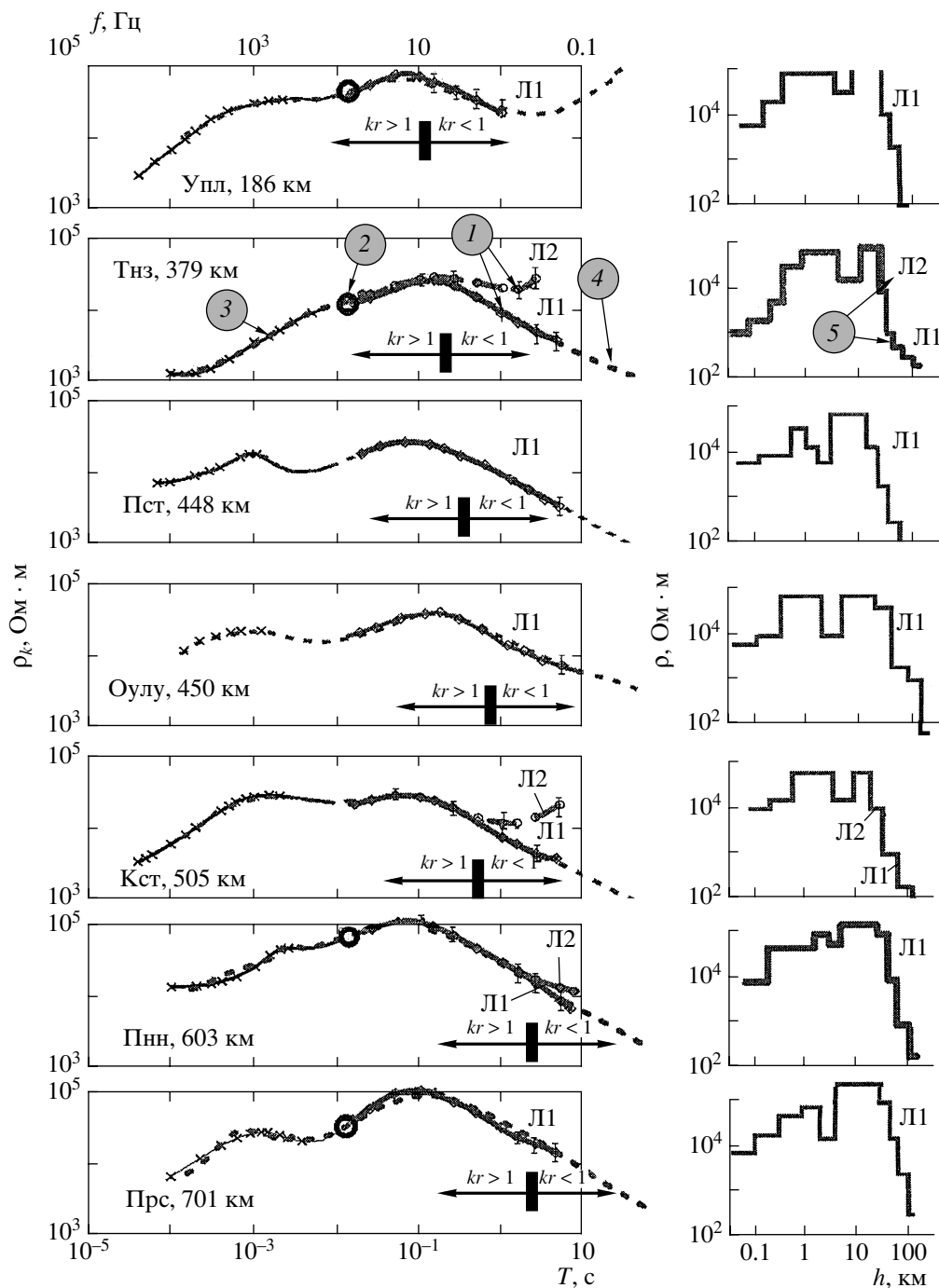


Рис. 3. Сводная диаграмма кривых кажущегося сопротивления и одномерных разрезов по результатам эксперимента FENICS. Стрелками от цифр в кружках показано: 1 – значения кажущегося сопротивления в поле промышленных ЛЭП Л1 и Л2; 2 – то же в поле СНЧ-антенны “Зевс” (линия Л3); 3 – то же по результатам зондирования на постоянном токе, пересчитанным в частотную область; 4 – теоретические кривые кажущегося сопротивления по результатам решения одномерной обратной задачи для линий Л1 и Л2 соответственно; 5 – геоэлектрические разрезы, отвечающие теоретическим кривым 4.

ми ГИ КНЦ РАН (Упл, Тнз, Пст, Кст, Пнн, Прс и Тнг на рис. 1 и 3).

Наиболее важными чертами кривых кажущегося сопротивления на рис. 3 являются их конформность, свидетельствующая о примерно одинаковых

параметрах глубинной электропроводности литосферы в исследуемом регионе, и совпадение кривых ρ_T при широтной (линии Л1 и Л3) и меридиональной (линия Л2) поляризациях первичного поля в пределах волновой зоны. Границы волновой зо-

Таблица 1. Значения поперечного сопротивления литосферы восточной части Балтийского щита по результатам эксперимента FENICS

Пункт зондирования	Расстояние до питающей линии Л1, км	Поперечное сопротивление T , $10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$
Уполокша (Упл)	186	4
Тунгозеро (Тнз)	379	1.2
Писто (Пст)	448	0.8
Оулу (Оулу)	450	1.4
Костомукша (Кст)	505	0.8
Тунгуда (Тгд)	510	11.2
Пенинга (Пнн)	603	5.2
Поросозеро (Прс)	701	7.6

ны отмечены на рис. 3 вертикальными штрихами, разделяющими участки кривых со значениями

$kr > 1$ и $kr < 1$, где $kr = \frac{r}{h_s}$ – волновой параметр, определяющий отношение расстояния r между источником и приемником к толщине скин-слоя в земле

$$h_s = \frac{1}{|k|} = \frac{\sqrt{10^7 \rho_T T}}{2\pi\sqrt{2}}, \text{ м,}$$

где ρ_T – кажущееся сопротивление, измеренное на периоде T . Граница эта, фиксируемая также по

расхождению кривых ρ_T для линий Л1 и Л2 (рис. 3), закономерно смещается в область более низких частот по мере удаления точки приема от источника. Последнее замечание, подтверждаемое теоретическими данными [11], является наиболее значимым свидетельством в пользу одномерности горизонтальной однородности разреза на глубинах свыше 10–15 км. В верхней части разреза в диапазоне глубин 3–10 км (рис. 3) проявляется неоднородная область пониженного сопротивления, определяемая нами как слой, имеющий дилатантно-диффузионную природу проводимости [12].

Одним из наиболее важных результатов эксперимента FENICS (см. рис. 3) явилось обнаружение в северо-западной части Карельского мегаблока и в Финляндии (район Оулу) области пониженного поперечного электрического сопротивления земной

коры $T = \sum_{i=1}^{i=n} h_i \rho_i$, где h_i – мощность и ρ_i – удельное

электрическое сопротивление i -го слоя плохо проводящей части литосферы в диапазоне глубин 10–50 км (табл. 1). Природа аномалии T предположительно связана с возможным разуплотнением данного участка литосферы на площади порядка 80 тыс. кв. км. Понижение удельного сопротивления вещества литосферы может быть объяснено примесной проводимостью, дефектами кристаллической решетки [13] при минимальной роли флюидов, а возможно, и при полном их отсутствии в виду общего высокого удельного сопротивления коры (порядка $10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Возможны также другие варианты трактовки природы аномалии, требующие более детальных наблюдений и расчетно-теоретических работ.

Особый интерес представляет конформность границ области аномально низкого поперечного сопротивления земной коры на рис. 4 с ранее выявленной зоной аномального погружения границы Мохо до 60 км [14]. Это создает предпосылки для непротиворечивого истолкования геологической и геодинамической природы глубинных геофизических границ за счет комплексной интерпретации электромагнитных и упругих параметров. Необходимо провести дополнительно глубинные зондирования в районе аномалии и выполнить детальный анализ гравитационных, магнитных и тепловых данных, а также условий напряженно-деформированного состояния коры путем математического моделирования.

Установленная аномалия является единственной в мире примером оценки поперечного электрического сопротивления плохо проводящей части земной коры в поле мощных контролируемых источников в площадном (пространственном) варианте с возможным выходом на построение квазитрехмерной модели глубинной электропровод-

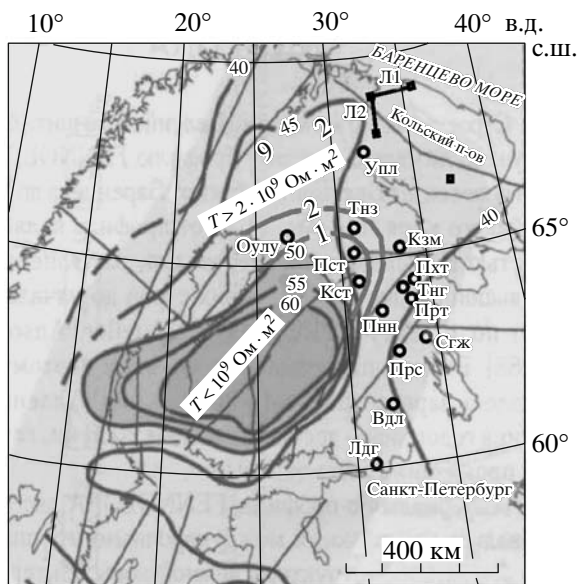


Рис. 4. Положение аномалии поперечного сопротивления литосферы T до $10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ для восточной части Балтийского щита по результатам эксперимента FENICS и области аномального погружения границы Мохо до 60 км по сейсмическим данным (Павленкова, 2006).

ности литосферы. Достоверность электромагнитной аномалии обосновывается хорошим согласием измерений, выполненных разными станциями на территории России и Финляндии, а также результатами зондирований на постоянном токе, указывающими на примерно одинаково высокое сопротивление верхней части разреза во всех приведенных точках наблюдений благодаря их выбору на архейских блоках коры, что позволяет исключить возможность влияния статических искажений. Значения поперечного сопротивления T в пределах аномалии понижаются до 10^9 Ом · м² при среднем “нормальном” значении 10^{10} Ом · м² для большей части территории восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита [1].

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам Колэнерго А.В. Маслову, О.Ю. Горохову и В.И. Трофимчику за неоценимую помощь в организации работ на промышленных ЛЭП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных наук (гранты 06-07-64429-а и 07-08-00181-а) и Отделения наук о Земле РАН, проект № 6 “Геодинамика и механизмы деформации литосферы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жамалетдинов А.А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л.: Наука, 1990. 159 с.
2. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: КазМ, 2003. 252 с.
3. Краев А.П., Семенов А.С., Тархов А.Г. // Разведка недр. 1947. № 3. С. 40–41.
4. Тихонов А.Н., Эненштейн Б.С., Скугаревская О.А. // ДАН. 1967. Т. 173. № 5. С. 1062–1064.
5. Ваньян Л.Л. В кн.: Коровые аномалии электропроводности. Л.: Наука, 1984. С. 27–35.
6. Жамалетдинов А.А. Теория и методика глубоких электромагнитных зондирований на кристаллических щитах. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. Кн. 1. С. 148–155.
7. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А. и др. // ДАН. 1994. Т. 338. № 1. С. 106–109.
8. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Токарев А.Д. и др. // ДАН. 1999. Т. 366. № 5. С. 688–691.
9. Porokhova L.N., Kharlamov M.M. // Phys. Earth and Planet. Inter. 1990. V. 60. P. 68–79.
10. Шевцов А.Н. Теория и методика глубоких электромагнитных зондирований на кристаллических щитах. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. Кн. 2. С. 7–22.
11. Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1980. 391 с.
12. Жамалетдинов А.А. // Рос. геофиз. журн. 2006. № 41/42. С. 22–28.
13. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
14. Павленкова Н.И. Строение и динамика литосферы Восточной Европы. М.: Геокарт; Геос, 2006. В. 2. С. 33–58.