

УДК 550.311

“НОРМАЛЬНАЯ” МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА И ЕЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

© 2004 г. А. А. Жамалетдинов, А. Н. Шевцов, А. Д. Токарев

Представлено академиком Ф.П. Митрофановым 16.04.2004 г.

Поступило 28.04.2004 г.

Задача разработки “нормальной” модели электропроводности континентальной литосферы, несмотря на более чем полувековую историю глубинных электромагнитных зондирований, начало которым положено экспериментами А.П. Краева и А.С. Семенова [1], находится еще на уровне дискуссии. Под “нормальной” ниже понимается модель электропроводности литосферы (щита, платформы), свободная от бокового влияния коровых проводников, окраинных морей и других объектов горизонтальной электрической неоднородности. Такая модель должна отражать одномерное распределение электропроводности на глубину в зависимости от состава, термодинамического состояния и флюидного режима земных недр. Первые систематические исследования в этой области были начаты Л.Л. Ваньяном [2, 3].

В настоящей работе с целью разработки “нормальной” модели получены результаты глубинных зондирований с контролируруемыми источниками на Балтийском щите, дополненные в области длинных периодов данными МТЗ эксперимента BEAR [4] и данными глобальных геомагнитных наблюдений [5]. Схема расположения пунктов и трасс зондирований приведена на рис. 1. Пункты зондирований выбирались в пределах относительно однородных, плохо проводящих блоков, на удалении от известных коровых проводников. Основным методом исследования было зондирование в поле МГД-источника “Хибины” мощностью 40 МВт (трассы I–III на рис. 1) [6, 7]. Максимальная глубина зондирования при этом достигала 50–100 км на разносах 500–600 км. Для исследования верхней части земной коры до глубин 10–15 км использовали частотные зондирования с автомобильным генератором ЭРС-67 мощ-

ностью 29 кВт (полигоны 1–3 на рис. 1) [8, 9] и с СНЧ-антенной “Зевс” [10]. В 2003 г. при поддержке РФФИ выполнены первые тензорные частотные зондирования с двумя взаимно ортогональными промышленными линиями электропередачи протяженностью 109 и 89 км на удалениях до 270 км от источника. Самая верхняя часть разреза исследована с помощью зондирований на постоянном токе ВЭЗ с разносами АВ до 16 км. Часть зондирований на постоянном токе выполнена с расстояниями между источником и приемником до 100 км (полигон 1 и трасса Хибины-III на рис. 1) [6]. Общая площадь, охваченная зондированиями с контролируруемыми источниками, составляет около 0.5 млн. км².

Результирующая “нормальная” кривая кажущегося электрического сопротивления и фазы, полученная по данным зондирований с естественными и контролируруемыми источниками в диапазоне частот от 10⁶ до 10⁻⁶ Гц, представлена на рис. 2. Фазовая кривая для зондирований с контролируруемыми источниками получена из кривой кажущегося сопротивления при использовании интегральных соотношений Питера Вайделя [11]. Для зондирований с естественными источниками фаза получена на основании экспериментальных данных [4, 5]. Левая ветвь кривой кажущегося сопротивления на рис. 2 в диапазоне частот от 10⁶ до 10³ Гц построена путем пересчета в частотную область электрических зондирований на постоянном токе. Можно видеть, что кривые кажущегося сопротивления на рис. 2, полученные с использованием разных типов источников и в разных геологических условиях, повторяют друг друга, непрерывно отслеживая особенности изменения свойств геоэлектрического разреза практически от дневной поверхности и до глубин в 50–100 км, т.е. более, чем на всю мощность земной коры.

Для суждения о больших глубинах использовали результаты эксперимента “BEAR” [4]. На рис. 2 приведены кривые МТЗ, полученные в пределах наиболее однородных плохопроводящих блоков; это пункты В-47, В-48 (Карельский мегаблок) и пункт В-28 (Центрально-Финляндский блок). Положение и номера выбранных пунктов показаны

*Санкт-Петербургский филиал Института
земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн
Российской Академии наук
Геологический институт
Кольского научного центра Российской Академии
наук, Апатиты Мурманской обл.*

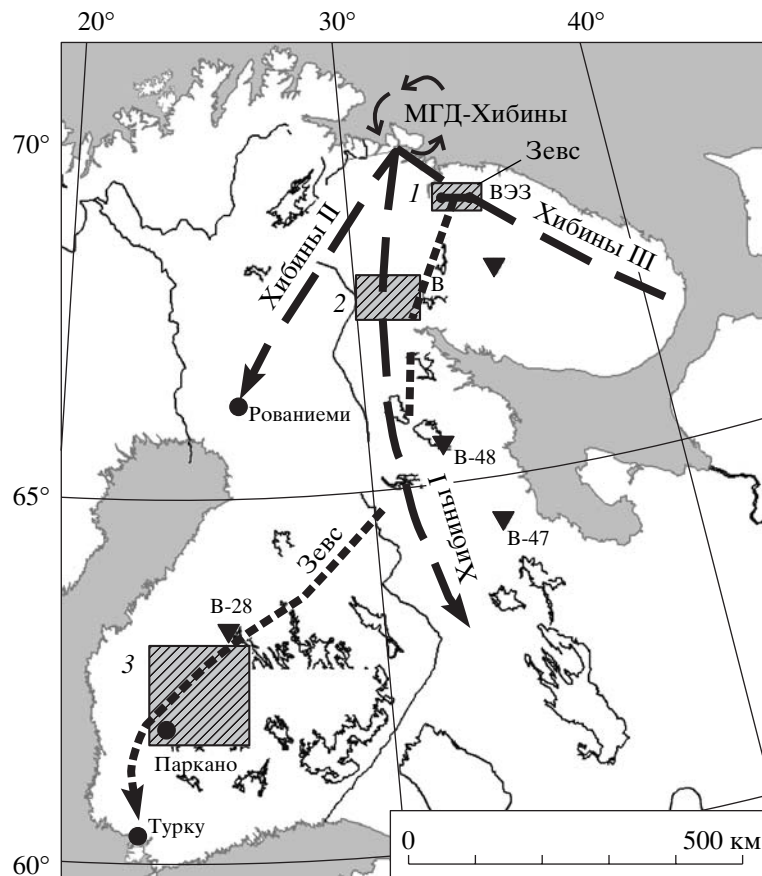


Рис. 1. Пункты и трассы глубинных электромагнитных зондирований с естественными и контролируемыми источниками на территории Балтийского щита. Условные обозначения: Хибины I–III – трассы МГД-зондирований; “ЗЕВС” – трасса зондирований с СНЧ-антенной “Зевс”; “CSAMT 1–3” – районы частотных зондирований; ВЭЗ – участок глубинных зондирований на постоянном токе; В28, В47, В48 – пункты МТЗ эксперимента BEAR.

на рис. 1. На рис. 2 для выбранных пунктов МТЗ приведены минимальные кривые ρ_T , которые считаются менее искаженными горизонтальной неоднородностью пород. Самую низкочастотную часть диаграммы занимают данные глобальных зондирований на сети геомагнитных обсерваторий. Их анализ приведен в [5].

Можно видеть, что в целом наблюдается удовлетворительное согласие результатов зондирований с естественными и контролируемыми источниками. Однако, учитывая существенную неустойчивость данных МТЗ, обусловленную их повышенной чувствительностью к боковым искажениям и к неоднородности структуры источника, дальнейшая интерпретация выполнена лишь на основании результатов зондирований с контролируемыми источниками.

Решение обратной задачи выполнено методом эффективной линеаризации [8]. Результирующий геоэлектрический разрез представлен на рис. 3 в виде градиентной модели (кривая 1) и ее ступенчатой аппроксимации (кривая 2). Показаны дове-

дительные интервалы, определяемые разбросом исходных данных.

Полученный “нормальный” разрез представляет собой пятислойную модель вида “КНК” с тремя проводящими слоями. Интерпретация природы выявленных слоев приведена на рис. 3 в виде структурно-геодинамической колонки по В.Н. Николаевскому [12]. Верхнюю часть разреза на колонке занимает область пониженного сопротивления (1), которая включает осадочные моренные отложения мощностью 20–30 м и верхнюю, дезинтегрированную и обводненную часть кровли кристаллического основания средней мощности 100 м. Ниже залегает слой высокого сопротивления (2) с развитыми в нем субвертикальными разломами и трещинами, заполненными водными растворами (флюидами). Средняя мощность его оценивается в 2–3 км.

В интервале глубин от 2–3 до 10 км выделяется промежуточная проводящая область (3), где сопротивление понижается с $2 \cdot 10^5$ Ом · м до порядка $2 \cdot 10^4$ Ом · м. Этот проводящий слой выделен впервые. Природа понижения сопротивления свя-

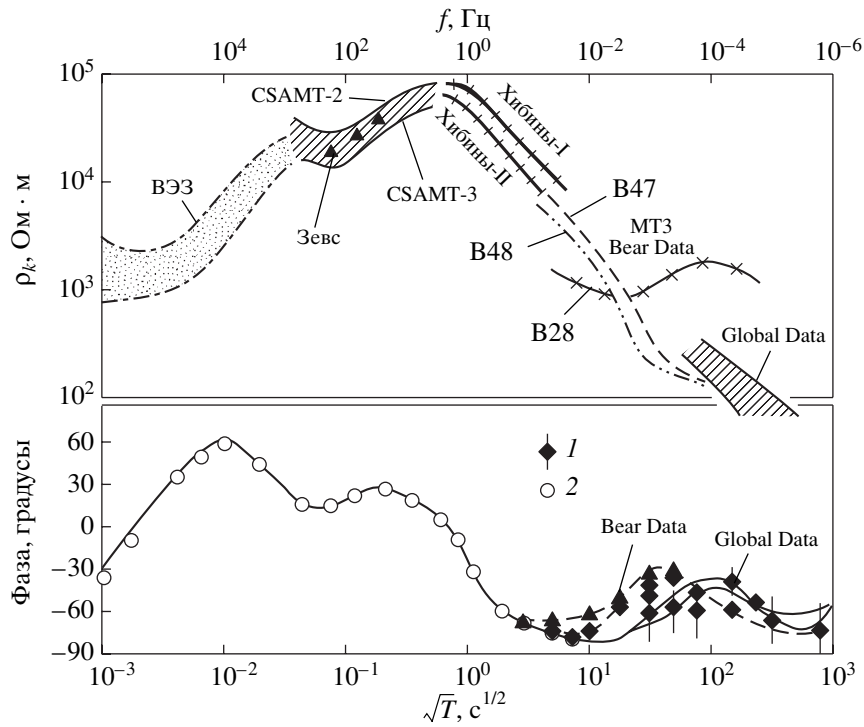


Рис. 2. Сводная диаграмма кривых кажущегося сопротивления и фазы по результатам глубинных электромагнитных зондирований с естественными и контролируемыми источниками на территории Балтийского щита. 1 – измерения, 2 – расчет.

зана с проникновением на глубину флюидов метеорного происхождения. Мы полагаем, что промежуточный проводящий слой имеет дилатантно-диффузионную природу, и поэтому к нему приложимо понятие “слой ДД”. Это понятие имеет сугубо условный характер, поскольку выявленная область не может быть определена как проводящий слой в обычном, геометрическом понимании. Обнаруженный слой имеет крайне неоднородное строение с значительными разбросами по мощности и по величине удельного сопротивления. Сопротивление слоя изменяется в разных районах исследований в интервале от $3 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^4$ Ом·м. Величина продольной проводимости слоя при этом изменяется в пределах от 0.3 до 1–2 См. Природа отмеченных разбросов объясняется не столько неоднозначностью решения обратной задачи, сколько резкой горизонтальной неоднородностью параметров самого проводящего слоя.

Важно отметить, что промежуточный проводящий “слой ДД” не проявляется при проведении зондирований на постоянном токе даже при больших разносах, до 100 км и более. “Слой ДД” следует рассматривать совместно с верхним плохопроводящим слоем. Вместе они отражают общие черты перехода от субвертикальных разломов к выполаживающимся субгоризонтальным трещинам в пределах верхней 10-километровой толщи земной коры.

Продолжая рассмотрение “нормального” геоэлектрического разреза на рис. 3, можно отметить, что глубже 10 км наблюдается снова рост удельного электрического сопротивления пород до $2 \cdot 10^5$ Ом·м. Мощность плохопроводящей части литосферы оценивается в 60–80 км. Средняя величина поперечного сопротивления составляет примерно 10^{10} Ом·м². Ниже наблюдается экспоненциальное снижение сопротивления. Экстраполируя полученный разрез, можно предположить, что понижение удельного сопротивления до значения 100 Ом·м, необходимого для появления зоны частичного плавления в астеносфере [2], может наблюдаться на глубине 250–300 км.

Механизм дилатансии, с которым связывается природа “слоя ДД”, определяется как необратимое увеличение объема поликристаллических агрегатов при сдвиге [12]. Условия сдвига на глубине объясняются одновременным действием литостатического давления и касательного (тангенциального) напряжения. Сдвиговые напряжения на глубине появляются вследствие более быстрого увеличения горизонтальной компоненты горного давления с глубиной в сравнении с литостатической, вертикальной компонентой. Условия сдвига приводят к разрушению пород на глубине. Граница разрушения показана на фазовой диаграмме рис. 4. Ею определяются *PT*-условия зоны дилатансии

$$0.2 \text{ ГПа} \leq p \leq 0.5 \text{ ГПа}, \quad 200^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C}. \quad (1)$$

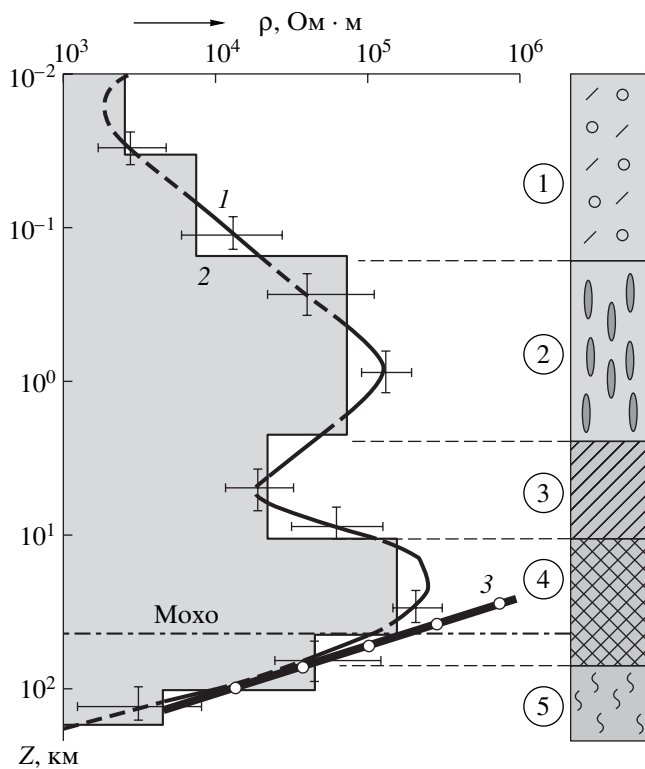


Рис. 3. “Нормальный” электрический разрез литосферы Балтийского щита и его интерпретация в виде структурно-геодинамической колонки: 1 – градиентная модель геоэлектрического разреза; 2 – то же, слоистая модель; 3 – модель разреза по лабораторным данным. Цифры в кружках: 1 – обводненная морена и кровля кристаллического фундамента; 2 – верхняя, хрупкая часть литосферы с субвертикальными разломами; 3 – то же с наклонными и субгоризонтальными трещинами (зона дилатансии); 4 – средняя псевдопластичная часть литосферы; 5 – нижняя литосфера (зона пластичности).

В соответствии с этими условиями зона дилатансии, или иначе зона выполаживания разломов занимает на колонке В.Н. Николаевского (рис. 4) диапазон глубин 5–17 км. На нашей колонке, полученной из анализа “нормального” геоэлектрического разреза, зона дилатансии занимает диапазон глубин от 2–3 до 10 км, т.е. располагается существенно выше по разрезу (рис. 3).

Ниже зоны дилатансии, в диапазоне глубин от 17 до 40 км на колонке В.Н. Николаевского (рис. 4) располагается область мелкой трещиноватости и псевдопластичности. Эта область, определяемая еще как зона полухрупкого состояния земной коры, ограничивается снизу разделом Мохо. Ниже границы Мохо, по данным [12], располагается область “истинно пластического состояния” гранитогнейсовых пород, определяемая следующими термодинамическими условиями:

$$p \geq 1 \text{ ГПа}, \quad T \geq 600^\circ\text{C}. \quad (2)$$

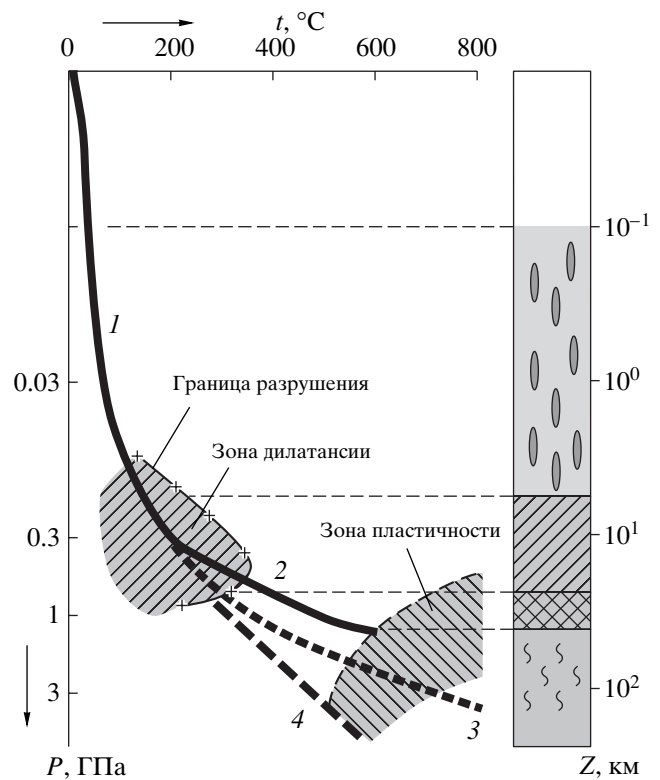


Рис. 4. Температурная интерпретация результатов глубинных электромагнитных зондирований на фазовой плоскости зон дилатансии и пластичности по В.Н. Николаевскому (1996): 1 – температурная кривая СГ-3, измеренная; 2 – экстраполяция температурной кривой СГ-3 на глубину по данным [13]; 3 – то же с учетом данных электромагнитного зондирования; 4 – температурная кривая по данным [Valle, 1951]. Условные обозначения на структурно-геодинамической колонке те же, что на рис. 3.

При определении этой границы за основу принята экстраполяция температурной кривой СГ-3 в точку 580°C на глубине 40 км (кривая 2 на рис. 4) [13]. Однако сопоставление “нормального” геоэлектрического разреза Балтийского щита с результатами лабораторных исследований [14] (кривые 1 и 3 на рис. 3) показывает, что наилучшее их совпадение наблюдается в случае, если принять, что температура на границе Мохо в условиях Балтийского щита не превышает 400°C . Экстраполяция температурного хода кривой СГ-3 в этом случае имеет вид, показанный кривой 3 на рис. 4. В соответствии с условием (2) верхняя кромка зоны пластичности при этом опустится на глубину порядка 80 км, где по данным глубинных электромагнитных зондирований предполагается температура порядка 600°C .

Таким образом, результаты анализа “нормального” геоэлектрического разреза восточной части Балтийского щита по данным зондирований с контролируемыми источниками при сопоставлении с

данными Кольской сверхглубокой скважины показывают их хорошее согласие с основными положениями теории дилатансионной трещиноватости В.Н. Николаевского. Наряду с этим имеются различия между экспериментальными и теоретическими данными в оценках глубин проявления зон дилатансии и пластичности. В частности, по экспериментальным данным глубинных зондирований зона дилатансии располагается на 3–5 км выше теоретических оценок. Возможно, это расхождение обусловлено влиянием лунно-солнечных напряжений. Во всяком случае можно отметить, что положение зоны дилатансии (“слоя ДД”) совпадает с глубиной развития максимальных вариаций электропроводности земной коры под действием лунно-солнечных приливных напряжений [15]. Это позволяет предположить, что именно лунно-солнечные суточные приливы обеспечивают энергетический ресурс, необходимый для развития процессов дилатансии и для нисходящего движения флюидов вдоль тектонических зон навстречу литостатическому давлению, отжимающему влагу к дневной поверхности.

Решение вопроса о природе отмеченных различий имеет важное значение для фундаментальных задач физики Земли и потребует проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 02–05–64708).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краев А.П., Семенов А.С., Тархов А.Г. // Разведка недр. 1947. № 3. С. 40–41.
2. Ваньян Л.Л. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1981. № 5. С. 57–66.
3. Geoelectric Models of the Baltic Shield / S. Hjelt, L. Vanyan Eds. Oulu: Univ. Oulu, 1989. Rept № 16. 250 p.
4. Korja T. The BEAR Working Group. Lithosphere. 2000. Program and Extend Abstrs. Helsinki: Inst. Seismology; Univ. Helsinki. Rept S-41. P. 25–34.
5. Zhamaletdinov A.A., Semenov V.Yu., Shevtsov A.A. et al. // Acta geophys. polonica, 2002. V. 50. № 4. P. 583–606.
6. Velikhov Ye.P., Zhamaletdinov A.A., Bel'kov I.V. et al. // J. Geodyn. 1986. № 5. P. 237–256.
7. Жамалетдинов А.А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л.: Наука, 1990. 159 с.
8. Шевцов А.Н. Метод частотного зондирования при изучении электропроводности верхней части земной коры Балтийского щита. Автореф. дис. СПбГУ, 2001. 21 с.
9. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Токарев А.Д., Корья Т. // Изв. РАН. Физика Земли. 2002. № 11. С. 54–68.
10. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н. и др. // Изв. РАН. Физика Земли. 1998. № 8. С. 3–32.
11. Weidelt P. // Z. Geophys. 1972. Bd. 38. H. 2. S. 257–290.
12. Николаевский В.Н. // Изв. РАН. Физика Земли. 1996. № 4. С. 41–50.
13. Кременецкий А.А., Икорский С.В., Каменский И.Л., Сазонов А.М. Кольская сверхглубокая (научные результаты и опыт исследований). М.: ТЕХНОНЕФТЕГАЗ, 1998. 260 с.
14. Cermak V., Lastovickova M. // Pure and Appl. Geophys. 1987. V. 125. P. 255–284.
15. Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. // ДАН. 2000. Т. 371. № 2. С. 235–239.