

А. А. Ковтун, И. Л. Варданянц

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МАНТИИ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОВМЕСТНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ГЛУБИННЫХ МТ- И ГЛОБАЛЬНЫХ МВ-ЗОНДИРОВАНИЙ

Введение

В работе проведено исследование глубинного распределения электропроводности мантии Фенноскандинавского щита по данным международного эксперимента BEAR. Для построения модели электропроводности использовались «продольные» амплитудные магнитотеллурические кривые, выходящие в области больших периодов на глобальную кривую магнитовариационного зондирования и фазовые кривые максимального импеданса, хорошо согласующиеся с глобальной фазовой кривой. Установлено, что до 100 км распределения, полученные при интерпретации двух типов кривых различны, но на глубинах более 100 км они практически совпадают, что дало возможность построить единую среднюю кривую распределения проводимости для мантии Фенноскандинавского щита. Кривая описывает глубинное распределение проводимости на всем Фенноскандинавском щите за исключением областей в северной части Ботнического залива и на Беломорском блоке. Градиент проводимости имеет особенности на первых 100–200 км мантии. В интервале 200–600 км градиент меняется незначительно и снова увеличивается с глубины 700 км. На глубине около 1000 км намечается максимум проводимости. Для увеличения достоверности полученных результатов необходимо повышение качества МВ- и МТ-зондирований в области суточных вариаций.

Выбор амплитудных и фазовых кривых для их последующей интерпретации

Для исследования глубинного распределения электропроводности мантии Фенноскандинавского щита был выполнен анализ данных международного эксперимента BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research), проведенного летом 1998 г., в котором принимал участие Санкт-Петербургский государственный университет. В ходе эксперимента были выполнены синхронные магнитотеллурические (МТ) зондирования в интервале периодов от 10 с до суток в 45 пунктах Фенноскандинавского щита. Расположение пунктов зондирования представлено на рис. 1. Там же показаны основные тектонические границы, главными из которых являются границы между Свекофенским геоблоком на юго-западе и Карельским на северо-востоке, между Беломорским на востоке и Карельским геоблоками и граница, отделяющая Каледониды на западе от Свекофенского геоблока на востоке. Главной целью анализа является изучение строения верхней мантии и переходной области в интервале глубин 100–700 км. Обработка полевых записей проведена И. М. Варенцовым и М. Ю. Смирновым [9].

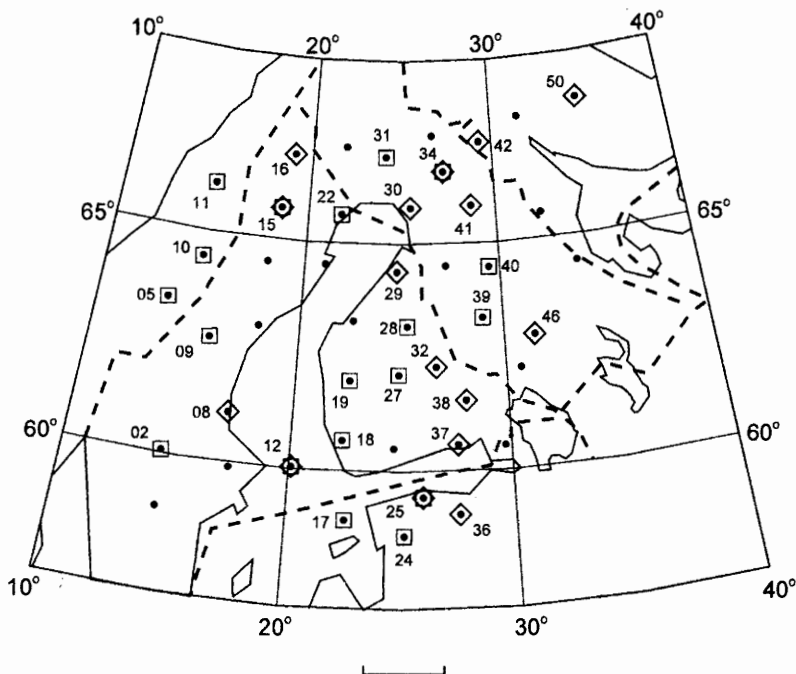


Рис. 1. Расположение пунктов зондирования BEAR.

Черные точки — пункты BEAR; ромбы — пункты, где интерпретировались «продольные» кривые, квадраты — фазовые; пунктир — границы геоблоков

В основе проведенного исследования лежит применяемый нами ранее и показавший свою эффективность подход, основанный на том, что наименее искаженную неоднородностью верхней части разреза информацию о глубинном разрезе несут «продольные» кривые, близкие к кривой глобального магнитовариационного зондирования (ГМВЗ) в области больших периодов. В квазидвумерных случаях «продольной» кривой является либо минимальная, либо максимальная кривая. В общем случае аналогами этих кривых являются инвариантные кривые Эггерса [6]. Анализ поведения различных инвариантов тензора импеданса показал, что даже в типично трехмерных случаях кривые, соответствующие одному из инвариантов Эггерса, во многих случаях хорошо согласуются с ГМВ-кривой. В качестве данных ГМВЗ была использована наиболее устойчивая выборка, согласующаяся с использованной нами ранее [5]. Мы отказались от других вариантов кривых ГМВЗ, например, дополненных спутниковыми данными или данных В. Ю. Семенова [8], полученных по записям в отдельных обсерваториях, расположенных на Восточно-Европейской платформе, но на тысячи километров южнее Балтийского щита. Кривая ГМВЗ, выбранная нами, захватывает интервал периодов от суточных гармоник до полугодовой ($10^4 - 10^7$ с). Перекрывание интервалов периодов данных BEAR и данных ГМВЗ в области суточных вариаций позволяет надеяться на получение надежных результатов для глубин 200–700 км.

Наряду с этими кривыми были использованы фазовые кривые максимального импеданса, которые при любой размерности неоднородной среды выходят на нормальный

уровень в области больших периодов. Если взять в качестве «нормального» уровня кривую ГМВЗ, то, начиная с некоторой глубины, определяемой горизонтальной неоднородностью верхней части разреза, мы должны получить распределение, совпадающее с распределением, полученным по «продольным» кривым. Результаты такого подхода были представлены в наших работах [2, 4]. В большей части пунктов фазовые кривые максимального импеданса хорошо согласуются с фазовой кривой ГМВЗ в области суточных вариаций, и только в отдельных районах это согласие нарушается. Особенно ярко это проявляется в пунктах, расположенных вдоль Ботнического залива, что может быть связано с существенной неоднородностью коры, а, возможно, и мантии в этих областях.

Интерпретация кривых

Одномерная интерпретация кривых проводилась по программе Л. Н. Пороховой и М. М. Харламова, алгоритм которой основан на методе эффективной линейаризации (МЭЛ) [7]. Качество интерпретации оценивается величиной невязки между экспериментальными данными и полученным решением, а также характеристиками решения, построенного в рамках модели градиентной среды — интервалом сглаживания и погрешностью. Интервал сглаживания определяет разрешающую способность электромагнитного метода при оценке распределения удельного сопротивления по вертикали, а погрешность — устойчивость полученного решения к случайным ошибкам в данных [3]. Совместная интерпретация позволила повысить разрешающую способность данных на глубинах 200–700 км почти в два раза. Погрешность решения определяется погрешностью экспериментальных данных. На периодах до 2000 с, обеспечивающих определение проводимости на глубинах до 200–300 км, она не превышает для величины кажущегося сопротивления 5%. Истинных погрешностей данных ГМВЗ мы не знаем, поскольку, кроме погрешности обработки, в них включаются погрешности сферического анализа, проводимого, как правило, в рамках упрощенной модели источника в виде DR-токовой системы. Поэтому получаемые при интерпретации по МЭЛ оценки погрешности определения проводимости могут быть использованы только до глубин, не превышающих 300 км.

На новом этапе исследования результатов интерпретации «продольных» кривых и фазовых кривых максимального импеданса мы основное внимание обратили на качество интерпретации. Для анализа были выбраны только те пункты зондирования, в которых невязка интерпретации как фазовых, так и «продольных» кривых не превышала погрешности экспериментальных данных, что гарантировало нам отсутствие серьезного влияния горизонтальной неоднородности верхней части разреза в пунктах зондирования, а также выполнение амплитудно-фазовых соотношений, характерных для горизонтально-однородной среды. Выбранные для интерпретации «продольных» и фазовых кривых пункты указаны на рис. 1. Всего для интерпретации «продольных» кривых было взято 16 пунктов, а фазовых — 19. В четырех пунктах были проинтерпретированы как «продольные» кривые, так и фазы максимального импеданса. Таким образом, всего для анализа было использовано 35 кривых в 31 пункте, т. е. в 2/3 всех пунктов BEAR, распределенных на территории практически равномерно. В качестве «продольных» кривых использовались в основном кривые, соот-

ветствующие одному из инвариантов Эггерса [6], в некоторых случаях -- эффективные кривые.

Анализ результатов интерпретации МТ кривых эксперимента BEAR

На рис. 2 приведены кривые распределения удельной проводимости по глубине по результатам интерпретации фаз максимального импеданса (а) и «продольных» кривых (б). На рисунках показаны также средние кривые по пунктам и среднеквадратичное отклонение.

Наблюдаются две особенности в поведении распределений проводимости.

1. До глубины 100 км при интерпретации фазовых кривых получаются значения удельной проводимости большие, чем при интерпретация «продольных» кривых.

2. До 300 км расхождение кривых распределения проводимости, полученных по «продольным» кривым, значительно больше, чем в случае фазовых кривых. Однако средние кривые распределения проводимости для обоих случаев, начиная с 100–150 км, практически совпадают. На рис. 3 приведены средние кривые для обоих случаев, а также средняя кривая для всех 31 пунктов. Видно, что в интервале глубин 100–900 км кривые распределения, полученные по «продольным» и фазовым кривым, практически совпадают и не выходят за пределы среднеквадратичного отклонения общей кривой.

Интересно сопоставить полученную кривую для Фенноскандинавского щита с распределением, принятым нами как «нормальное» для восточной части Фенноскандии, полученное по результатам интерпретации данных МТЗ, выполненных в интервале периодов 10^{-3} – 10^4 с на Центрально-Карельском блоке (ЦКБ) и глобальной кривой. Этой кривой ранее было условно присвоено название «нормальной кривой, отвечающей холодной и сухой мантии». Обе кривые представлены на рис. 4. Видно, что проводимость верхней части Фенноскандинавского щита значительно выше, чем проводимость ЦКБ. Начиная с 200 км обе кривые сближаются.

На средней кривой проводимости Фенноскандинавского щита трудно выделить какие-либо особенности в строении верхней мантии, в частности, положение астеносферы и особенности в зоне фазовых переходов. Некоторые особенности распределения проводимости мантии можно проследить по поведению величины $\gamma = d \ln \sigma / dz$, характеризующей изменения относительного градиента проводимости по глубине. Поведение γ представлено на рис. 5. Величина γ в принципе может характеризовать изменения физического и химического состава верхней мантии. Учитывая слабую разрешающую способность электромагнитных методов в области больших глубин, не следует ожидать больших изменений этой величины. На рис. 5 представлено поведение величины $\gamma = d \ln \sigma / dz$, характеризующей изменения относительного градиента проводимости по глубине. Эта величина в принципе может отражать изменения физического и химического состава верхней мантии. Однако, учитывая слабую разрешающую способность электромагнитных методов в области больших глубин, не следует ожидать больших изменений этой величины.

На первых 150 км наблюдается быстрый рост γ . Максимальное значение γ имеет на глубине 150 км (0.016 км^{-1}). Далее γ уменьшается, что говорит об изменении характе-

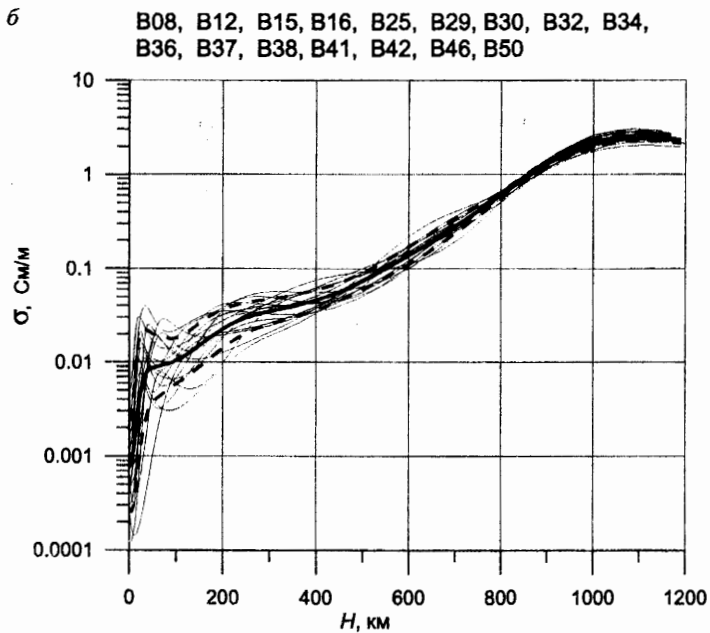
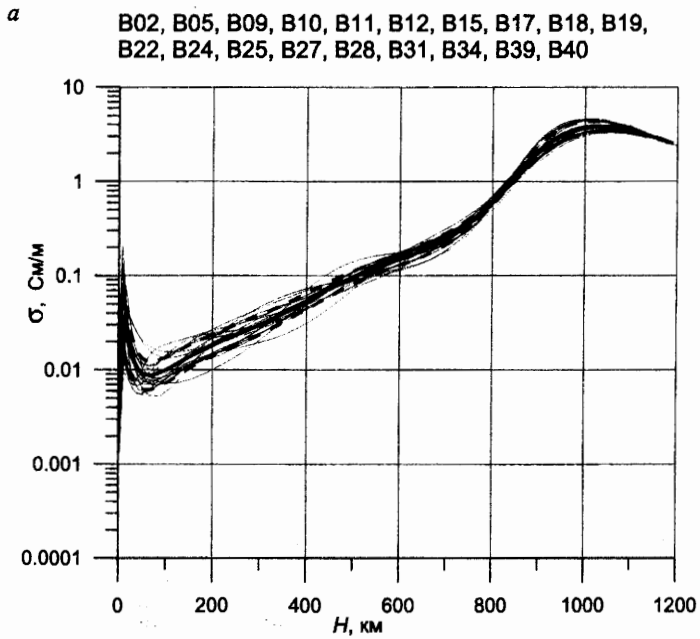


Рис. 2. Распределение удельной проводимости по глубине на Фенноскандинавском щите по результатам 1D-интерпретации: *a* — фазовых кривых максимального импеданса, *б* — «продольных» кривых; жирная линия — среднее значение; пунктир — среднее квадратичное отклонение

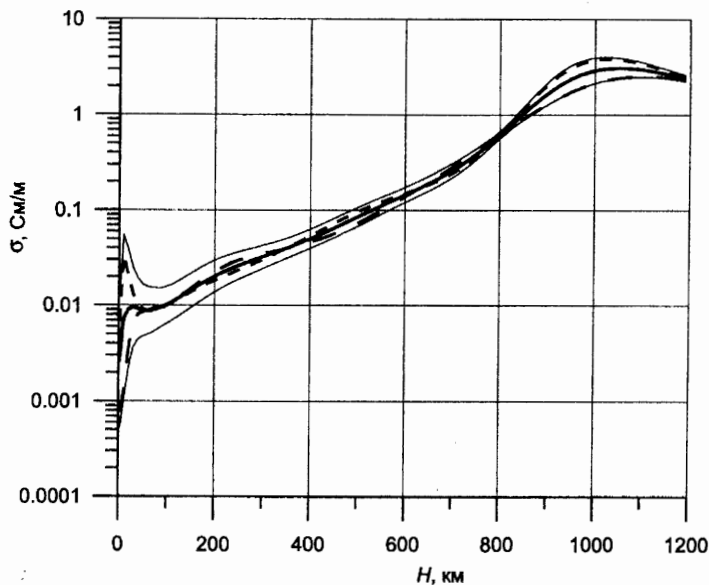


Рис. 3. Среднее распределение удельной проводимости по глубине на Фенноскандинавском щите по результатам 1D-интерпретации.

Мелкий штрих — фазовые кривые максимального импеданса; крупный штрих — «продольные» кривые; жирная линия — фазовые и «продольные» кривые; тонкая линия — среднее квадратичное отклонение для общей кривой

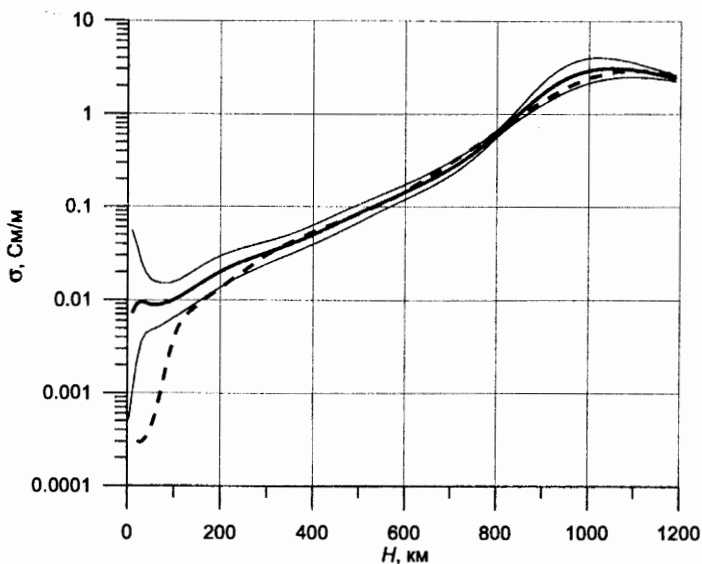


Рис. 4. Сравнение среднего распределения удельной проводимости по глубине на Фенноскандинавском щите (сплошная линия) и на Центрально-Карельском блоке (пунктир); тонкие линии — среднее квадратичное отклонение для кривых Фенноскандинавского щита

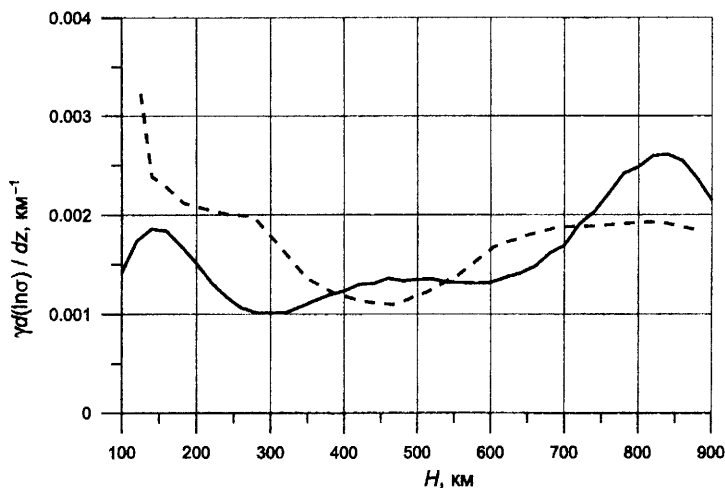


Рис. 5. Логарифмическая производная удельной электропроводности по глубине. Сплошная линия — Фенноскандинавский щит; пунктир — Центрально-Карельский блок

ра носителей зарядов. Скорее всего, это уменьшение обусловлено переходом к ионному типу проводимости, рост которой замедляется с увеличением давления. Уменьшение γ продолжается до 0.012 км^{-1} на глубине 300 км. Глубина от 180 до 300 км характеризуется минимальным ростом проводимости, что может быть связано с переходом к веществу с повышенной пластичностью и минимальной зависимостью от давления. Возможно, это и есть признак астеносферы на Фенноскандинавском щите. Начиная с глубины 300 км, наблюдается рост γ до 2.02 км^{-1} на глубине 800 км. Существенный рост γ после 500 км, возможно, обусловлен уже изменением химического состава мантии, имеющим место на глубине около 670 км. Вследствие фазовых переходов в пиролитовой мантии на этой глубине оливин, составляющий около 60% пиролитовой мантии, переходит в модифицированный пироксен (перовскит) и окись магния и железа (магнеюстит).

Конечно, эти заключения нуждаются в дополнительных исследованиях. В первую очередь необходимо провести районирование Фенноскандинавского щита по поведению величины γ , полученной для каждого пункта в отдельности и выявить стабильность полученной характеристики в каждом из выделенных районов. Естественно, в отмеченных интервалах глубин 50–150, 150–300 и 400–800 км, в каждой из выделенных областей с одним возрастом коры и одинаковым тектоническим путем развития, эти характеристики должны мало различаться, что и послужит гарантией правильности предложенной трактовки.

Второй момент, который требует серьезной доработки, — это более тщательный отбор и повышение качества глубинных магнитовариационных данных. Влияние различия МВ-данных, несомненно, проявляется на поведении распределения проводимости мантии на глубинах от 300 до 800 км.

Для примера рассмотрим, как будут отличаться распределения проводимости в этом интервале глубин, если использовать кривую ГМВЗ Ю. В. Семенова [8], построенную

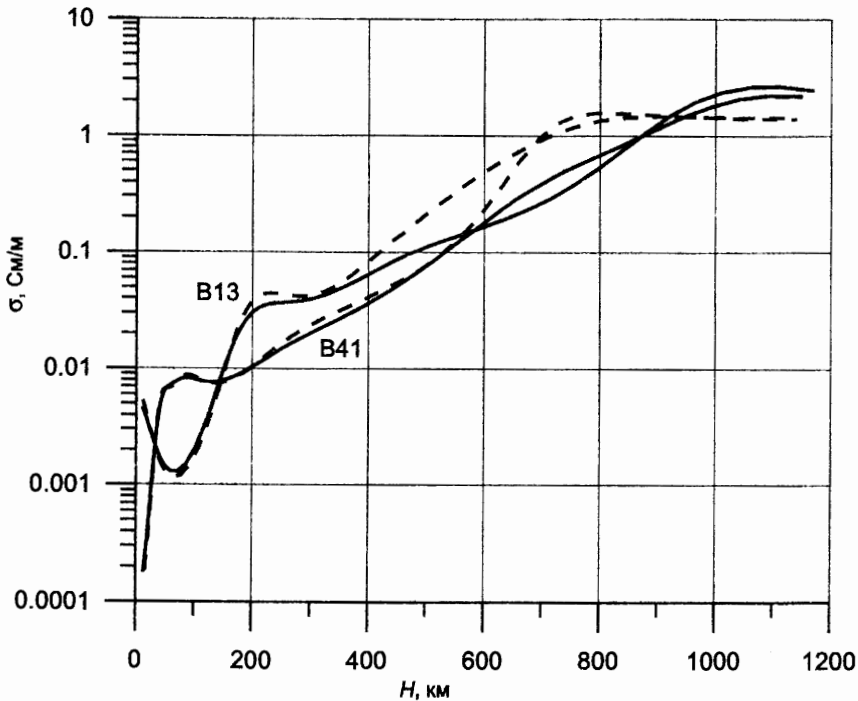


Рис. 6. Сравнение на примере пунктов В13 и В41 распределения удельной проводимости по глубине по результатам совместной интерпретации с использованием выборки данных ГМВЗ, принятой в нашей работе (сплошная линия) и данных из работы Ю. В. Семенова (пунктир)

по данным одиннадцати Европейских обсерваторий в интервале периодов от суток до 11 лет. На рис. 6 приведены результаты совместной интерпретации кривых в пунктах В13 и В41, расположенных в восточной части Фенноскандинавского щита, с данными ГМВЗ, использованными в нашей работе и с данными Ю. В. Семенова. Для корректности сравнения данные Ю. В. Семенова были также ограничены полугодовым периодом. Сравнение показывает, что до глубины 400 км полученные распределения практически не различаются, но с 400 км сопротивление, полученное по кривой Ю. В. Семенова, уменьшается быстрее, а минимум сопротивления смещается на глубину 800–900 км. Это сравнение показывает, насколько велико влияние изменений в глобальных данных на результаты совместной интерпретации в интересующем нас интервале глубин.

Указатель литературы

1. Ваньян Л. Л., Бердичевский М. Н., Васин Н. Д. О нормальном геоэлектрическом разрезе // Известия АН СССР. Физика Земли. 1980. С. 73–76.
2. Ковтун А. А., Порохова Л. Н., Чичерина Н. Д. Совместная интерпретация магнитотеллурических и глобальных магнитовариационных данных в рамках сферической модели Земли // Вопросы геофизики. Л., 1977. Вып. 26. С. 146–153.
3. Ковтун А. А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы. Л., 1989.

4. Ковтун А. А., Вагин С. А., Варданянц И. Л., Легенькова Н. П., Смирнов М. Ю., Успенский Н. И. Анализ магнитотеллурических и магнитовариационных результатов в интервале периодов суточных вариаций по данным BEAR и определение «нормального» разреза Балтийского щита // Известия РАН. Физика Земли. 2002. № 11. С. 34–53.
5. Ротанова Н. Н., Фискина М. В., Захарова О. К. Экспериментальные данные по глобальному магнитовариационному зондированию // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. № 1.
6. Eggers D. E. An Eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor // Geophysics. Vol. 47. N 8. 1982. P. 1204–1214.
7. Porokhova L. N., Kharlamov M. M. The solution of the one-dimensional inverse problem for induction sounding by an efficient linearization technique // Earth and Planet. Inter. 60, 1990. P. 68–79.
8. Semenov V. Yu. Regional conductivity structures of the Earth's mantle // Publications of the institute of geophysics polish academy of sciences. Warszawa 1998.
9. Smirnov M. Yu., Varentsov I. M. The BEAR Working Group. Approaches to derive consistent averages from multi-team MT and GDS transfer function estimates in the BEAR project. Proc. of 5th SVEKALAPKO Workshop. Univ. of Oulu. Dept. of Geoph. Rep. 23. 2000. P. 82.