

ОПОРНАЯ МТ КРИВАЯ И ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АСТЕНОСФЕРЫ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

Варданыц И.Л., Ковтун А.А.

Институт физики СПбГУ, Санкт-Петербург

Аннотация. При анализе и интерпретации данных МТ зондирования очень важно знать уровень не смещенных вследствие влияния неоднородностей верхней части коры значений МТ поля в области Sq вариаций, которые могли бы служить опорными значениями. Для построения опорной кривой для Фенноскандинавского щита были использованы данные эксперимента BEAR в интервале периодов от 10 до 10^5 с и МВ кривая В.Ю. Семёнова. Фазовые опорные значения для первых четырех гармоник суточных вариаций были определены как среднее фаз максимального импеданса тех пунктов BEAR, где они хорошо согласовались с фазовой МВ кривой Семёнова. Амплитудная кривая получена по результатам совместной интерпретации средних фазовых значений BEAR и амплитудно-фазовой кривой Семёнова при $\sqrt{T} > 417 \text{ с}^{1/2}$. Полученные значения фаз и кажущегося сопротивления были приняты в качестве опорных. Эти значения могут быть использованы в дальнейшем для выявления искажений, вызванных статическим эффектом на территории Фенноскандинавского щита. Интерпретация «продольных» и фазовых кривых BEAR совместно с построенными опорными значениями в интервале Sq вариаций и МВ кривой Семёнова позволило нам выявить положение астеносферы и её геоэлектрические характеристики на Фенноскандинавском щите.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, магнитовариационное зондирование, параметры астеносферы, Фенноскандинавский щит.

В ходе международного эксперимента BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research), проведенного летом 1998 г., были выполнены синхронные МТ зондирования в интервале периодов от 10 с до суток в 46 пунктах Фенноскандинавского щита. Одной из центральных задач эксперимента являлось определение положения и геоэлектрических параметров астеносферы Фенноскандинавского щита [1]. К настоящему времени уже имеется ряд публикаций, где сделаны выводы о возможной глубине залегания астеносферы в отдельных пунктах BEAR, но параметры астеносферы, её сопротивление и мощность, остаются малоизученными [2, 3, 4].

В настоящей статье мы подводим итог работам, в которых, используя данные BEAR, удается сделать выводы о мощности литосферной плиты и геоэлектрических параметрах астеносферы, привлекая магнитовариационные (МВ) данные.

Для глубинных магнитотеллурических исследований нами ранее был предложен квазидвумерный подход, основанный на выделении так называемых «продольных» кривых, которые в двумерном случае не искажены влиянием коровых неоднородностей и выходят в области больших периодов на кривую глобального магнитовариационного зондирования (ГМВЗ) [5]. При анализе данных BEAR мы убедились, что наряду с «продольными» кривыми, целесообразно использовать фазовые кривые максимального импеданса, поскольку в области больших периодов они практически не искажены влиянием неоднородности коры. Этот подход был применен нами к интерпретации данных BEAR в ряде работ [2, 6, 7, 8, 9].

Для решения этой задачи на Фенноскандинавском щите необходимо иметь уверенные МТ данные в области суточных вариаций, а при проведении совместной интерпретации МТ и МВ данных желательно иметь МВ данные в интервале Sq вариаций, полученные для той же территории, где проводились МТ зондирования. МВ кривые не имеют статического сдвига и поэтому могут служить репером при оценке влияния коровых неоднородностей на поведение МТ кривых в области больших периодов, несущих информацию о больших глубинах. Отсутствие МВ данных в интервале суточных вариаций для Фенноскандинавского щита привело к необходимости построить опорную МТ-кривую, эквивалентную не смещенной неоднородностью коры МВ-кривой.

Эксперимент BEAR, проводимый в течение полутора месяцев, не позволил получить уверенные МТ данные в области Sq вариаций во всех 46-ти пунктах. Поэтому в работе [9] основное внимание было обращено на качество опорной глобальной МВ кривой и усиление МТ данных BEAR в области

суточных вариаций путём построения средней кривой по данным BEAR. Как и в предшествующих работах, в основу построения модели глубинного распределения электропроводности мантии положена одномерная интерпретация «продольных» амплитудных кривых ρ_T и фазовых кривых максимального импеданса φ_T , которые в области суточных вариаций несут наименее искажённую неоднородностью верхней части разреза информацию о глубинном разрезе. В двумерных и квазидвумерных случаях в качестве «продольной» кривой выбиралась минимальная или максимальная кривая, которая в области больших периодов приближается к глобальной МВ кривой. В общем случае аналогами этих кривых являются кривые инвариантов Эггерса [10]. Для дальнейшего исследования были отобраны кривые φ_T в 14-х пунктах и кривые ρ_T в 16-ти пунктах.

Для одномерной интерпретации, как и в предшествующих работах, была использована программа Л.Н. Пороховой и М.М. Харламова [11], алгоритм которой основан на методе эффективной линеаризации (МЭЛ). Для получения более детального распределения сопротивления на глубинах до 400 км необходима совместная интерпретация «продольных» или фазовых кривых максимального импеданса с опорной глобальной МВ кривой. Ранее мы использовали для этого выборку ГМВЗ из работы Н.М. Ротановой [12]. Однако значения этой выборки, особенно фазовые данные, имеют большой разброс при $\sqrt{T} > 300 \text{ с}^{1/2}$, что ограничивает точность совместной интерпретации. Поэтому в этой работе особое внимание было уделено анализу данных ГМВЗ, используемых для совместной интерпретации с данными BEAR.

С этой целью мы провели сравнение данных ГМВЗ разных авторов в диапазоне Sq и DR вариаций: данные из работы Н.М. Ротановой [12], кривую для центральной Европы В.Ю. Семёнова [13] и кривую для Европы Н. Олсена [14]. Из сравнения приведенных МВ кривых был сделан вывод, что наилучшим образом для совместной интерпретации данных BEAR подходит кривая Семёнова, где даны значения ρ_T и φ_T для интервала от $\sqrt{T} = 120 \text{ с}^{1/2}$ до $\sqrt{T} = 7750 \text{ с}^{1/2}$, полученные по данным МВЗ четырёх обсерваторий Центральной Европы. Начиная с $\sqrt{T} = 417 \text{ с}^{1/2}$ кривая Семёнова позволяет обеспечить хорошую стыковку с кривыми BEAR.

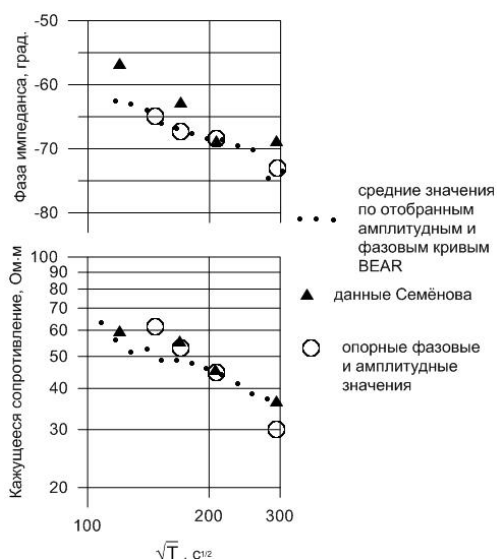


Рис. 1.

Рассмотрим подробнее наиболее важный для согласования кривых интервал Sq вариаций (рис.1), где черными точками показаны средние по отобранным кривым значения фаз и амплитуд BEAR, а черными треугольниками – данные Семёнова. Видно, что в области периодов Sq вариаций значения фаз данных Семёнова завышены по сравнению со средней кривой BEAR. Скорее всего, это различие вызвано тем, что магнитотеллурические параметры в этом интервале периодов носят еще региональный характер. Поэтому в качестве опорных данных при интерпретации выбранных фазовых кривых BEAR использовалась амплитудно-фазовая кривая Семёнова начиная только от $\sqrt{T} = 417 \text{ с}^{1/2}$, а за опорные фазовые данные в интервале Sq вариаций были взяты средние фазовые данные BEAR для соответствующих гармоник (кружки).

Сложнее обстоит дело с построением амплитудной опорной кривой в интервале суточных вариаций эквивалентной глобальной МВ кривой, не искаженной поверхностными неоднородностями, т.к. средняя амплитудная кривая в этом интервале была построена по недостаточному числу точек. Поэтому на этом участке опорные амплитудные данные были определены по результату совместной интерпретации средней МТ фазовой кривой BEAR и амплитудно-фазовой кривой ГМВЗ Семёнова начиная с $\sqrt{T} = 417 \text{ с}^{1/2}$. Эти значения амплитуд и фаз в области Sq вариаций показаны на рис.1 кружками. Полученный участок амплитудной кривой идёт ниже точек МВ кривой по данным Ротановой, используемых в наших предшествующих работах. Опорные значения амплитуд и фаз в области Sq вариаций приведены в таблице. Вместе с МВ данными Семёнова начиная с $\sqrt{T} > 400 \text{ с}^{1/2}$ они составляют опорные кривые, перекрывающие диапазон от $\sqrt{T} = 100 \text{ с}^{1/2}$ до $\sqrt{T} = 7750 \text{ с}^{1/2}$.

Каждая из отобранных 16-ти амплитудных и 14-х фазовых кривых BEAR была проинтерпретирована совместно с этими опорными кривыми.

На рис. 2 приведены кривые распределения удельного сопротивления по глубине по результатам совместной интерпретации "продольных" (а) и фазовых (б) кривых. Видно, что поведение средней кривой распределения удельного сопротивления (жирная линия) в этих группах практически не различается.

Таблица. Опорные значения ρ_T и φ_T в области Sq вариаций

$\sqrt{T}, c^{1/2}$	146	173	206	304
Arg Z, град	-65,0	-67,3	-68,5	-73,5
ρ_T , Ом.м	60,8	52,8	45,0	28,9

На рис.3 показаны средние кривые для каждой группы ("продольная"- сплошная, фазовая – пунктир). Отчётливо выделяется участок в интервале от 200 до 350 км, где удельное сопротивление меняется в пределах 20-40 Ом.м. По данным

работы японских геофизиков [15] эти значения сопротивления соответствуют сопротивлению частично расплавленной ультраосновной породы верхней мантии при 2-3% расплава, что позволяет трактовать этот слой как астеносферу.

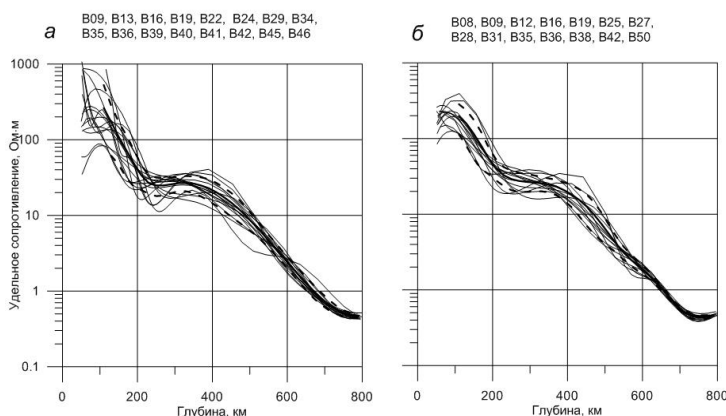


Рис. 2.

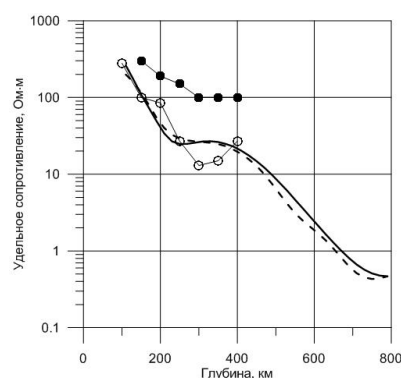


Рис.3.

На некоторых кривых рис. 2 наблюдается минимум с последующим выходом на сопротивление, близкое к 40 Ом.м и дальнейшее его уменьшение до 1 Ом.м на глубинах больших 500 км. Это уменьшение сопротивления обычно связывают с фазовыми переходами в породах верхней мантии. Если верно предположение о том, что участок на глубинах от 180 до 350 км является астеносферой, то нижняя граница ее очень близко расположена к области фазовых переходов, что и затрудняет выделение астеносферы на Фенноскандинавском щите. По кривым, представленным на рис.2 во всех пунктах были определены глубина залегания верхней кромки астеносферного слоя и примерное значение минимального сопротивления слоя. Астеносфера обладает достаточно однородным строением. В среднем глубина залегания верхней кромки слоя близка к 200 км, а сопротивление меняется в пределах 40-20 Ом.м, что соответствует 1-2% расплава. В десяти пунктах удалось оценить мощность астеносферного слоя, которая оказалась равной 130-150 км.

Если исходить из природы астеносферы как слоя, находящегося в состоянии частичного расплава, то условие его образования, как показано в работе [15], определяется отношением $T/T_{\text{п}}$, где $T_{\text{п}}$ - температура солидуса (начала плавления). Эксперимент, описанный в работе [15] при давлениях 0,5 ГПа и 1 ГПа показал, что вид зависимости сопротивления породы от величины $T/T_{\text{п}}$ при этом не изменился, что позволяет надеяться на сохранение этой зависимости вплоть до давлений, которые имеют место на глубинах 200-300 км., где породы ещё не подверглись серьезным фазовым перестройкам. Опираясь на данные геотермики [16], и зависимость сопротивления от $T/T_{\text{п}}$ [15], была произведена оценка распределения сопротивления в мантии Фенноскандинавского щита на глубинах 100-400 км для двух вариантов распределения температуры по глубине: T_{max} и $T_{\text{ср}}$. Полученное распределение сопротивления показано на рис.3: T_{max} - белые кружки и $T_{\text{ср}}$ - черные кружки. Видно, что распределение, соответствующее T_{max} , близко к среднему распределению удельного сопротивления, полученному по данным BEAR. Глубины, на которых сопротивление близко к 40-20 Ом.м, действительно попадают в область частичного расплава при взятом распределении температуры мантии и температуры плавления. В дальнейшем будем полагать, что глубины, на которых значения сопротивлений лежат в интервале 40-20 Ом.м на Фенноскандинавском щите соответствуют веществу с 1-2% расплава и по своим физическим свойствам могут быть отнесены к астеносферному слою. Отметим, что эту гипотезу может

опровергнуть или подтвердить только новый эксперимент, аналогичный японскому, но проведенный при давлении 10 ГПа.

Полученные опорные значения кажущегося сопротивления в интервале Sq вариаций хорошо согласуются со средними результатами девятимесячного эксперимента ЕММА, проведенного вблизи точки В46 [17], что подтверждает их надежность. Опорная кривая может быть использована при интерпретации результатов МТ зондирований на Фенноскандинавском щите с целью устранения электростатического смещения.

1. Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., Пушкарёв П.Ю. Астеносфера в свете магнитотеллурических данных. Электронный научно-информационный журнал «Вестник ОГГГГН РАН» №12(17), 2000.

2. Ковтун А.А., Вагин С.А., Варданыц 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.

3. Korja T., Kaikkonen P., Lahti I., Pedersen L.B., Smirnov M.Yu., Vaitinen K., BEAR WG,EMTESZ WG., Electrical conductivity of upper mantle in Fennoscandia. In: Lithosphere 2006 – fourth symposium on the structure, composition and evolution of the lithosphere in Finland. 2006. University of Helsinki, Report S-46.

4. Lahti I., Korja T., Kaikkonen P., Vaitinen K., BEAR WG. Decomposition analysis of the BEAR magnetotelluric data: Implication for the upper mantle conductivity in the Fennoscandian Shield. 2005. Geophys. J. Int. 163 P.900-914.

5. Ковтун А.А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы. Л.:ЛГУ, 1989, 284 с.

6. Ковтун А.А., Варданыц И.Л., Электропроводность мантии Фенноскандинавского щита. В кн.: Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах. Часть 1. Материалы международного совещания. Апатиты 2005 г. С. 161-172.

7. Ковтун А.А., Варданыц И.Л., Легенькова Н.П. Влияние коровых аномалий электропроводности на поведение магнитотеллурического поля на Фенноскандинавском щите.// Вопросы Геофизики. СПб., 2008, Вып.40 . С. 24-43.

8. Ковтун А.А., Варданыц И.Л., Электропроводность мантии Фенноскандинавского щита по результатам совместной интерпретации данных глубинных МТ- и глобальных МВ-зондирований. // Вопросы Геофизики. СПб., 2008, Вып.41 . С. 112-120.

9. Варданыц И.Л., Ковтун А.А. Исследование возможности присутствия астеносферы на территории Фенноскандинавского щита по данным «BEAR». В кн. Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов. Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции. Апатиты 2009 г., С. 15-18.

10. Eggers D.E. An Eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor. Geophysics. Vol. 47, No 8, 1982, p. 1204-1214.

11. 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.

12. Ротанова Н.Н., Фискина М.В., Захарова О.К. Экспериментальные данные по глобальному магнитовариационному зондированию// Геомагнетизм и аэрономия, 1986, Т.26. №1.

13. Semenov V.Yu. Regional conductivity structures of the Earth's mantle. Publications of the institute of geophysics polish academy of sciences. Warszawa 1998. 120 p.

14. Olsen N. The electrical conductivity of the mantle beneath Europe derived from C – responses from 3 h to 720 h // Geophys. J. Int. 1998, V.133, P. 298-308.

15. Sato, H., Sacks, S.I. And Murase, T., 1989, The use of laboratory velocity data for estimating temperature and partial melt fraction in the low-velocity zone; comparison with heat flow and electrical conductivity study: Journal of Geophysical Research, v. 94, p. 5689-5704.

16. Гордиенко В.В. Глубинные процессы в тектоносфере Земли. Нац. АН Украины.

17. Киев. 1998. 85 с.

18. Smirnov M.Yu., Korja T., Pedersen L.B. Electromagnetic mini array (EMMA) project in Fennoscandia looking into deep lithosphere. Proceedings of the 7th International Conference ROBLEMS OF GEOSMOS St. Petersburg, Petrodvorets May 26-30, 2006