

А. А. Ковтун, И. Л. Варданянц

ПАРАМЕТРЫ АСТЕНОСФЕРЫ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА ПО МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИМ ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА BEAR

В ходе международного эксперимента BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research), проведенного летом 1998 г., были выполнены синхронные магнитотеллурические (МТ) зондирования в интервале периодов от 10 с до суток в 46 пунктах Фенноскандинавского щита (рис. 1).

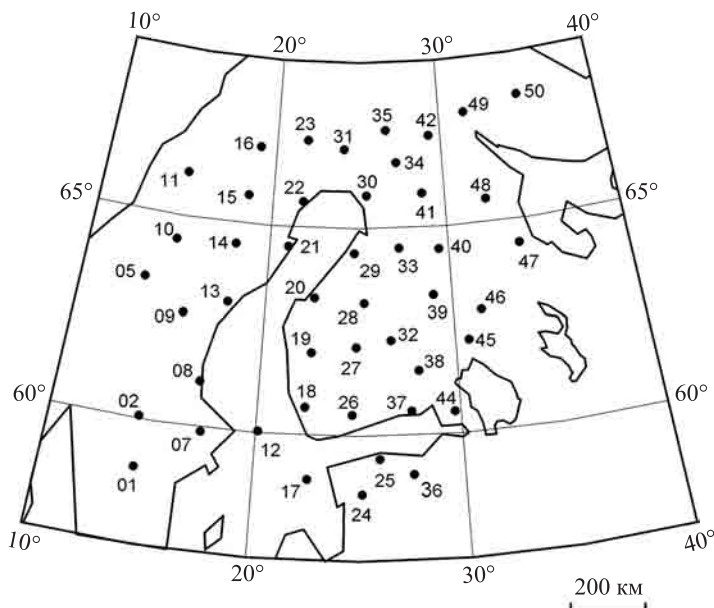


Рис. 1. Положение пунктов зондирования BEAR

С момента эксперимента BEAR прошло более 10 лет, однако интерес к МТ-данным, полученным в этом эксперименте, не убывает, поскольку некоторые вопросы строения Фенноскандинавского щита остаются нерешенными. Одной из центральных задач эксперимента являлось определение геоэлектрических характеристик астеносферы Фенноскандинавского щита. К настоящему времени в ряде публикаций сделаны выводы о возможной глубине залегания астеносферного слоя в отдельных точках BEAR [1–3].

В настоящей статье мы подводим итог серии работ, выполненных нами с 2002 по 2010 г., в которых, как нам представляется, удалось более уверенно сделать выводы о строении верхней мантии Фенноскандинавского щита и наметить пути дальнейшего улучшения возможностей магнитотеллурического метода при определении мощности литосферной плиты и геоэлектрических параметров астеносферы.

Для глубинных исследований нами ранее был предложен квазидвумерный подход [4], основанный на выделении так называемых «продольных» кривых, которые в дву-

мерном случае не искажены влиянием коровых неоднородностей и выходят в области больших периодов на глобальную магнитовариационную (МВ) кривую. При анализе данных BEAR мы убедились, что наряду с «продольными» кривыми целесообразно использовать фазовые кривые максимального импеданса, как обладающие наименьшими погрешностями в области больших периодов, вызванными влиянием неоднородности коры. Этот подход к одномерной интерпретации данных BEAR и был применен нами в ряде работ [5–8].

Первый вариант интерпретации «продольных» и фазовых кривых совместно с МВ-данными Н. М. Ротановой [9] для Sq -вариаций позволил выделить области понижения сопротивления, верхняя граница которых расположена на глубине от 80 до 200 км. Удельное сопротивление на этих глубинах колебалось в пределах 10–200 Ом·м. Эти первые результаты, опубликованные в работе [1], позволили высказать предположение, что выделенные области могут быть отнесены к астеносфере, но уверенно не отражают ее параметры — глубину залегания верхней кромки, мощность и сопротивление, хотя единственной трактовкой природы астеносферного слоя было существование частичного плавления вещества верхней мантии. Представлялось, что магнитотеллурические данные в интервале периодов от 10 до 10^5 с могли бы быть мощным оружием для выявления астеносферного слоя на Фенноскандинавском щите [10]. Однако влияние горизонтальной неоднородности коры Фенноскандинавского щита, выявленное ранее и в процессе работы с данными BEAR, существенно затруднило решение этой проблемы [6, 11].

При проведении совместной интерпретации магнитотеллурических и магнитовариационных данных желательнее иметь МВ-данные в интервале Sq -вариаций, полученные для той же территории, где проводились МТ-зондирования. Тогда, сопоставляя МТ- и МВ-данные в интервале Sq -вариаций, можно более достоверно оценить близость выделенных амплитудных кривых по величине статического сдвига между ними и амплитудной МВ-кривой. Точно также по степени близости фазовых МВ- и МТ-кривых можно понять, насколько они искажены поверхностными неоднородностями. МВ-кривые не имеют статического сдвига и поэтому могут служить репером при оценке смещения «продольных» кривых. Однако эксперимент BEAR, проводимый в течение полутора месяцев, не позволил получить МТ-данные в области Sq -вариаций во всех 46 пунктах. В таблице приведено число пунктов, где были получены оценки величины фазы импеданса для четырех главных гармоник суточных вариаций. Как видно из таблицы, статистическая значимость данных невелика, что приводит к увеличению погрешности при совместной интерпретации с МВ-данными фазовых и «продольных» МТ-кривых в этом интервале периодов.

Средние значения фазы импеданса в интервале суточных вариаций по данным BEAR

T , ч	Число пунктов	$\arg Z_{xy}$, град.	$\arg Z_{yx} - 180$, град.	Среднее по BEAR, град.	Среднее по ГМВЗ на 1989 г., град.
6	35	-65	-65	-65	-62
8	35	-64	-67	-65,5	-64
12	17	-67	-72	-69,5	-69
24	15	-68	-78	-73	-75

Поэтому в работе [7] для усиления опорной кривой нами использовалась вся МВ-кривая, включающая и данные, полученные по вариациям DR-тока с периодами до

полугода. В этой работе были получены результаты интерпретации 18 «продольных» и 16 фазовых кривых максимального импеданса, которые дали примерно одинаковые распределения удельной проводимости в интервале глубин от 100 до 1000 км. Средняя кривая по двум типам кривых (рис. 2) обладала одной особенностью: градиент проводимости по глубине (рис. 3) был минимальным в интервале глубин 180–300 км, область минимума градиента проводимости была отнесена к астеносфере.

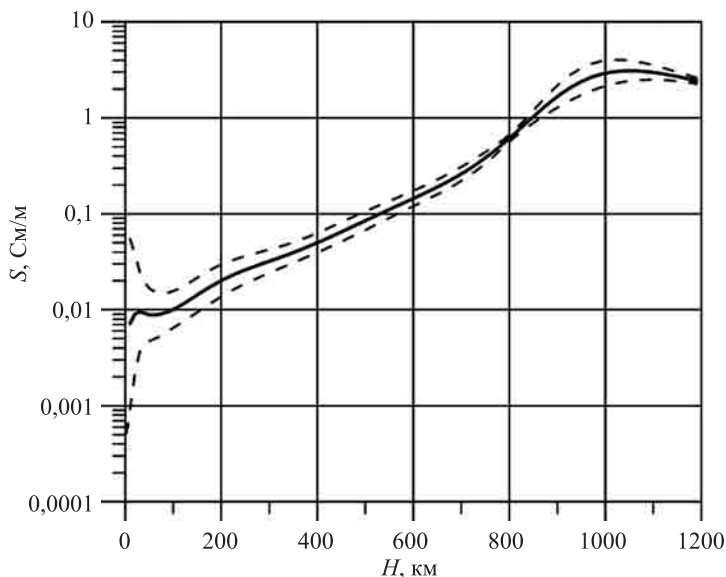


Рис. 2. Средняя кривая распределения удельной проводимости по глубине на Фенноскандинавском щите по данным работы [7]; жирная линия — средняя кривая, пунктир — доверительный интервал

В работе [8] основное внимание было обращено на качество опорной глобальной МВ кривой и усиление МТ-данных BEAR в области суточных вариаций путем построения средней кривой по данным BEAR. Остановимся на этой работе подробнее, поскольку предлагаемая в ней методика позволила более надежно определить строение верхней мантии Фенноскандинавского щита.

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 искаженную 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 [12]. Для дальнейшего исследования были отобраны кривые φ_T в 24 пунктах и кривые ρ_T в 25 пунктах (во втором случае в двух пунктах были взяты не кривые инвариантов Эггерса, а эффективные кривые). Для одномерной интерпретации была использована программа МЭЛ Л. Н. Пороховой и М. М. Харламова [13], алгоритм которой основан

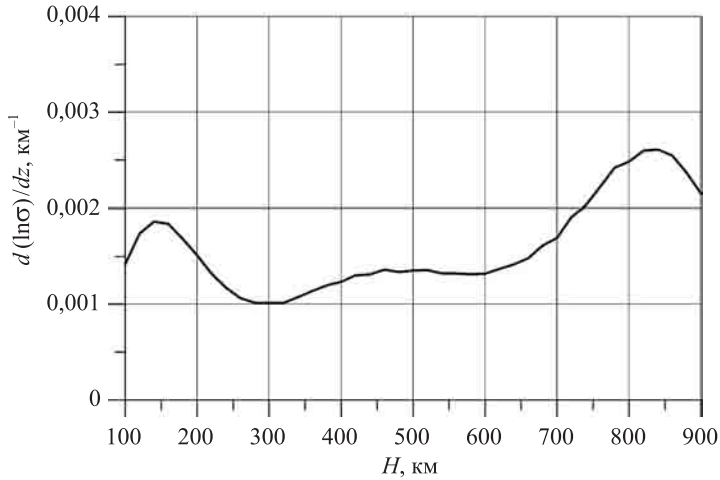


Рис. 3. Логарифмическая производная удельной проводимости по глубине

на методе эффективной линеаризации. 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 [9]. Однако значения этой выборки, особенно фазовые данные, имеют большой разброс, что ограничивает точность совместной интерпретации. Поэтому в этой работе особое внимание уделено анализу данных ГМВЗ, используемых для совместной интерпретации с данными BEAR.

С этой целью мы провели сравнение данных МВЗ разных авторов в диапазоне Sq - и Dst -вариаций: глобальные данные из работы Н. М. Ротановой [9], кривую для Центральной Европы В. Ю. Семёнова [14], и кривую для Европы Н. Ольсена [15]. Эти данные вместе с отобранными для последующей совместной интерпретации амплитудными и фазовыми кривыми BEAR приведены на рис. 4.

Из сравнения приведенных МВ-кривых разных авторов можно сделать следующие выводы. Фазовые значения данных Н. М. Ротановой, как уже говорилось, имеют слишком большой разброс. Кривые В. Ю. Семёнова и Н. Ольсена более гладкие. Однако при этом и амплитудная, и, особенно, фазовая кривые Н. Ольсена в области Sq -вариаций проходят выше кривых BEAR, что не позволяет получить плавную стыковку кривых и при интерпретации может вызвать появление ложных особенностей разреза. Наилучшим образом для совместной интерпретации подходит кривая В. Ю. Семёнова [16]. Значения ρ_T и φ_T для диапазона от $\sqrt{T} = 120 \text{ с}^{1/2}$ до $\sqrt{T} = 7750 \text{ с}^{1/2}$ были получены В. Ю. Семёновым по данным МВЗ четырех обсерваторий Центральной Европы. Начиная с $\sqrt{T} = 417 \text{ с}^{1/2}$, кривая В. Ю. Семёнова позволяет обеспечить хорошую стыковку с кривыми BEAR. Однако в области периодов Sq -вариаций значения фаз данных В. Ю. Семёнова завышены по сравнению с кривыми BEAR. Скорее всего, это различие вызвано тем, что магнитотеллурические параметры в этом диапазоне носят региональный характер. Поэтому в качестве опорной кривой при интерпретации выбранных кри-

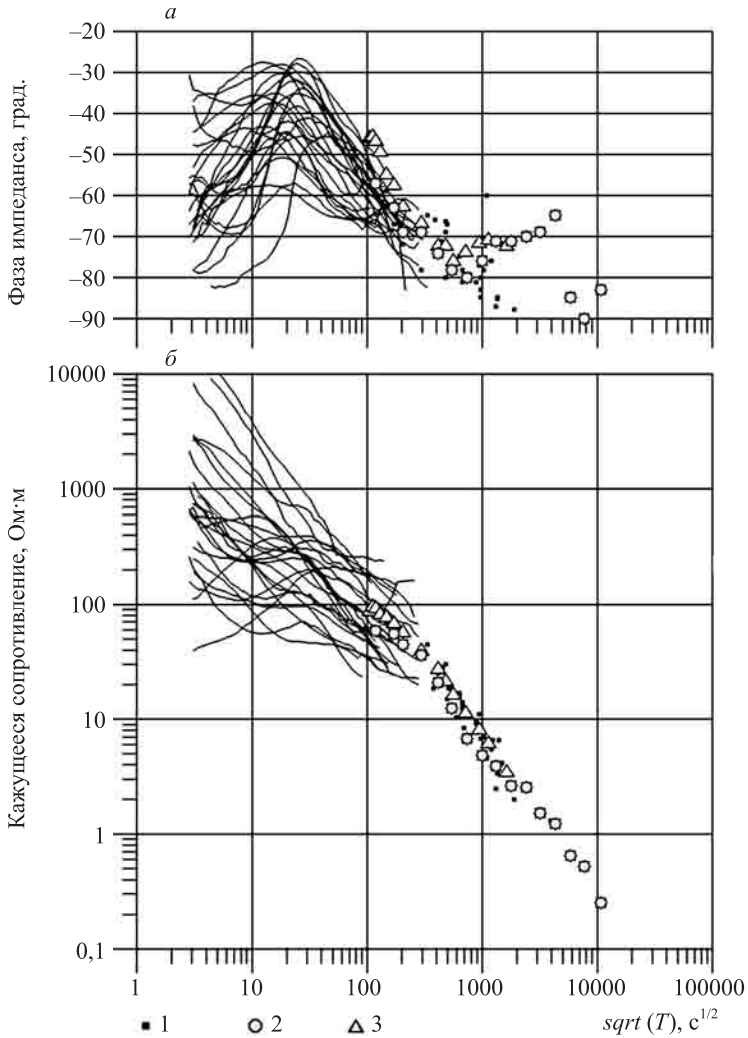


Рис. 4. Сравнение данных разных авторов в диапазоне периодов Sq - и Dst -вариаций: a — фаза импеданса; b — кажущееся удельное сопротивление
 1 — Н. Н. Роганова; 2 — В. Ю. Семёнов; 3 — Н. Ольсен; линии — кривые BEAR

вых BEAR использовалась кривая В. Ю. Семёнова, начиная только от $\sqrt{T} = 417 c^{1/2}$, а опорные данные в интервале Sq -вариаций определялись из данных BEAR.

Средние по отобраным кривым значения фаз максимального импеданса показаны на рис. 5, a черными точками. Интересно отметить, что к этой кривой близки средние значения $\arg Z_{xy}$ и $\arg Z_{yx} - 180^\circ$ по всем данным BEAR для гармоник суточной вариации, что ещё раз говорит о малом влиянии неоднородности коры на значения фаз в области больших периодов. Средние значения $\arg Z_{xy}$ и $\arg Z_{yx} - 180^\circ$ приведены

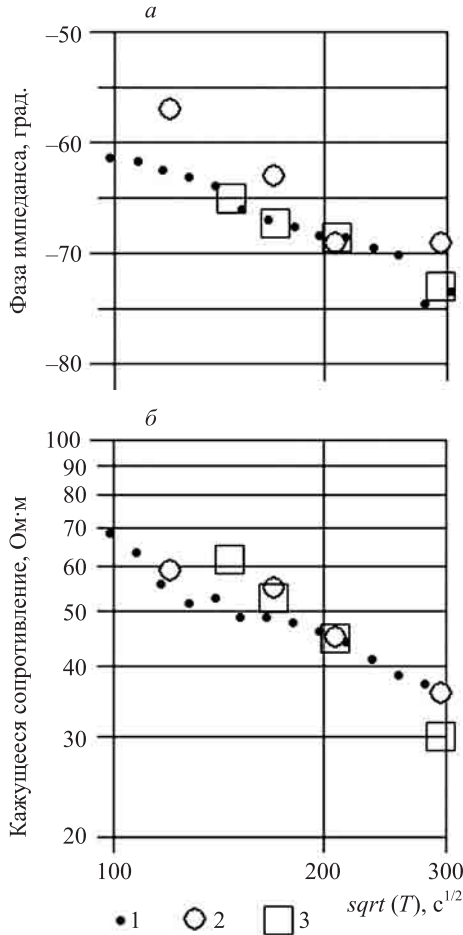


Рис. 5. Построение фазовой (а) и амплитудной (б) опорной кривой в области периодов Sq-вариаций по данным BEAR

1 — средние значения по отобранным амплитудным и фазовым кривым BEAR; 2 — данные В. Ю. Семёнова; 3 — опорные фазовые и амплитудные значения

в таблице. В таблице указано, сколько пунктов наблюдений было использовано для получения этих значений. Там же для сравнения приведены средние значения фаз, полученные по данным ГМВЗ для суточных вариаций, используемые нами в предшествующих работах. В дальнейшем мы использовали кривую фаз максимального импеданса, построенную по данным BEAR и амплитудно-фазовую кривую ГМВЗ Ю. В. Семёнова с $\sqrt{T} = 417 c^{1/2}$, тем самым мы увеличили область влияния непосредственно данных BEAR.

Несколько сложнее построение амплитудной кривой BEAR в интервале суточных вариаций эквивалентной глобальной МВ-кривой, не искаженной поверхностными неод-

нородностями. На рис. 5, б приведена средняя «продольная» амплитудная кривая по данным BEAR. Однако выбор «продольных» кривых, основанный на близости амплитудной кривой в области больших периодов к глобальной МВ-кривой, полностью не исключает смещения амплитудных кривых, а следовательно, не может дать уверенного замещения средней амплитудной МВ-кривой в интервале суточных вариаций. Как видно из таблицы, количество данных в этом интервале периодов мало. Поэтому на этом участке амплитудные данные кривые В. Ю. Семёнова были дополнены амплитудной кривой, построенной по результатам интерпретации средней МТ-фазовой кривой в интервале Sq -вариаций с амплитудно-фазовой МВ-кривой с $\sqrt{T} = 417 \text{ с}^{1/2}$. Эти значения амплитуд и фаз в области Sq -вариаций показаны на рис. 5 квадратами. Полученный участок амплитудной кривой проходит ниже точек МВ-кривой по данным [9], используемым в наших предшествующих работах, но он хорошо согласуется с МТ-данными В. Ю. Семёнова, полученными по европейским обсерваториям, которые показаны на рис. 5 кружками. Построенная опорная кривая плавно, без дополнительных перегибов, переходит в глобальную МВ-кривую, поскольку получена в результате совместной интерпретации фазовой кривой и глобальной МВ-кривой.

Таким образом, полученные опорные значения амплитуд и фаз в области Sq -вариаций вместе с МВ-данными Семёнова в диапазоне от $\sqrt{T} = 400 \text{ с}^{1/2}$ до $\sqrt{T} = 10800 \text{ с}^{1/2}$ составляют опорные кривые, перекрывающие диапазон от $\sqrt{T} = 100 \text{ с}^{1/2}$ до $\sqrt{T} = 10800 \text{ с}^{1/2}$.

Каждая из отобранных 25 амплитудных и 24 фазовых кривых BEAR была проинтерпретирована совместно с этими опорными кривыми. При этом некоторые амплитудные кривые подвергались незначительному сдвигу, чтобы обеспечить плавное перекрытие в области суточных вариаций. На рис. 6 приведены кривые распределения удельного сопротивления по глубине по результатам совместной интерпретации фаз максимального импеданса и «продольных» кривых в тех пунктах, где наблюдался перегиб или понижение сопротивления. Такая особенность наблюдается в 16 случаях «продольных» кривых и в 14 случаях фазовых кривых. На рисунке показаны также средние значения и средние квадратичные отклонения для каждой группы.

На рис. 7 приведены обе средние кривые. Видно, что поведение средней кривой распределения удельного сопротивления обеих групп практически не различается. В обоих случаях отчетливо выделяется слой в интервале от 200 до 400 км, где удельное сопротивление меняется в небольших пределах (20–40 Ом·м). Согласно работе [16], эти значения соответствуют сопротивлению частично расплавленного базальта. Это может указывать на существование астеносферы на этих глубинах. Значение продольной проводимости этого слоя 5000–7000 См. Поведение удельного сопротивления на глубине более 400 км определяется наличием фазовых переходов и мало отличается от результата, полученного в нашей предшествующей работе [5]. Следует иметь в виду, что при выбранной методике нормировки фазовых кривых и даже небольшого вертикального сдвига амплитудных кривых мы можем внести ошибки в значение сопротивления на глубине менее 100 км.

На рис. 8 темными кружками обозначены области, где результаты совместной интерпретации с опорной кривой «продольных» и фазовых кривых позволяют предположить присутствие астеносферы.

На рис. 9 темными кружками отмечены пункты, в которых хотя бы одна кривая (амплитудная или фазовая) указывает на присутствие астеносферы. Видно, что эти об-

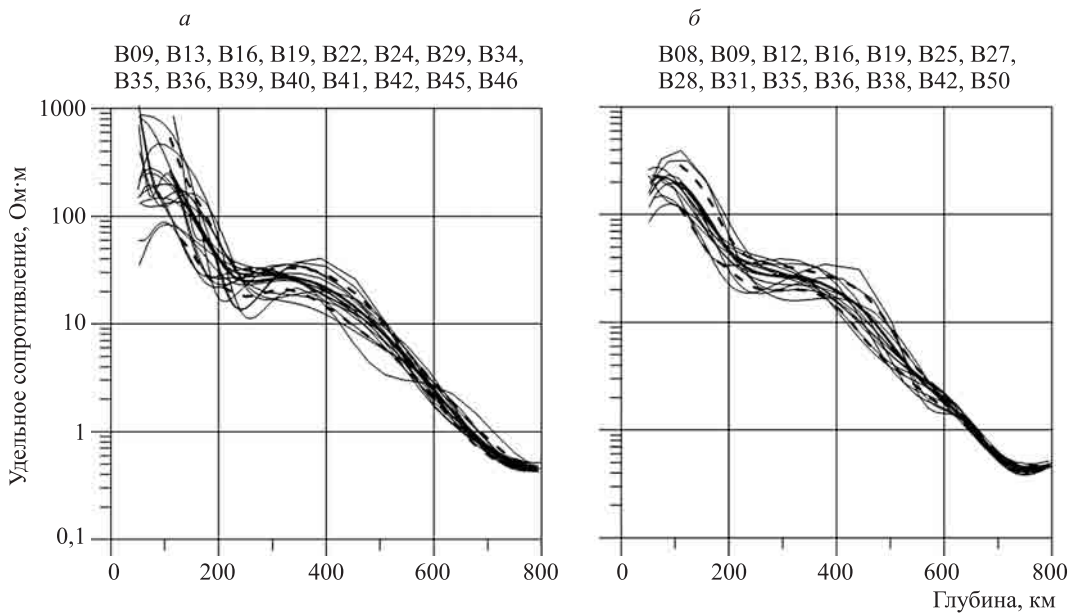


Рис. 6. Результаты совместной интерпретации с данными ГМВЗ «продольных» (а) и фазовых (б) кривых; жирные линии — средние значения, жирный пунктир — среднеквадратичное отклонение

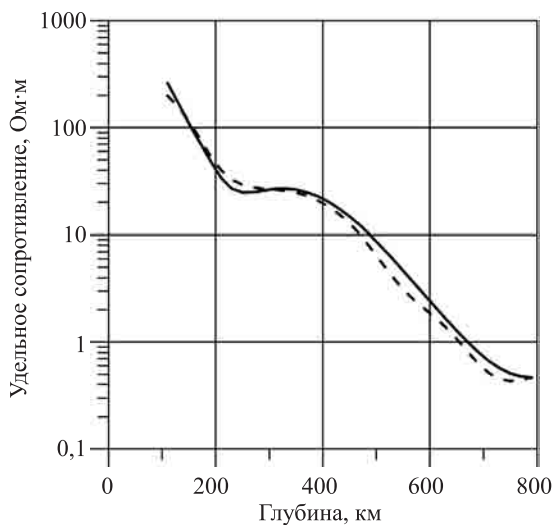


Рис. 7. Среднее распределение удельного сопротивления по глубине по результатам совместной интерпретации с данными ГМВЗ «продольных» (сплошная линия) и фазовых (пунктир) кривых

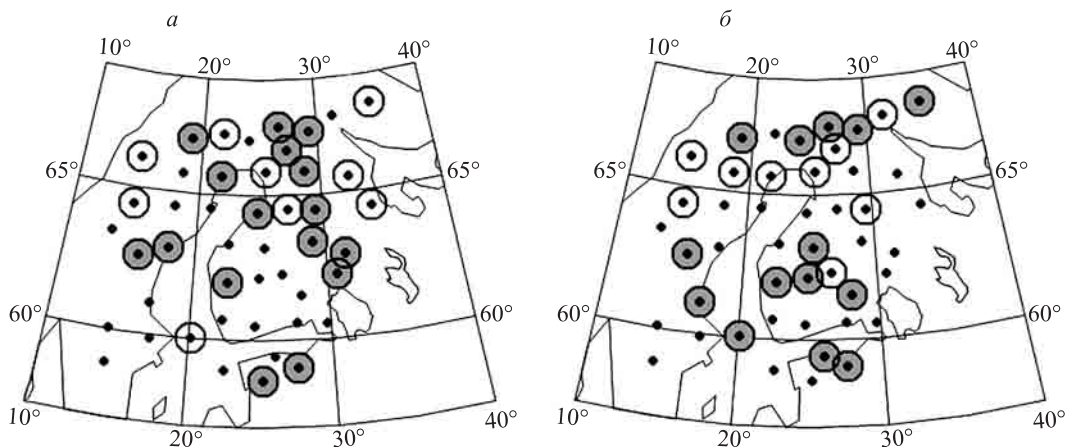


Рис. 8. Области, где возможно присутствие астеносферы по результатам интерпретации амплитудных (а) и фазовых (б) кривых; кружки — пункты, где проводилась интерпретация, темные кружки — пункты, где кривые показывают присутствие астеносферы

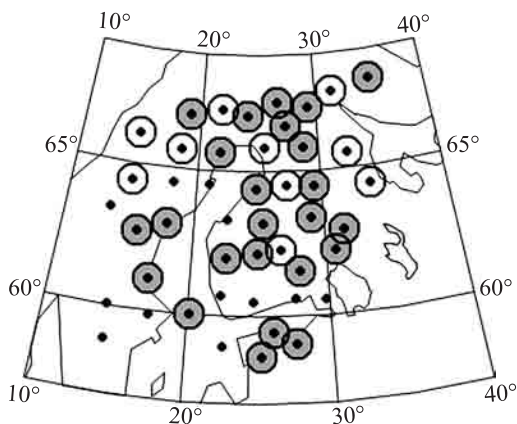


Рис. 9. Области, где возможно присутствие астеносферы на Фенноскандинавском щите; кружки — пункты, где проводилась интерпретация амплитудной или фазовой кривой, темные кружки — пункты, где хотя бы одна из кривых показывает присутствие астеносферы

ласти довольно равномерно покрывают всю центральную часть территории Фенноскандинавского щита. В ряде пунктов (В14, В21, В20, В18, В17, В26, В37, В44) совместная интерпретация данных ВЕАР и ГМВЗ оказалась невозможной из-за плохой стыковки МТ- и МВЗ-данных на границе интервалов. Скорее всего, причиной этого является влияние коровых аномалий проводимости, имеющих широкое распространение на территории Фенноскандинавского щита. В 11 пунктах данные ρ_T и φ_T в интервале периодов суточных вариаций отсутствуют, что не позволило уверенно выделить «продольные» кривые.

В целом проведенные исследования позволяют утверждать, что на Фенноскандинавском щите на глубине около 200 км расположен слой постоянного удельного сопротивления 20–40 Ом·м мощностью 150–180 км и продольной проводимостью 5000–7000 См. Приведенные оценки являются приближенными, поскольку мы выбирали для выделения «продольных» кривых глобальную МВ-кривую В. Ю. Семёнова, построенную по данным европейских обсерваторий, расположенных на 1000 км южнее, чем центральная часть Фенноскандинавского щита. Для более точной оценки положения астеносферного слоя необходимо улучшить качество МТ- и МВ-данных в области Sq -вариаций.

В пользу трактовки выделенной проводящей зоны в верхней мантии как астеносферы, обусловленной частичным плавлением, говорят следующие факты.

На глубине от 150 до 300 км сопротивление верхней мантии достигает 20–40 Ом·м. Это сопротивление близко к сопротивлению ультраосновных пород при температуре частичного плавления. Наиболее ярко это показано в работе японских геофизиков [16], которые изучали изменения сопротивления «сухих» пород верхней мантии при температурах, достигающих плавления. На рис. 10 представлено поведение сопротивления образцов ультраосновных пород верхней мантии в зависимости от температуры, точнее от отношения $T/T_{\text{п}}$, где $T_{\text{п}}$ — температура солидуса (начала плавления). Также приведено процентное количество расплава в зависимости от $T/T_{\text{п}}$. Температура плавления 1170°C, эксперимент проводился при давлении 0.5 и 1 ГПа.

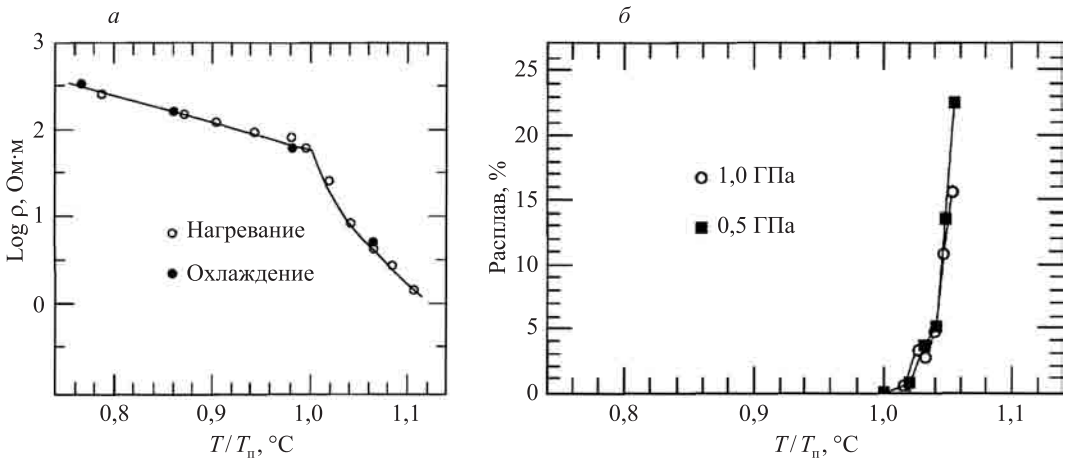


Рис. 10. Зависимость удельного сопротивления (а) и содержания расплава (б) от температуры по данным работы [16]; $T_{\text{п}}$ — температура плавления

При температуре $T = T_{\text{п}}$ наблюдается резкий излом кривой при сопротивлении около 50 Ом·м, а при $T/T_{\text{п}} = 1,01$ сопротивление падает до 20–40 Ом·м. Указанные давления соответствуют глубинам не более 120 км.

С изменением давления с глубины 100 км (1 ГПа) до 200–300 км (давление приближается к 10 ГПа) температура мантии и температура плавления увеличиваются, что может привести к некоторому изменению картины, но зависимость сопротивления от $T/T_{\text{п}}$ вряд ли изменится, поскольку механизм электропроводности, обусловленный в основном дефектами кристаллической решетки, сохранится. По данным геотермики [17]

на Фенноскандинавском щите на глубине 150 км температура колеблется в пределах 1050–1200°C, а температура плавления на этих глубинах в зависимости от влажности пород верхней мантии 1000–1700°C [18]. По данным В. В. Гордиенко [19], верхняя граница температуры на глубине 250–400 км на Восточно-Европейской платформе и Фенноскандинавском щите близка к температуре плавления и может превышать её. Приведенные оценки температуры по сейсмическим и геотермическим данным не являются безупречными, но они не исключают возможности образования зон частичного плавления в интервале глубин 180–300 км.

Возможно, поведение электропроводности, определяемое по МТ-данным, поможет уточнить истинное распределение температуры и температуры плавления. Но для этого, в первую очередь, нужны новые лабораторные данные при давлениях, соответствующих этим глубинам. Вполне возможно, что верхняя мантия Фенноскандинавского щита не является всюду «сухой» вследствие сложных мантийных процессов и наличия ослабленных тектоническими процессами разломных зон.

Проведенное исследование строения верхней мантии по МТ-данным BEAR позволило уверенно сделать вывод о существовании астеносферы на глубине от 180 до 300 км с удельным сопротивлением 20–40 Ом·м. Для получения более строгих оценок следует провести еще одну интерпретацию данных BEAR с использованием более надежных МВ-данных, полученных непосредственно по обсерваториям Фенноскандинавского щита. Возможно, этот подход к интерпретации МТ-данных позволит провести районирование мантии Фенноскандинавского щита по мощности и глубине залегания астеносферы.

Указатель литературы

1. Ковтун А. А., Вагин С. А., Вардьянц И. Л. и др. 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.
2. Korja T., Kaikkonen P., Lahti I. et al. Electrical conductivity of upper mantle in Fennoscandia // Lithosphere 2006 — fourth symposium on the structure, composition and evolution of the lithosphere in Finland. University of Helsinki, 2006. Report S-46.
3. Lahti I., Korja T., Kaikkonen P., Vaittinen K., BEAR WG. Decomposition analysis of the BEAR magnetotelluric data: Implication for the upper mantle conductivity in the Fennoscandian Shield // Geophys. J. Int. 2005. Vol. 163. P. 900–914.
4. Ковтун А. А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 284 с.
5. Ковтун А. А., Вардьянц И. Л. Электропроводность мантии Фенноскандинавского щита // Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах. Ч. 1. Материалы международного совещания. Апатиты, 2005. С. 161–172.
6. Ковтун А. А., Вардьянц И. Л., Легенькова Н. П. Влияние коровых аномалий электропроводности на поведение магнитотеллурического поля на Фенноскандинавском щите // Вопросы геофизики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. Вып. 40. С. 24–43.
7. Ковтун А. А., Вардьянц И. Л. Электропроводность мантии Фенноскандинавского щита по результатам совместной интерпретации данных глубинных МТ- и глобальных МВ-зондирований // Вопросы геофизики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008. Вып. 41. С. 112–120.
8. Вардьянц И. Л., Ковтун А. А. Исследование возможности присутствия астеносферы на территории Фенноскандинавского щита по данным BEAR // Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов: Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции. Апатиты, 2009. С. 15–18.

9. Ротанова Н. Н., Фискина М. В., Захарова О. К. Экспериментальные данные по глобальному магнитовариационному зондированию // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26, № 1. С. 127–132.
10. Ваньян Л. Л., Бердичевский М. Н., Пушкарёв П. Ю. Астеносфера в свете магнитотеллурических данных // Электрон. научно-информ. журнал «Вестник ОГГГГН РАН». 2000. № 12(17).
11. Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A. A. et al. Crustal conductivity in Fennoscandia — a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield // Earth Planet Space. 2002. Vol. 54. P. 535–558.
12. Eggers D. E. An Eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor // Geophysics. 1982. Vol. 47, N 8. P. 1204–1214.
13. 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. 1990. Vol. 60. P. 68–79.
14. 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.
15. Olsen N. The electrical conductivity of the mantle beneath Europe derived from C — responses from 3 h to 720 h // Geophys. J. Int. 1998. Vol. 133. P. 298–308.
16. Sato H., Sacks S. I., Murase T. 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. // Geophysical Research. 1989. Vol. 94. P. 5689–5704.
17. Artemieva I. M., Mooney W. D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // Geophys. Research. 2001. Vol. 106(B8). P. 16837–16414.
18. Кабан М. К. Структура верхней мантии континентов по сейсмическим и гравитационным данным // Электрон. научно-информ. журнал «Вестник ОГГГГН РАН». 2002. № 1 (77).
19. Гордиенко В. В. Глубинные процессы в тектоносфере Земли. Нац. АН Украины. Киев, 1998. 85 с.