

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕНЗОРА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА

В.В. Плоткин

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

На основе учета латеральной неоднородности электромагнитного поля в работе обработаны данные магнитовариационного зондирования (МВЗ) по проекту IMAGE (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects) и данные магнитотеллурического зондирования (МТЗ) по проекту BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research) с целью полного определения компонент тензора электропроводности пород Балтийского щита. При восстановлении характеристик анизотропии по данным МВЗ и МТЗ используется приближенное доменное описание ограниченной области полигона с помощью эффективного тензора электропроводности. Построены карты латеральных распределений его собственных значений и азимута направлений максимальной электропроводности. По имеющимся экспериментальным данным азимутальный угол в диапазоне 40—60° наилучшим образом описывает направление главной оси тензора с максимальной электропроводностью на Балтийском щите. Сравнение результатов, полученных по сейсмическим и электромагнитным данным, указывает на возможную корреляцию азимутальных направлений максимальной электропроводности и пониженных значений сейсмических скоростей, а также сходство границ соответствующих доменных структур Балтийского щита.

Анизотропная среда, синхронные площадные данные, латеральная неоднородность, эффективный тензор электропроводности, доменная структура Балтийского щита.

DETERMINING THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY TENSOR OF THE LITHOSPHERE OF THE BALTIC SHIELD

V.V. Plotkin

Data of magnetovariational sounding (MVS) under the IMAGE (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects) project and data of magnetotelluric sounding (MTS) under the BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research) project are processed with consideration of the lateral inhomogeneity of the electromagnetic field in order to fully determine the components of the electrical conductivity tensor of Baltic Shield rocks. In the reconstruction of the anisotropy characteristics from the MVS and MTS data, an approximate domain description of the bounded polygon area with an effective electrical conductivity tensor is used. Maps of the lateral distributions of its eigenvalues and the strike azimuth of maximum electrical conductivity are constructed. According to available experimental data, an azimuth angle of 40—60° best describes the direction of the principal axis of the tensor with maximum electrical conductivity on the Baltic Shield. Comparison of the results obtained from seismic and electromagnetic data indicates a possible correlation between the strike azimuths of maximum electrical conductivity and low seismic velocities, as well as similarity of the boundaries of the corresponding domain structures of the Baltic Shield.

Anisotropic medium, synchronous areal data, lateral inhomogeneity, effective electrical conductivity tensor, domain structure of the Baltic Shield

ВВЕДЕНИЕ

Большой интерес вызывает вопрос, существует ли связь между сейсмическими характеристиками и электропроводностью [Bahr, Simpson, 2002; Eaton et al., 2004], в частности, есть ли систематический сдвиг в анизотропной среде между направлением поляризации быстрой сейсмической поперечной волны и направлением наибольшей величины электропроводности (как замечено в работе [Ji et al., 1996]). Для совместного анализа сейсмических и магнитотеллурических данных привлекаются различные методы многокритериальной оптимизации [Kozlovskaya et al., 2007], в том числе на основе генетических алгоритмов [Moogkamp et al., 2010], приводящие на практике к множественным решениям типа Парето-фронта. При этом возникает необходимость выбора компромиссного решения, и даже при анализе одних только сейсмических данных остаются сомнения в правильности получаемой модели описания анизотропии. В частности, появляются трудности при определении пространственной ориентации

слоистости и линейности структуры пород (выбор между моделями: «slow» b-axis, high-velocity foliation plane (a, c) и «fast» a-axis, low-velocity plane (b, c) [Babuška et al., 2008]).

Известно [Groom, Bailey, 1989; McNeice, Jones, 2001; Caldwell et al., 2004] несколько способов определения направлений (strike azimuths), вдоль которых вытянуты двумерные структуры электропроводности. В работе [Plomegova et al., 2008] высказываются сомнения в том, что эти направления соответствуют осям сейсмической анизотропии. Еще сложней ситуация в трехмерно неоднородной среде. Для определения характерных направлений анизотропной среды необходимо знать все компоненты тензора электропроводности.

Выявление признаков анизотропии электропроводности среды на основе стандартного анализа кривых МТЗ остается затруднительным и его приходится все более усложнять. В работах [Baht et al., 2000; Gatzemeier, Moorkamp, 2005] указывается на необходимость анализа площадных зондирований с помощью массива пунктов наблюдений. В работе [Marti et al., 2010] вводятся различные новые инварианты с целью поиска более эффективных признаков выявления неоднородности и анизотропии среды.

Таким образом, прежде чем проводить совместный анализ сейсмических и магнитотеллурических данных, остается актуальной задача правильно определять тензоры сейсмической и электрической анизотропии среды. В работе [Плоткин, 2012a] описан метод полного определения тензора электропроводности с помощью МТЗ по результатам анализа латеральной неоднородности компонент электромагнитного поля. В данной работе этот метод применен для определения тензора электропроводности пород Балтийского щита.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И АЛГОРИТМ ИХ ОБРАБОТКИ

Нами было обработано два независимых набора данных, полученных в разное время при выполнении наблюдений на Балтийском щите. Отбирались данные, относящиеся к прямоугольному полигону с центром в точке с координатами 64.5° с.ш. и 19° в.д., которая являлась также началом декартовой системы координат с осью OX , направленной на север, осью OY — на восток и осью OZ — вниз. Размеры полигона составляли 1440 км по оси OX и 1620 км по оси OY .

Один набор содержал только данные по вариациям трех компонент геомагнитного поля (проект IMAGE — International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects, <http://space.fmi.fi/image>). В работе были использованы 10-секундные данные, полученные в период с октября 2004 г. по январь 2005 г. Краткие пропуски в данных заменялись их среднемесячными значениями. Одинаковым образом обрабатывались данные 589 скользящих интервалов длительностью 10 ч, получаемые последовательным сдвигом их начал на 5 ч. В каждом из интервалов вычислялись временные спектры вариаций трех компонент геомагнитного поля на всех 23 станциях, участвующих в проекте IMAGE и попавших в рассматриваемый полигон. Полученные временные спектры являлись исходными данными для последующей обработки.

Другой набор данных был получен в 1998 г. при выполнении международного проекта BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research [Korja, 1998]) по изучению пространственного распределения электропроводности Балтийского щита. Рассматривался промежуток времени с 19 июня по 3 июля 1998 г. с наибольшим количеством синхронно работавших пунктов наблюдений продолжительностью около 14 сут (600 тыс. отсчетов через 2 с). Записи с большим количеством пропусков (больше 20 %) отбраковывались, короткие пропуски в данных заполнялись с помощью линейной интерполяции. В итоге удалось оставить для последующей обработки 32 пункта с синхронной регистрацией данных по вариациям всех компонент магнитного поля и 24 пункта по вариациям горизонтальных компонент электрического поля, попадавшими в рассматриваемый полигон. Одинаковым образом обрабатывались данные 324 скользящих интервалов длительностью 10 ч, получаемые последовательным сдвигом их начала на 1 ч. В каждом из интервалов вычислялись временные спектры вариаций трех компонент геомагнитного поля и двух горизонтальных компонент электрического поля на пунктах, попавших в рассматриваемый полигон. Полученные временные спектры являлись исходными данными для последующей обработки.

Основой алгоритма решения рассматриваемой обратной задачи, как и в работе [Плоткин и др., 2009], являлось согласование между собой распределений зарегистрированных компонент электромагнитного поля на поверхности полигона в процессе поиска оптимальных характеристик анизотропии электропроводности в объеме. Подчеркнем, что полное определение тензора электропроводности с помощью МТЗ возможно лишь по результатам анализа латеральной неоднородности компонент электромагнитного поля [Плоткин, 2012a]. С этой целью и были выбраны указанные данные площадных вариантов МТЗ с синхронной регистрацией на полигоне отклонений от плоскостной структуры поля. Их использование требует перехода от дискретного набора данных на станциях к определению поверхностных распределений всех компонент поля.

Для описания неоднородного поля, зависящего от горизонтальных координат, на ограниченном полигоне с размерами L_x и L_y будем использовать систему функций:

$$S_n(x, y) = \exp(ik_{xn}x + ik_{yn}y), \quad k_{xn} = \frac{2\pi}{L_x}m', \quad k_{yn} = \frac{2\pi}{L_y}m'', \quad (1)$$

где $n = 1, \dots, (2M' + 1)(2M'' + 1)$, $-M' \leq m' \leq M'$, $-M'' \leq m'' \leq M''$, а M' и M'' — максимальные номера пространственных гармоник, учитываемых для аппроксимации поля. Выбор функций в комплексном виде объясняется удобствами их использования при решении уравнений Максвелла для анизотропной среды. Практическое использование комплексных функций при аппроксимации дискретных данных по компонентам на всю поверхность полигона не отличается от способа применения вещественных функций в работе [Плоткин и др., 2008]. Выполняется раздельная аппроксимация реальных и мнимых частей амплитуд компонент функциями (1). В этом случае для аппроксимации можно использовать лишь половину комплексных функций (функции с противоположными знаками m' , m'' комплексно сопряжены, что приводит к одинаковому количеству независимых пространственных гармоник в обоих вариантах).

В работе [Плоткин, 2012а] показано, что при восстановлении характеристик латерально неоднородной анизотропной среды по экспериментальным данным можно воспользоваться эффективным тензором электропроводности, приближенно описывающим некоторую ограниченную область полигона — домен. Подобная доменная структура строения среды наблюдалась и при исследованиях анизотропных свойств литосферы сейсмическими методами [Plomerova et al., 2008]. Кроме того, на доменах с ограниченными размерами можно существенно понизить затраты на проведение синхронных площадных наблюдений [Плоткин, 2012б], если разнести эксперимент в разных доменах во времени.

В связи с этим поиск оптимальных характеристик анизотропии электропроводности осуществляется по доменному принципу. Подобная процедура обработки данных подробно описана в [Плоткин, 2012а]. Для удобства приведем здесь лишь основные моменты. Эффективный тензор электропроводности в изучаемом домене представляется в виде

$$\hat{\sigma}' = \begin{pmatrix} \sigma_{x'} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y'} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z'} \end{pmatrix}, \quad \hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = V \hat{\sigma}' V^T, \quad (2)$$

где $\hat{\sigma}'$ — тензор в главных осях, $\hat{\sigma}$ — тензор в лабораторной системе координат, а матрица поворота V имеет вид

$$V = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \varphi - \cos \vartheta \sin \psi \sin \varphi & -\cos \psi \sin \varphi - \cos \vartheta \sin \psi \cos \varphi & \sin \vartheta \sin \psi \\ \sin \psi \cos \varphi + \cos \vartheta \cos \psi \sin \varphi & -\sin \psi \sin \varphi + \cos \vartheta \cos \psi \cos \varphi & -\sin \vartheta \cos \psi \\ \sin \vartheta \sin \varphi & \sin \vartheta \cos \varphi & \cos \vartheta \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где ϑ — угол нутации, ψ — угол прецессии и φ — угол чистого вращения.

Решение обратной задачи сводится к минимизации методами оптимизации следующего функционала Φ :

$$\Phi = \sum \Phi(F_p), \quad \Phi(F_p) = \left\{ \sum_{m,n} |F_{p0}(x_m, y_n) - F_{pj}(x_m, y_n)|^2 \right\} / \left\{ \sum_{m,n} |F_{p0}(x_m, y_n)|^2 \right\}, \quad (4)$$

в котором слагаемые $\Phi(F_p)$ учитывают вклады выбранных компонент ($p = x, y, z$) магнитного ($F = H$) или электрического ($F = E$) полей. F_{p0} и F_{pj} обозначают значения p -й компоненты этих полей до минимизации и после j -й итерации соответственно в точках поверхности с координатами x_m, y_n . При этом необходимая часть зарегистрированных в эксперименте компонент поля используется как входные данные для решения прямой задачи на текущей модели среды с параметрами (2), (3). Ее решение дает предполагаемые теоретические значения остальных компонент поля после j -й итерации, которые сравниваются с помощью (4) с их имеющимися экспериментальными значениями. Далее методами оптимизации производится коррекция текущей модели среды и параметров в (2), (3). Процедура продолжается, пока не определятся оптимальные для обрабатываемого сеанса наблюдений значения эффективного тензора электропроводности в домене. В отличие от [Плоткин, 2012а], поиск главных значений тензора электропроводности производился по формулам (5), учитывающим предполагаемый диапазон их возможных значений по априорным данным:

$$\begin{aligned}\sigma_{x'} &= \sigma_0 [\alpha_{\min} + \alpha_{\max} (\tanh(\xi_1) + 1)], \\ \sigma_{y'} &= \sigma_0 [\alpha_{\min} + \alpha_{\max} (\tanh(\xi_2) + 1)], \\ \sigma_{z'} &= \sigma_0 [\alpha_{\min} + \alpha_{\max} (\tanh(\xi_3) + 1)],\end{aligned}\tag{5}$$

$$\vartheta = 90^\circ [1 + \sin(\xi_4)], \quad \psi = 180^\circ [1 + \sin(\xi_5)], \quad \phi = 180^\circ [1 + \sin(\xi_6)],$$

где $-\infty < \xi_k < \infty$ и α_{\min} , α_{\max} — коэффициенты, учитывающие минимально и максимально возможные главные значения тензора электропроводности.

Процедура усреднения результатов, полученных в отдельных скользящих интервалах, заключалась в вычислении логарифмов угловых зависимостей эффективного значения электропроводности $\sigma_{ef} = \mathbf{e}(\hat{\sigma}\mathbf{e})$ от направлений, задаваемых единичными векторами \mathbf{e} , и в последующем их усреднении. Отметим, что отображать эффективный тензор электропроводности графически также удобно в виде полярной диаграммы логарифма угловой зависимости электропроводности $\sigma_{ef} = \mathbf{e}(\hat{\sigma}\mathbf{e})$ [Плоткин, 2012а]. Такую диаграмму будем представлять в полярных координатах, в которых радиальная координата соответствует зенитному углу \mathbf{e} относительно оси OZ , а угловая — азимуту направления \mathbf{e} относительно оси OX .

По полученной усредненной угловой зависимости $\sigma_{ef} = \mathbf{e}(\hat{\sigma}\mathbf{e})$ легко восстановить сам эффективный тензор электропроводности $\hat{\sigma}$ в изучаемом домене. Также с помощью подбора значений методами оптимизации можно найти тензор $\hat{\sigma}$ в главных осях и углы поворота в матрице V . При этом формально возникает некоторая неоднозначность представления одного и того же тензора электропроводности $\hat{\sigma}$ в лабораторной системе координат с помощью (2), связанная с возможной перестановкой собственных значений $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$ и $\sigma_{z'}$ вдоль главных осей. Последним обстоятельством обосновывается и сам выбор описываемой процедуры усреднения данных, получаемых в скользящих интервалах (сеансах), — с помощью усреднения угловых зависимостей эффективного значения электропроводности. Действительно, в силу указанной неоднозначности непосредственное усреднение получаемых характеристик $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$, $\sigma_{z'}$ и углов поворота в матрице V оказывается затруднительным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитное поле менее подвержено возмущениям за счет приповерхностных неоднородностей, поэтому результаты обработки данных проекта IMAGE более устойчивы. В связи с этим при обработке данных проекта BEAR компоненты электрического поля в целевых функциях учитывались с меньшим весом. В работе [Lahti et al., 2005] указывается, что прямые оценки параметров анизотропии по наблюдаемым фазовым отличиям боковых компонент тензора импеданса могут приводить к ошибке из-за трехмерной структуры электропроводности коры и верхней мантии Центральной Финляндии. Отмечается также, что если анизотропия верхней мантии обусловлена деформациями мантийного материала при движении плит или конвекцией в ней, должно наблюдаться плавное изменение направлений азимутов протяженных двумерных структур по всему массиву пунктов наблюдения. Однако упомянутый способ определения направлений приводит к резким выбросам в некоторых местах, что ставит под сомнение их достоверность. Конечно, не исключено, что эти резкие выбросы связаны с «замороженной» анизотропией литосферы, индуцированной при ее образовании в архее и протерозое. Поэтому большой интерес вызывает вопрос, существуют ли на самом деле резкие изменения характеристик анизотропии или они обусловлены способом их определения.

Описанным способом были обработаны данные обоих проектов в различных доменах Балтийского щита на временных периодах 25, 1125, 2250, 4500 и 9000 с. Временной период 25 с использовался для анализа ситуации в верхних коровых слоях, а остальные периоды характеризуют анизотропию электропроводности в более глубоких слоях литосферы и верхней мантии. Результаты на периоде 25 с неустойчивы, поскольку определяемые параметры анизотропии зависят от выбора размера домена. Для примера на рис. 1 показаны полученные полярные диаграммы эффективного тензора электропроводности ($T = 25$ с) для четырех различных доменов Балтийского щита (домены показаны пунктиром) с размерами 400×500 км (вверху) и 640×620 км (внизу домены частично наложены друг на друга). Видно, что получаемые характеристики анизотропии заметно меняются как от размеров домена, так и его местоположения. Такое поведение в большей степени соответствует латеральной неоднородности электропроводности, чем ее анизотропии.

Об изменчивости обсуждаемых характеристик на периоде 25 с свидетельствует также следующее обстоятельство. Ранее упоминалось о неоднозначности представления матрицы поворота из-за возмож-

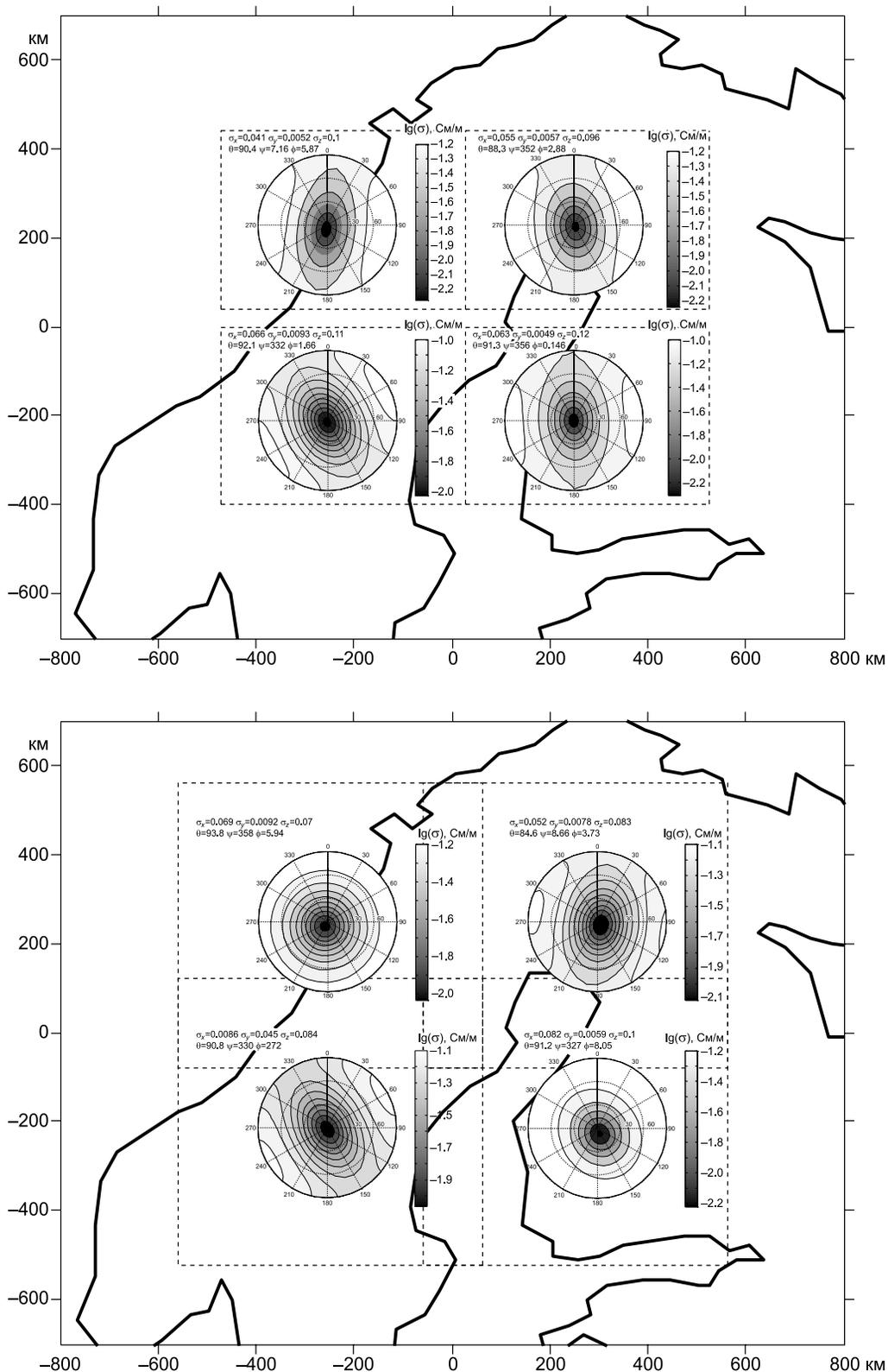


Рис. 1. Изолинии эффективной электропроводности σ_{ef} (в полярных координатах, См/м) в зависимости от направления единичного вектора e в нижнем полупространстве, задаваемого зенитным углом θ (радиальная координата) и азимутом ϕ (угловая координата).

Ось OX направлена на север — азимут 0° , ось OY на восток — азимут 90° , ось OZ — вниз. Диаграммы построены по данным BEAR на временном периоде 25 с для четырех различных доменов. Центр каждой диаграммы помещен в центральной точке соответствующего домена, географическое положение которого показано на схеме очертаний побережья на Балтийском щите штриховыми линиями, размеры доменов по осям OX и OY вверху 400×500 км, внизу 640×620 км.

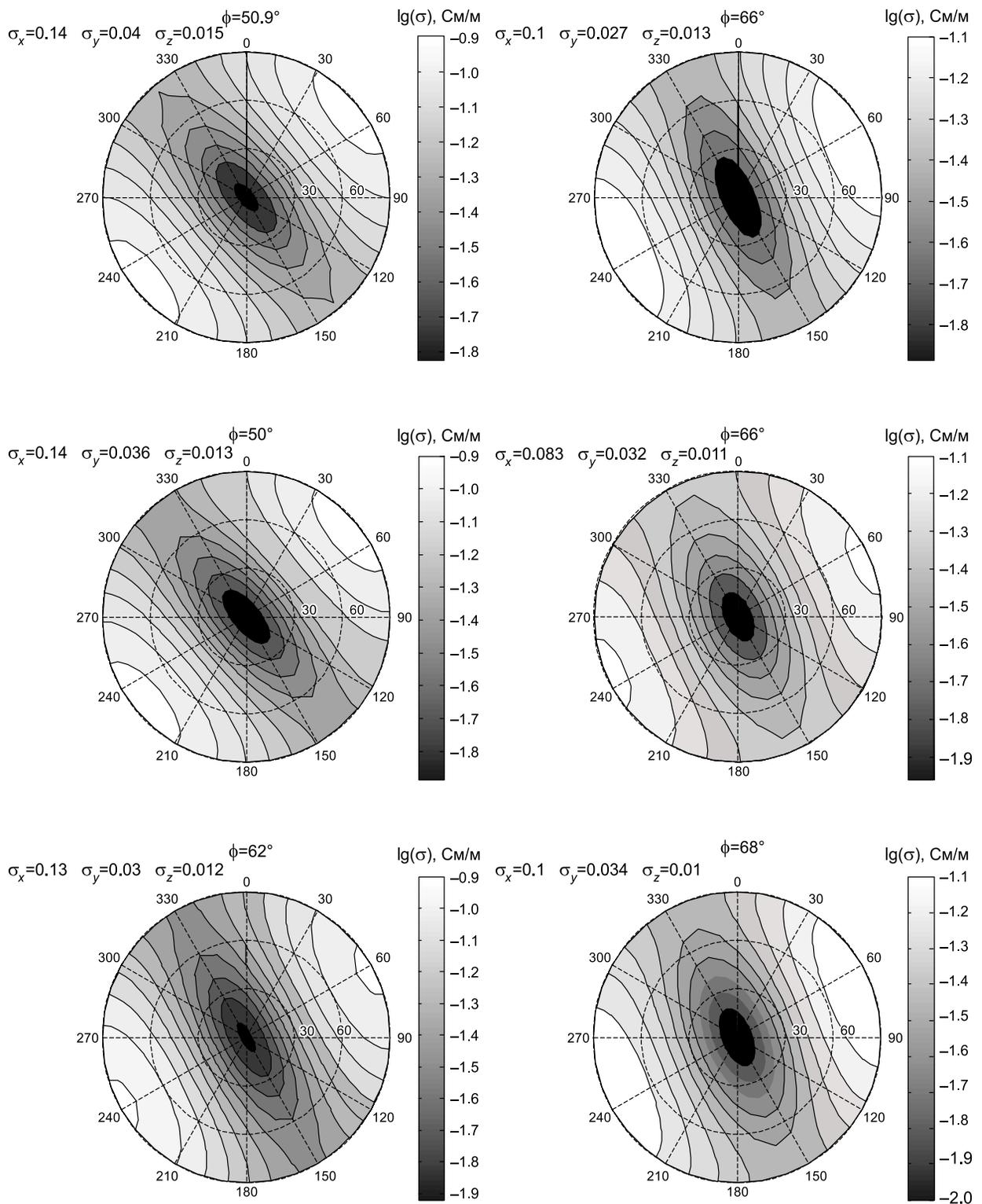


Рис. 2. Полярные диаграммы эффективных тензоров электропроводности (аналогично рис. 1).

Построение по данным BEAR (слева) и IMAGE (справа) на временных периодах 2250 с (вверху), 4500 с (в середине) и 9000 с (внизу) для одного и того же домена с центром на северной оконечности Ботнического залива (домен справа вверху на рис. 1).

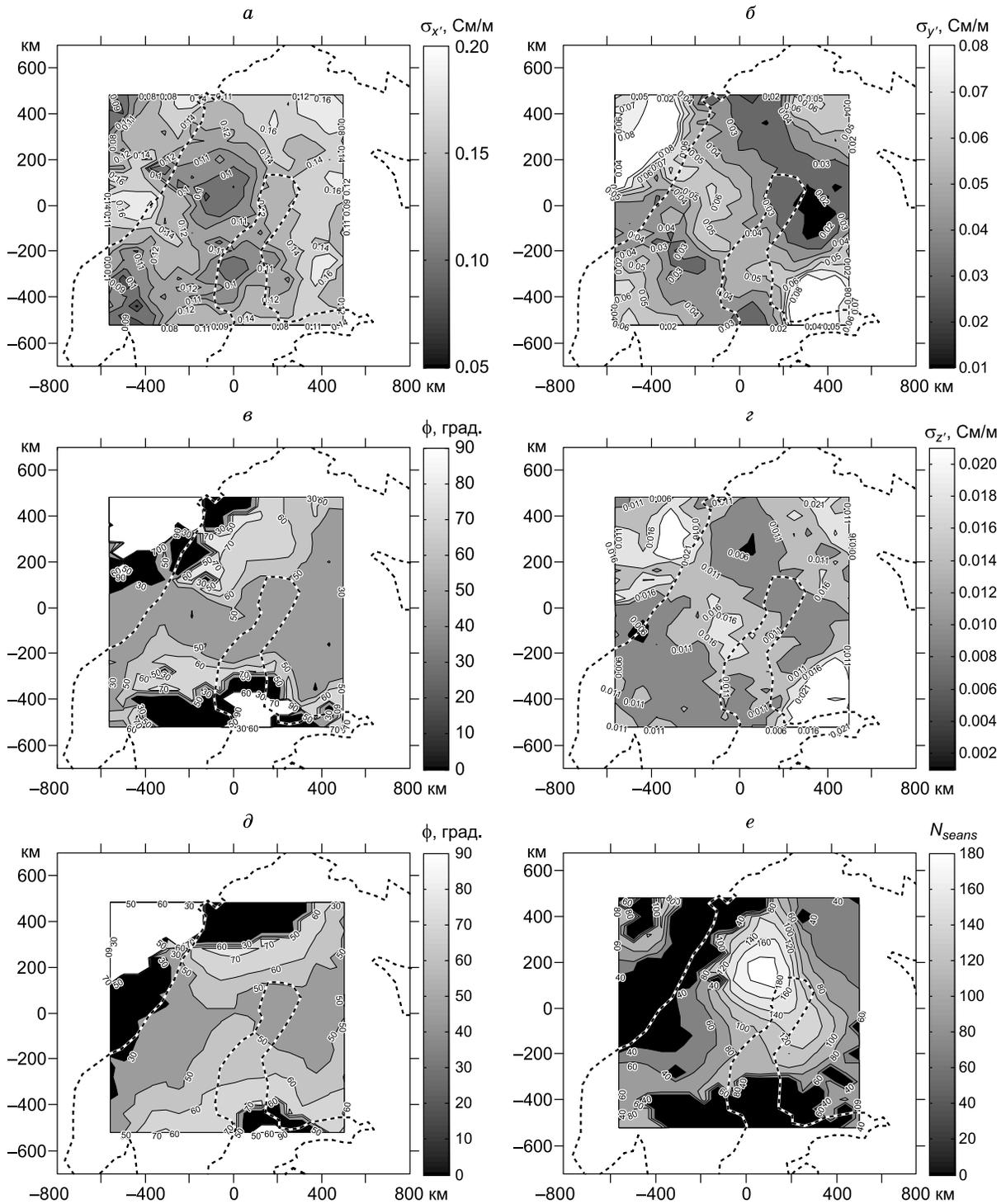


Рис. 3. Латеральное распределение параметров $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$, $\sigma_{z'}$ и ϕ на Балтийском щите по данным BEAR для временного периода 9000 с.

a, б, в, г – распределения указанных параметров, усредненные по сеансам, в которых достигнутый минимум целевого функционала (4) не превышал 40 %; *е* – количество таких сеансов N_{seans} для каждой точки; *д* – распределение ϕ , среднее по всем 324 сеансам.

ной перестановки собственных значений $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$ и $\sigma_{z'}$ вдоль главных осей тензора электропроводности. Оказывается, что с помощью подобных перестановок на периоде 25 с не удастся перейти к матрицам поворота одного и того же типа, как это получилось ниже для полярных диаграмм эффективного тензора электропроводности на больших временных периодах. Поэтому на полярных диаграммах для перио-

Рис. 4. Азимутальная анизотропия скоростей продольных сейсмических волн в доменах Балтийского щита [Eken et al., 2010].

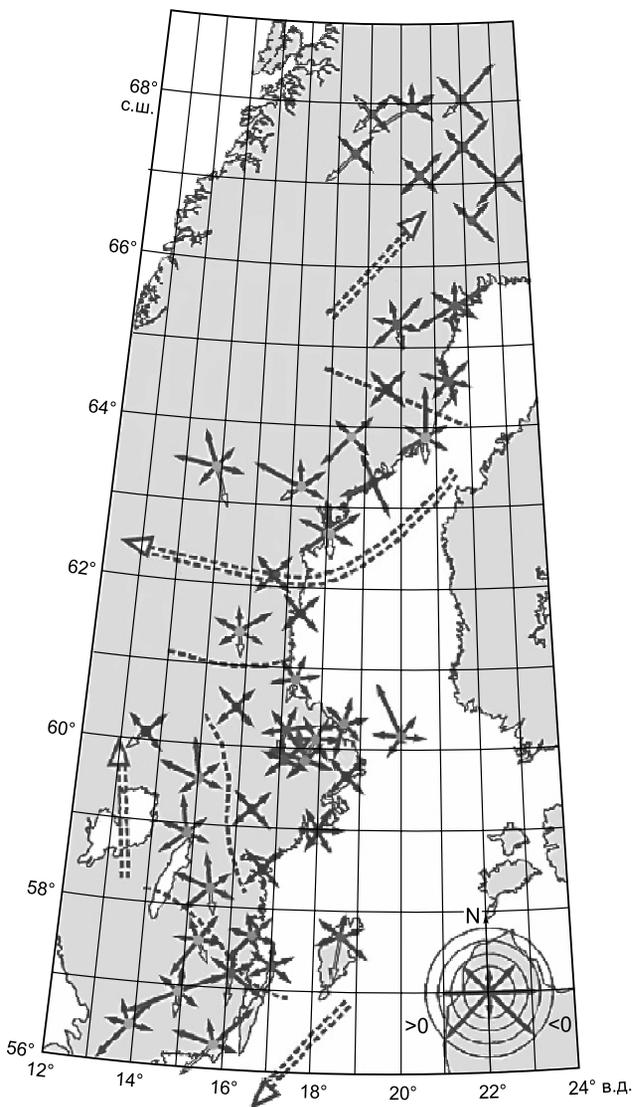
Большие штриховы стрелки условно соответствуют направлениям прихода «медленных» сейсмических волн в нескольких доменах, границы которых даны штриховыми линиями.

да 25 с указаны значения всех углов Эйлера матриц поворота систем координат, соответствующих найденному при минимизации целевого функционала распределению собственных значений σ_x , σ_y и σ_z вдоль главных осей тензора электропроводности. Как можно видеть, значения этих величин действительно зависят как от размеров домена, так и его местоположения.

Картина изменяется на временных периодах 1125, 2250, 4500 и 9000 с. Получаемые параметры анизотропии оказываются более устойчивыми. В частности, можно привести матрицы поворота систем координат к единому для всех доменов типу. Оказывается, например, что если выбрать нулевые значения для углов нутации ϑ и прецессии ψ , то можно задавать поворот системы координат лишь одним углом φ чистого вращения. Поэтому на приводимых далее полярных диаграммах для длинных временных периодов указаны лишь значения угла φ и соответствующий выбор собственных значений σ_x , σ_y и σ_z вдоль главных осей. В качестве примера на рис. 2 отображены результаты, полученные в одном и том же домене с размерами 400×500 км для длинных временных периодов по данным обоих проектов. Подчеркнем, что эти данные отличаются как временем регистрации компонент электромагнитного поля, так и набором регистрируемых компонент, расположением пунктов регистрации и регистрирующей аппаратурой.

Можно видеть, что получаемые параметры оказываются более устойчивыми и с большой долей вероятности указывают на возможную анизотропию электропроводности глубоких слоев Балтийского щита.

Найденные подобным образом латеральные распределения собственных значений вдоль главных осей, а также азимута направлений наибольшего значения электропроводности на Балтийском щите показаны на рис. 3 для временного периода 9000 с. Расчеты проводились для скользящих доменов с размерами 400×500 км. Приведены полученные карты распределений σ_x , σ_y , σ_z , и φ (a , b , e , z – распределения, усредненные по сеансам, в которых достигнутый минимум целевого функционала (4) не превышал 40 %, e — количество таких сеансов N_{seans} отображено для каждой точки). Также приведено (d) распределение φ , полученное усреднением по всем 324 сеансам. Сравнение (e) и (d) в какой-то мере характеризует изменчивость и степень достоверности получаемых распределений, поскольку количество учитываемых сеансов с минимумом функционала (4) меньше 40 % оказывается неодинаковым для разных географических точек (e). Оно достигает максимальных значений ~ 180 вблизи границ между Карельской и Свелофеннской провинциями. Основные тектонические границы главных провинций Балтийского щита обнаруживаются на картах σ_y и σ_z , но менее заметны на карте σ_x . Угол φ в диапазоне 40 — 60° наилучшим образом описывает направление главной оси тензора σ_x с максимальной электропроводностью, что не противоречит имеющимся к настоящему времени сведениям [Bahr, Simpson, 2002] об электропроводности Балтийского щита. Сравнение с данными, полученными по анизотропии сейсмических волн [Eken et al., 2010], наталкивает на вывод о намечающейся корреляции направлений максимальной электропроводности с направлениями пониженных значений сейсмических скоростей и возможном подобии анизотропных доменных структур Балтийского щита по сейсмическим и электромаг-



нитным данным. Это видно из сопоставления распределений угла ϕ (см. рис. 3, в) и условной схемы направлений прихода «медленных» сейсмических волн в нескольких доменах (рис. 4), взятой в [Eken et al., 2010]. Однако для надежности выводов необходимо дальнейшее увеличение статистики, чтобы за счет эффекта накопления понизить уровень шумов и получить более достоверные сведения. Стоит отметить, что расчеты потребовали существенных вычислительных затрат (до двух месяцев непрерывной работы персонального компьютера). Это затрудняет получение аналогичных карт для нескольких временных периодов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью анализа латеральной неоднородности электромагнитного поля предприняты попытки полного определения всех компонент тензора электропроводности пород Балтийского щита по данным, полученным в рамках проектов IMAGE и BEAR.

Для восстановления характеристик анизотропии по данным МВЗ и МТЗ использовано приближенное доменное описание ограниченной области полигона с помощью эффективного тензора электропроводности.

Получены карты латеральных распределений собственных значений $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$, $\sigma_{z'}$ вдоль главных осей, а также азимута ϕ направлений наибольшего значения электропроводности. По имеющимся экспериментальным данным, угол ϕ в диапазоне 40—60° наилучшим образом описывает направление главной оси тензора $\sigma_{x'}$ с максимальной электропроводностью на Балтийском щите.

Сравнение результатов, полученных по сейсмическим и электромагнитным данным, указывает на возможную корреляцию азимутальных направлений максимальной электропроводности и пониженных значений сейсмических скоростей, а также сходство границ соответствующих доменных структур Балтийского щита.

В работе использованы данные, полученные магнитными обсерваториями при выполнении проекта IMAGE (<http://space.fmi.fi/image>). Автор благодарит национальные организации, которые поддерживают IMAGE и способствуют проведению наблюдений в обсерваториях на высоком уровне. Автор также использовал экспериментальные данные, полученные участниками Рабочей группы международного проекта BEAR, и признателен А.А. Жамалетдинову и всем участникам Рабочей группы за предоставленную возможность работать с этими данными.

ЛИТЕРАТУРА

Плоткин В.В. Магнитотеллурическое зондирование плавно-неоднородной анизотропной среды // Геология и геофизика, 2012а, т. 53 (8), с. 1078—1089.

Плоткин В.В. Зона влияния неоднородности среды и поля при магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика, 2012б, т. 53 (1), с. 140—149.

Плоткин В.В., Белинская А.Ю., Гаврыш П.А., Губанов А.И. Эффект нелокальности электромагнитного отклика при региональном магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (11), с. 1150—1162.

Плоткин В.В., Белинская А.Ю., Гаврыш П.А. Применение нелокальных функций отклика для обработки данных магнитотеллурического зондирования на Балтийском щите // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (9), с. 1049—1057.

Babuška V., Plomerová J., Vecsey L. Mantle fabric of western Bohemian Massif (central Europe) constrained by 3D seismic P and S anisotropy // Tectonophysics, 2008, v. 462, № 1—4, p. 149—163.

Bahr K., Simpson F. Electrical anisotropy below slow- and fast-moving plates: Paleoflow in the upper mantle? // Science, 2002, v. 295, № 5578, p. 1270—1272.

Bahr K., Bantin M., Jantos C., Schneider E., Storz W. Electrical anisotropy from electromagnetic array data; implications for the conduction mechanism and for distortion at long periods // Phys. Earth Planet. Inter., 2000, v. 119, № 3—4, p. 237—257.

Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int., 2004, v. 158, № 2, p. 457—469.

Eaton D.W., Jones A.G., Ferguson I.J. Lithospheric anisotropy structure inferred from collocated teleseismic and magnetotelluric observations: Great Slave Lake shear zone, northern Canada // Geophys. Res. Lett., 2004, v. 31, p. L19614 1—4.

Eken T., Plomerová J., Roberts R., Vecsey L., Babuška V., Shomali H., Bodvarsson R. Seismic anisotropy of the mantle lithosphere beneath the Swedish National Seismological Network (SNSN) // Tectonophysics, 2010, v. 480, № 1—4, p. 241—258.

Eken T., Plomerová J., Vecsey L., Babuška V., Roberts R., Shomali H., Bodvarsson R. Effects of seismic anisotropy on P -velocity tomography of the Baltic Shield // Geophys. J. Int., 2012, v. 188, № 2, p. 600—612.

Gatzemeier A., Moorkamp A. 3D modeling of electrical anisotropy from electromagnetic array data: hypothesis testing for different upper mantle conduction mechanisms // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2005, v. 149, p. 225—242.

Groom R.W., Bailey R. C. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion // *J. Geophys. Res.*, 1989, v. 94, p. 1913—1925.

Ji S., Rondenay S., Mareschal M., Senechal G. Obliquity between seismic and electrical anisotropies as a potential indicator of movement sense for ductile shear zones in the upper mantle // *Geology*, 1996, v. 24, № 11, p. 1033—1036.

Korja T. BEAR—Baltic Electromagnetic Array Reseach // *EUROPROBE News*, 1998, № 12, <http://www.geofys.uu.se/eprobe/Publicat/news12/news12.html>.

Kozlovskaya E., Vecsey L., Plomerová J., Raita T. Joint inversion of multiple data types with the use of multiobjective optimization: problem formulation and application to the seismic anisotropy investigation // *Geophys. J. Int.*, 2007, v. 171, № 2, p. 761—779.

Lahti I., Korja T., Kaikkonen P., Vaittinen K., Bear Working Group. Decomposition analysis of the BEAR magnetotelluric data: implications for the upper mantle conductivity in the Fennoscandian Shield // *Geophys. J. Int.*, 2005, v. 163, № 3, p. 900—914.

McNeice G.W., Jones A.G. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data // *Geophysics*, 2001, v. 66, № 1, p. 158—173.

Marti A., Queralt P., Ledo J., Farquharson C. Dimensionality imprint of electrical anisotropy in magnetotelluric responses // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2010, v. 182, № 3—4, p. 139—151.

Moorkamp M., Jones A.G., Fishwick S. Joint inversion of receiver functions, surface wave dispersion, and magnetotelluric data // *J. Geophys. Res.*, 2010, v. 115, p. B04318 1—23.

Plomerova J., Babuska V., Kozlovskaya E., Vecsey L., Hyvonen L.T. Seismic anisotropy – A key to resolve fabrics of mantle lithosphere of Fennoscandia // *Tectonophysics*, 2008, v.462, № 1—4, p. 125—136.

*Рекомендована к печати 21 октября 2014 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
14 февраля 2014 г.*