

Секция №2, устный

УДК 550.386 + 551.594

## МЕТАЛЛИЗАЦИЯ В НИЖНЕЙ МАНТИИ – ПОПЫТКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПО ГЕОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ.

Плоткин В.В.<sup>1</sup>, Дядьков П.Г.<sup>1</sup>, Овчинников С.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск,

<sup>2</sup> – Институт физики СО РАН, Красноярск.

Проводится инверсия геомагнитных данных мировой сети с целью обнаружения слоя повышенной электропроводности на глубинах 1500-2000 км как проверка гипотезы возможного фазового перехода магнезиовюстита в нижней мантии. Приводятся результаты обработки как синтетических, так и данных мировой сети - среднемесячных значений геомагнитного поля с 1920 по 2009 годы. Результаты инверсии данных мировой сети не противоречат возможному существованию слоя повышенной электропроводности в нижней мантии. Поскольку фазовый переход магнезиовюстита связан с физическими эффектами в кристаллической решетке, предприняты попытки обнаружить и анизотропию электропроводности в нижней мантии. Показана возможность получения оценок элементов тензора электропроводности, относящихся к тангенциальным компонентам электромагнитного поля, с помощью анализа характеристик одной магнитной моды.

*Ключевые слова:* магнезиовюстит, металлическое состояние, фазовый переход, нижняя мантия, электропроводность, анизотропия, геомагнитные вариации, мировая сеть

В последние годы заметно возрос интерес к изучению фазовых переходов минералов при давлениях и температурах близких к условиям в нижней мантии. Этому способствовали результаты экспериментов с мантийными минералами в лабораторных условиях. В работе одного из авторов [1] с помощью анализа фазовой диаграммы магнезиовюстита в осях давление – температура предсказан его возможный переход из полупроводникового состояния в металлическое и спиновый кроссовер из высокоспинового в низкоспиновое состояния ионов  $Fe^{2+}$ . Такой переход обусловлен физическими эффектами в кристаллической решетке в условиях, близких к условиям нижней мантии - давление ~60-80 ГПа, температура ~1900-2100°C, что соответствует глубинам ~1500-2000 км. В данной работе рассматривается вопрос, можно ли по геомагнитным данным мировой сети обнаружить в нижней мантии на глубинах 1500-2000 км предсказанный слой повышенной электропроводности, обусловленный фазовым переходом магнезиовюстита в металлическое состояние. Будут приведены результаты инверсии частотных зависимостей вариаций геомагнитного поля на временных периодах от месяца до десятилетий. С другой стороны, фазовый переход магнезиовюстита в нижней мантии связан с физическими эффектами в кристаллической решетке. Это означает также возможное существование анизотропии электропроводности в нижней мантии. Представляет интерес вопрос, можно ли с помощью геомагнитных данных обнаружить эффекты анизотропии электропроводности в нижней мантии.

Для обработки использовались данные за промежуток с 1920 по 2009 годы из банка среднемесячных значений компонент  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  геомагнитного поля, доступные через Интернет (<http://www.bcmf.fr/wmmd.html>). Небольшие пропуски в данных заполнялись с помощью линейной интерполяции. Поскольку в работе основной интерес представляли вариации геомагнитного поля, вызываемые внешними источниками, сначала со всех временных рядов, полученных на учитываемых станциях, был снят вековой ход. Это было сделано с помощью интерполяции данных по времени в каждом пункте полиномами 11-ой степени с последующим вычитанием полученного сглаженного векового хода из соответствующих временных рядов.

Общее количество станций наблюдения, работавших одновременно, за рассматриваемый промежуток возросло с ~10 в начале и до 100 и более в конце. При этом расположение и количество станций для разных моментов времени получалось различным. Чтобы преодолеть возникающие трудности и определить пространственно-временные характеристики геомагнитных вариаций компонент  $X_{\omega}$ ,  $Y_{\omega}$  и  $Z_{\omega}$  поля на угловой частоте  $\omega$ , в работе использовалась следующая модель для их представления (система сферических координат с началом в центре Земли,  $R$  - радиус Земли, нумерация сферических гармоник  $S_k(\vartheta, \varphi)$  дана в [2]):

$$\begin{aligned}
X_{\omega}(R, \vartheta, \varphi, t) &= \cos(\omega(t - t_0)) \sum_k X_{ck} S_k(\vartheta, \varphi) + \sin(\omega(t - t_0)) \sum_k X_{sk} S_k(\vartheta, \varphi), \\
Y_{\omega}(R, \vartheta, \varphi, t) &= \cos(\omega(t - t_0)) \sum_k Y_{ck} S_k(\vartheta, \varphi) + \sin(\omega(t - t_0)) \sum_k Y_{sk} S_k(\vartheta, \varphi), \\
Z_{\omega}(R, \vartheta, \varphi, t) &= \cos(\omega(t - t_0)) \sum_k Z_{ck} S_k(\vartheta, \varphi) + \sin(\omega(t - t_0)) \sum_k Z_{sk} S_k(\vartheta, \varphi),
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $t$  - мировое время,  $t_0$  - начало периода обработки,  $X_{ck}$ ,  $X_{sk}$  - и другие аналогичные параметры – амплитуды ряда, подлежащие определению с помощью метода наименьших квадратов по всему набору имевшихся геомагнитных данных на станциях совместно для всех моментов времени.

Малое количество станций в начале наблюдений затрудняет надежное определение их пространственно-временных характеристик. Чтобы получить представление об устойчивости получаемых характеристик вариаций, анализ данных проводился независимо для нескольких промежутков времени. В частности, рассматривалось 15 промежутков наблюдения с началами в 1920, 1923 годах, и так далее, по 1962 год включительно. Конец всех промежутков – 2009 год.

Использование сферических гармоник высоких степеней по рассматриваемым данным не представляется возможным из-за редкой сети станций наблюдения. Оценки их амплитуд оказываются неустойчивыми, поэтому в данной работе учитывались сферические гармоники не выше степени  $k' = 3$ .

Указанным способом были обработаны данные отдельно для каждого временного периода. Это позволило получить характеристики непрерывного частотного спектра геомагнитных вариаций в диапазоне временных периодов от нескольких месяцев до нескольких лет. Последующая инверсия и оценки влияния возможного фазового перехода магнезиовюстита в нижней мантии осуществлялись для модели сферически слоистой электропроводности Земли в пренебрежении латеральными неоднородностями (трехмерные модели существенно усложняют процедуру инверсии). Имеющиеся в коре и верхней мантии латеральные неоднородности электропроводности вносят свой вклад в наблюдаемые на земной поверхности вариации геомагнитного поля. Однако на геомагнитных вариациях с большими временными периодами от нескольких месяцев до десятков лет, которые здесь предполагается рассмотреть, существенно сказываются лишь слои нижней мантии с более высокой электропроводностью  $\geq 1$  S/m.

Для определения глубинного профиля сопротивления сферически слоистой Земли проводилась инверсия частотных зависимостей амплитуд  $e_k^{(0)}(\omega)$  и  $\frac{de_k^{(0)}}{dr}(\omega)$   $k$ -ой сферической гармоники скалярного потенциала электрического поля TE моды и его радиальной производной. Для удобства приведем здесь соотношения, необходимые, чтобы получить входные данные для инверсии и связывающие эти величины со спектральными амплитудами геомагнитных вариаций в (1):

$$\begin{aligned}
e_{k0}^{(0)} &= \frac{i\omega\mu_0 R^2}{k'(k'+1)} [Z_{\omega}]_k, \quad [Z_{\omega}]_k = Z_{ck} + iZ_{sk}, \quad k' \neq 0, \\
\frac{de_k^{(0)}}{dr} &= \frac{i\omega\mu_0 R^2}{k'(k'+1)} [\text{div}_{\perp} \bar{H}_{\omega}]_k, \quad k' \neq 0,
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\text{div}_{\perp} \bar{H}_{\omega} = -\frac{1}{R \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} (\sin \vartheta X_{\omega}) + \frac{1}{R \sin \vartheta} \frac{\partial Y_{\omega}}{\partial \varphi},$$

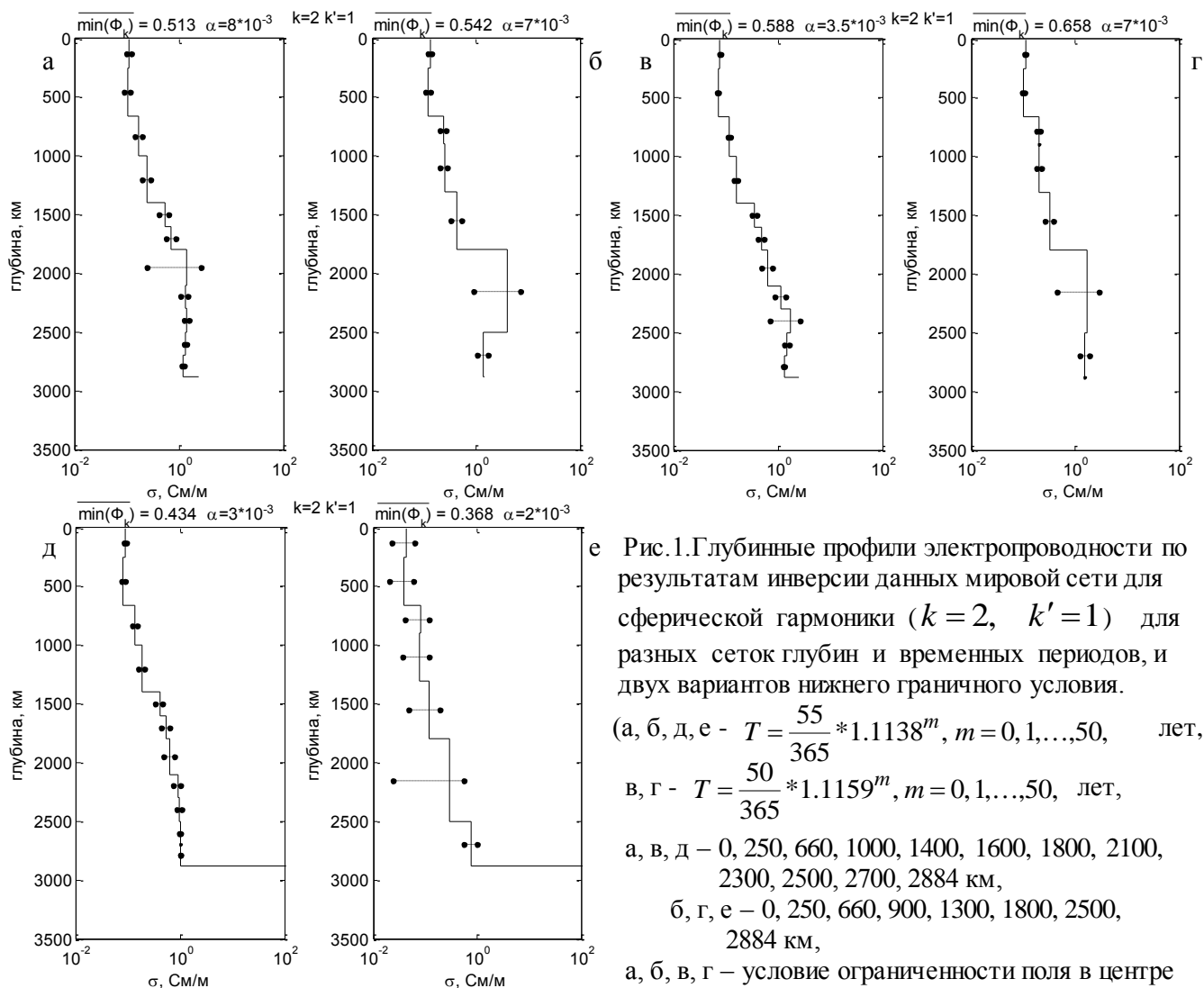
$$X_{\omega} = \sum_k (X_{ck} + iX_{sk}) S_k(\vartheta, \varphi), \quad Y_{\omega} = \sum_k (Y_{ck} + iY_{sk}) S_k(\vartheta, \varphi),$$

где выражения в квадратных скобках с нижним индексом  $k$  обозначают амплитуду  $k$ -ой сферической гармоники в разложении выражения в этих скобках в ряд по  $S_k(\vartheta, \varphi)$ . В (2) учтено, что при регистрации геомагнитных данных используется система координат с осью  $OX$ , направленной на север, осью  $OY$  - на восток и осью  $OZ$  - вниз. По заданной на поверхности Земли величине  $(e_{k0}^{(0)})_{\text{exp}}$  для любой текущей модели среды на  $m$ -ой итерации можно однозначно

вычислить радиальную производную  $\left(\frac{de_{k0}^{(0)}}{dr}\right)_m$  потенциала на поверхности. Инверсия тогда

заключается в подгонке методами оптимизации текущих значений величин радиальной производной, зависящих от искомым параметров модели среды, к их “экспериментальным” значениям.

Описанная процедура была проведена для каждого из 15 промежутков наблюдения с началами в 1920, 1923 годах, и так далее, по 1962 год включительно. Конец всех промежутков – 2009 год. Результаты усреднения по промежуткам полученных с помощью сферической гармоники  $k = 2, k' = 1$  глубинных распределений электропроводности отражены на рис. 1.



Основное затруднение связано с имеющейся областью эквивалентности решений обратной задачи. В ходе инверсии мы выявляли эквивалентные решения как с образованием слоя повышенной электропроводности на глубинах, близких к слою фазового перехода магнезиовюстита, так и с монотонным ростом электропроводности к границе внешнего ядра. Сопоставляя полученные средние глубинные профили электропроводности, можно отметить на них повышенный рост электропроводности на глубинах более 1500 км, и даже формирование в нескольких случаях выделенного слоя повышенной электропроводности.

Фазовый переход магнезиовюстита и выявленная сейсмическая анизотропия в нижней мантии, которую обычно связывают с D'' слоем, вызывают повышенный интерес к вопросу, будет ли там, и на каких глубинах, обнаружена анизотропия электропроводности. Были получены уравнения первого приближения для слабой анизотропии погруженного сферического слоя в Земле, намечены пути решения обратной задачи и предприняты первые попытки выявить признаки наличия анизотропии

электропроводности на глубинах нижней мантии по данным мировой сети геомагнитных обсерваторий. На рис. 2 отражены относительные величины добавок в тензор электропроводности в зависимости от временного периода, определенные по двум различным наборам сферических гармоник.

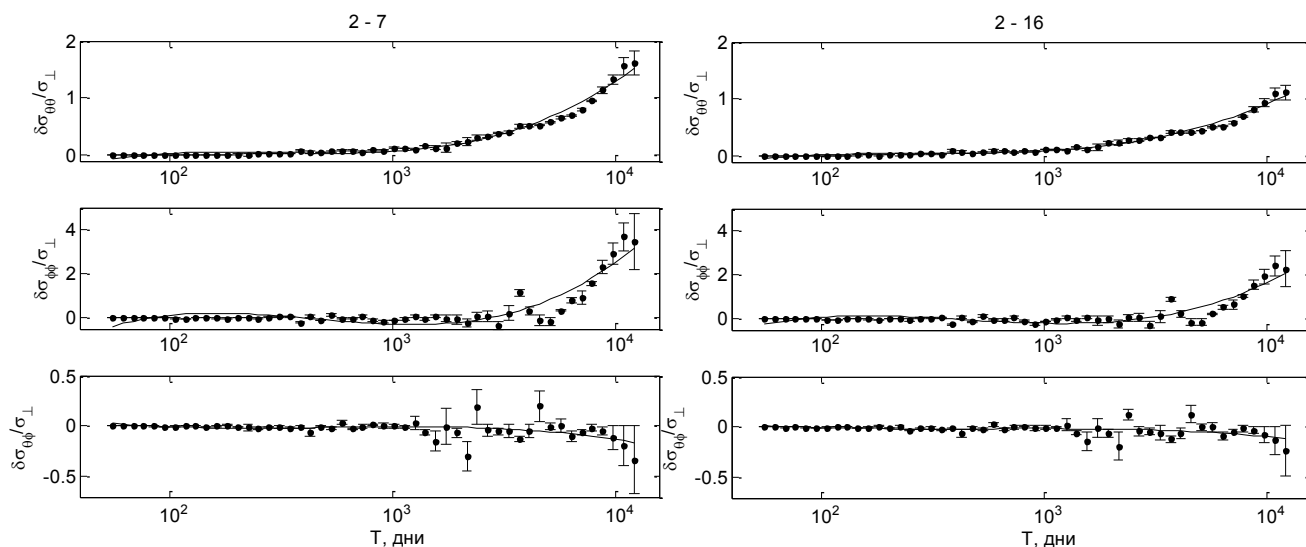


Рис. 2. Относительные величины добавок  $\delta\sigma_{gg}, \delta\sigma_{\phi\phi}, \delta\sigma_{g\phi}$  (вместе с с.к.о.) в тензор электропроводности в зависимости от временного периода, определенные по двум различным наборам сферических гармоник (номера учтенных гармоник указаны сверху, сплошные линии – результат аппроксимации полиномами).

Анизотропия становится заметной для геомагнитных вариаций с периодом более 10 лет, и ее вклад увеличивается в конце рассматриваемого диапазона периодов. Компоненты тензора  $\delta\sigma_{gg}$  и  $\delta\sigma_{\phi\phi}$  заметно превосходят  $\delta\sigma_{g\phi}$ . Дополнительным подтверждением сказанному являются результаты моделирования анизотропии электропроводности в нижней мантии с синтетическими данными. Считалось, что модель среды состоит из верхней мантии с электропроводностью  $\bar{\sigma}_{\perp} = 10^3$  См/м и нижней мантии с анизотропным сферическим слоем, в котором  $\sigma_{\perp} = 0.1$  См/м. Добавки  $\delta\sigma_{gg}, \delta\sigma_{\phi\phi}, \delta\sigma_{g\phi}$  в тензор электропроводности подбирались так, чтобы добиться наибольшего сходства с результатами, приведенными на рис. 2. Найдены оптимальные значения для относительных добавок:  $\delta\sigma_{gg}/\sigma_{\perp} \approx 0.2$ ,  $\delta\sigma_{\phi\phi}/\sigma_{\perp} \approx 0.4$  и  $\delta\sigma_{g\phi}/\sigma_{\perp} \approx -0.02$ .

В рассмотренной выше модели границы анизотропного слоя считались заданными и известными из упомянутых теоретических представлений о фазовом переходе магнезиовюстита в нижней мантии на глубинах 1400 – 1900 км. Принималось во внимание, что возможным вкладом анизотропии электропроводности верхней мантии и коры в характеристики поля на земной поверхности на больших рассматриваемых временных периодах можно пренебречь.

В работе использованы данные, полученные магнитными обсерваториями мировой сети при выполнении проектов INTERMAGNET and World Monthly Means Database (<http://www.bcmt.fr/wmmd.html>). Авторы благодарят национальные организации, которые способствуют проведению наблюдений в обсерваториях на высоком уровне и поддерживают проекты. Работа выполнена при финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта № 96 СО РАН.

1. Овчинников С.Г. Металлизация и спиновый кроссовер при высоком давлении в магнезиовюстите ( $Mg_{1-x}Fe_xO$ ) // Письма в ЖЭТФ, 2011. Т. 94. № 3. С. 210-214.
2. Плоткин В.В., Дядьков П.Г., Овчинников С.Г. Возможный вклад фазового перехода магнезиовюстита в нижней мантии земли в геомагнитные данные // Геология и геофизика, 2013. Т. 54. № 3. С. 345-356.