УДК 550.837.21

Е.В.МОЙЛАНЕН, *аспирант, moilanen@mail.ru*
П.Ю.ПУШКАРЕВ, *канд. физ.-мат. наук, доцент, pavel_pushkarev@list.ru*
Н.Л.ШУСТОВ, *научный сотрудник, nicksh@hotmail.ru*
Московский государственный университет

E.V.MOILANEN, *post-graduate student, moilanen@mail.ru*
P.Yu.PUSHKAREV, *PhD in phys. & math., associate professor, pavel_pushkarev@list.ru*
N.L.SHUSTOV, *research assistant, nicksh@hotmail.ru*
Moscow State University

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛУБИННОГО МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ БАЗЕ МГУ В КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ

С мая 2011 г. в немагнитном павильоне на геофизической базе Московского университета в Калужской области проводится непрерывная регистрация длиннопериодных вариаций магнитотеллурического поля. Установлено три комплекта электрических линий с разными типами электродов. Различными группами авторов была произведена обработка полученных записей, рассчитаны кривые кажущегося сопротивления, которые были сопоставлены с кривой кажущегося сопротивления, полученной по магнитовариационным данным Московской обсерватории. Для глубинной части обобщенной кривой (T > 30 с) была решена одномерная обратная задача, по результатам которой, в частности, удалось получить предварительные оценки электропроводности на коровых, верхне- и среднемантийных глубинах.

***Ключевые слова*:** магнитотеллурическое зондирование, магнитовариационное зондирование, Восточно-Европейская платформа, астеносфера, среднемантийный слой.

PRELIMINARY RESULTS OF DEEP MAGNETOTELLURIC SOUNDING ON GEOPHYSICAL BASE OF MOSCOW UNIVERSITY IN KALUGA REGION

Since May 2011 we have collected long-period magnetotelluric (MT) data in non-magnetic pavilion on geophysical base of Moscow University in Kaluga region. Three sets of electrical lines with different types of electrodes were installed. Different groups of authors have made processing of MT records, calculation of apparent resistivity curves. These curves were compared with apparent resistivity curve obtained on magnetovariational data of Moscow observatory. The 1D inverse problem was solved for the deep part of the generalized curve (T > 30 s). In particular we succeeded in finding preliminary conductivity values on the depth of crust, upper and middle mantle.

***Key words*:** magnetotellurics, magnetovariational sounding, East European craton, asthenosphere, mid-mantle layer.

Введение. Глубинная электропроводность – важный источник информации о составе и строении, а также о флюидном, термальном и реологическом режимах недр. Оценить ее распределение в коре и мантии Земли можно в результате интерпретации данных о длиннопериодных вариациях электромагнитного поля.

Исследования глобального распределения мантийной электропроводности

проводятся с использованием магнитовариационных (МВ) данных, полученных на орбите Земли и по сети геомагнитных обсерваторий. Данные геомагнитных обсерваторий использовались для оценки глубинной электропроводности еще в XIX в. [6]. С тех пор методы интерпретации данных непрерывно развивались и был пройден большой путь от двухслойных до детальных трехмерных моделей Земли [2, 13, 14].

В не меньшей степени этому способствовало и развитие сети геомагнитных обсерваторий. В настоящее время сеть INTERMAGNET объединяет свыше 100 обсерваторий, удовлетворяющих современным стандартам. Основным недостатком этой сети является ее неравномерность. Поэтому в последние годы ведется работа по созданию геомагнитных обсерваторий в океанах (на островах) и в пределах слабо охваченных территорий на материках.

Создание системы регистрации длиннопериодных вариаций. В центральной части Восточно-Европейской платформы, на геофизической базе МГУ в д. Александровка Калужской области был создан немагнитный павильон. База располагается в районе с низкими промышленными шумами. Так, до ближайших электрифицированных железных дорог ~70 км, а до ближайшего районного центра ~20 км. До строительства была произведена магнитная съемка местности, строительных материалов. Было выявлено, что при застывании цемента из отдельных немагнитных материалов получается смесь с достаточно большим значением намагниченности. Удалось подобрать материалы для создания немагнитного цемента. После возведения павильона в начале 2011 г. в нем были установлены две магнитотеллурические (МТ) станции LEMI-417M и одна МВ-станция LEMI-025. Для регистрации магнитного поля в них используются феррозондовые магнитометры. Для того, чтобы прибор отвечал требованию обеспечения высокого быстродействия и глубокого подавления индустриальных помех, в нем применена оригинальная комбинация аналоговых и цифровых фильтров.

Для длиннопериодных МТ-наблюдений необходимы стабильные неполяризующиеся электроды. Были установлены три комплекта электрических линий со следующими электродами:

• украинские электроды на основе $CuSO_4 \cdot nH_2O$ – штатные электроды МТ-станции LEMI (LEMI);

• электроды, разработанные и изготовленные в университете г. Упсала (Швеция) на основе $PbCl_2$ ($PbCl_2$-электроды), заземление было произведено по технологии Н.А.Пальшина;

• электроды, созданные на базе аккумуляторов на графитной основе («батарейки»).

Сопротивления заземлений на линиях с электродами LEMI и «батарейками» не превышали 1 кОм, средние сопротивления заземлений $PbCl_2$-электродов составляли 50 кОм после двух дней измерений. Однако после первых четырех месяцев записи наиболее стабильный электрический сигнал был получен именно на $PbCl_2$-электродах (значение тренда в среднем составляло 2 мкВ/м в сутки). За этот период было зарегистрировано несколько геомагнитных бурь. Одна из них на фоне суточных вариаций представлена на рис.1.

Описание алгоритмов обработки и ее результатов. Для получения кривых кажущихся сопротивлений авторы воспользовались оригинальным алгоритмом, любезно предоставленным В.Ю.Семеновым и М.С.Петрищевым. Кроме того, данные были переданы И.М.Варенцову и Н.А.Пальшину (рис.2).

В.Ю.Семенов применяет обработку данных зондирования на основе спектрального анализа электромагнитного (ЭМ) поля [7]. Основным достоинством этого анализа является возможность оценить справедливость конкретного выполнения линейных связей между компонентами поля. И.М.Варенцов использует многоточечные процедуры оценивания передаточных операторов. Они основаны на робастном осреднении оценок для нескольких базовых пунктов [11, 12]. Н.А.Пальшин применяет метод, описанный в работе [3].

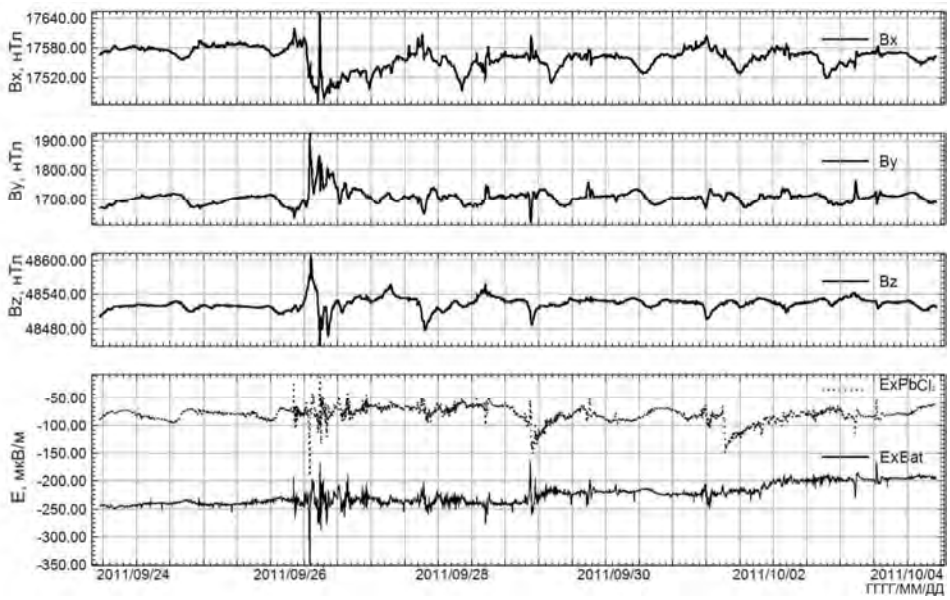


Рис.1. Геомагнитная буря, зарегистрированная на геофизической базе МГУ в Калужской области в сентябре 2011 г. B_x, B_y, B_z – компоненты вектора магнитной индукции; E – компонента напряженности электрического поля для $PbCl_2$-электродов и Bat-«батареек»

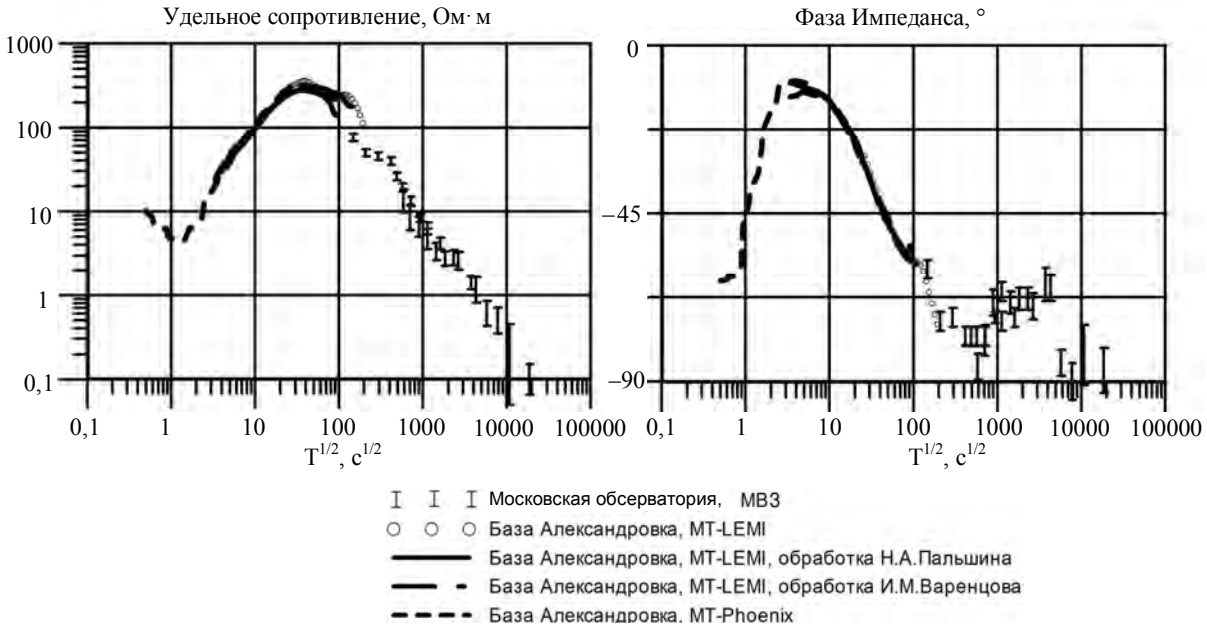


Рис.2. Кривые кажущегося сопротивления, полученные по данным Московской обсерватории [7] и павильона на геофизической базе МГУ

Полученные кривые (эффективная компонента для МТ-кривых) хорошо согласуются между собой вплоть до периода T = 4 ч ($\sqrt{T} = 120\sqrt{c}$). Далее начинаются существенные расхождения. Как правило, результаты МТ-зондирований не надежны для периодов более 4 ч из-за влияния солнечно-суточных вариаций и суточного хода температуры [10]. Однако для этих периодов МТ-зондирования (МТЗ) могут быть заменены МВ-зондированием (МВЗ) [8]. Для этих целей были привлечены данные Московской обсерватории (рис.2). В настоящем исследовании мы использовали наиболее простую, горизонтально-однородную (1D) модель среды. Реальные 2D-

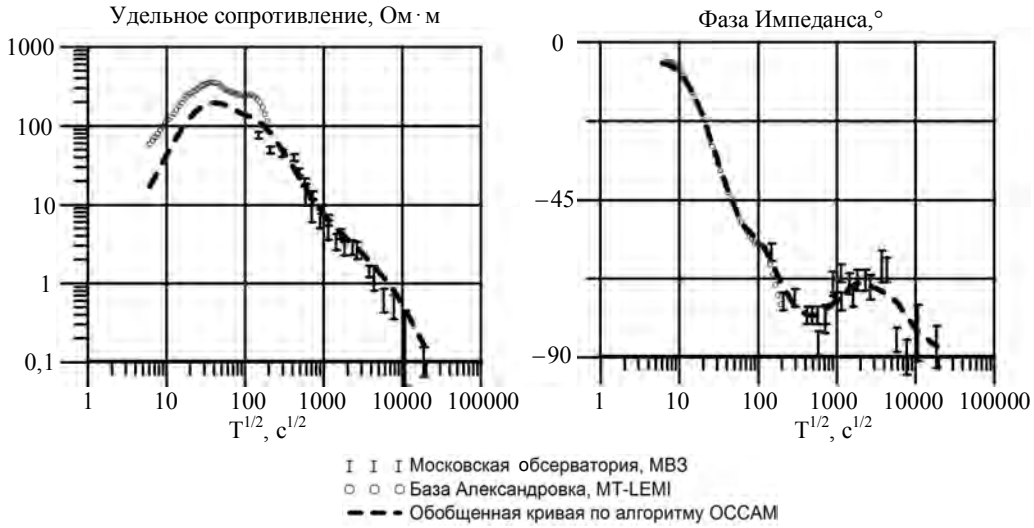


Рис.3. Результат коррекции значений кажущихся сопротивлений при решении обратной задачи

и 3D-эффекты вызывают искажения кривых МТЗ и МВЗ, вследствие чего они могут не согласовываться между собой, в первую очередь – по уровню кривых кажущегося сопротивления [8]. Для устранения этого эффекта мы сдвигали кривую МТЗ, которая часто бывает смещена по уровню гальваническими приповерхностными эффектами, к уровню кривой МВЗ.

Решение одномерной обратной задачи. Вначале была выполнена одномерная инверсия только по фазе импеданса по алгоритму OCCAM [1]. Таким образом, были скорректированы значения модуля кажущихся сопротивлений за приповерхностные неоднородности, полученные по МТ-данным (рис.3). Для скорректированных МТ- и МВ-данных совместно была проведена инверсия по хорошо известным алгоритмам решения обратной задачи D+ и OCCAM. В D+ реализован алгоритм, позволяющий создавать геоэлектрические горизонтально-слоистые среды, в которых проводящие слои аппроксимируются тонкими пленками с конечной проводимостью [4]. В одномерной инверсии OCCAM используется алгоритм, описанный в работе [1] (рис.4). Кроме того, использовался интерактивный подбор, реализованный в программе MT-1D, позволяющий построить модель из небольшого числа слоев. Подбирается наиболее геологически осмысленный результат в пределах требуемой погрешности.

По результатам всех трех одномерных инверсий выделяются осадочный слой, земная кора, астеносфера и среднемантийный слой (рис.4). Толстослоистая модель, полученная по MT-1D, сходна с моделью OCCAM. Осадочный слой Московской синеклизы подобран мощностью 800 м, кровля астеносферы выделяется на глубине 280 км, а кровля среднемантийного слоя – на глубине 660 км. Результаты решения по D+, на наш взгляд, также выглядят убедительно. Зафиксирована кровля астеносферы на глубине 230 км и граница на глубине 410 км. По пиролитовой модели А.Рингвуда, это верхняя граница переходной зоны (410-520 км), в которой оливин превращается в свой высокобарический аналог – вадслеит [5, 13]. Также по алгоритму D+ была выявлена кровля проводящего слоя (160 См) на глубине 65 км. Скорее всего, данный слой является проявлением относительно низкоомных горизонтов нижней коры, находящихся на меньших глубинах. Расчет показал, что данный слой имеет меньшую проводимость, чем у осадочного слоя (250 См).

Выводы. Для изучения глубинного строения региона необходимы длительные непрерывные измерения МТ-МВ-полей. С мая 2011 г. проводится непрерывная регистрация компонент МТ-поля. По результатам интерпретации даны оценки глубин для кровли астеносферы и кровли среднемантийного слоя.

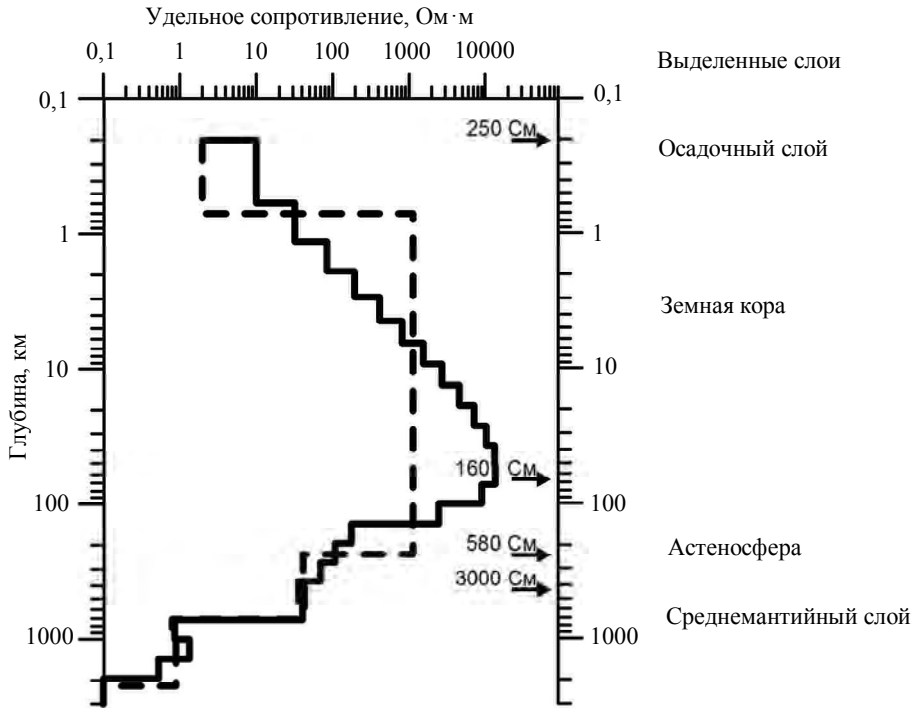


Рис.4. Результат инверсии кривых МТЗ, полученных на Александровской геофизической базе (решение по D+ показано стрелкой с указанием проводимости, алгоритма OCCAM – сплошной, Mt-1D – пунктирной линиями)

В дальнейшем планируется развитие базы МГУ как комплексной геофизической обсерватории, нацеленной на изучение глубинного строения региона, мониторинг его геодинамической активности, а также на создание основы для проводимых в Калужской области геофизических работ самой разной направленности.

Авторы выражают признательность И.М.Варенцову и Н.А.Пальшину за предоставленные материалы, В.Ю.Семенову и М.С.Петрищеву за возможность использования оригинальной программы обработки МТ-записей. В.А.Куликову, В.К.Хмелевскому, А.Г.Яковлеву и А.Ю.Палёнову авторы признательны за усилия по организации на Александровской базе системы регистрации длиннопериодных вариаций. Развитие геофизической базы МГУ, в том числе строительство немагнитного павильона, осуществляется благодаря поддержке ООО «Северо-Запад». Низкочастотная аппаратура закуплена в рамках проекта «Программа развития МГУ до 2020 года» (станции LEMI-417M и LEMI-025). Комплексные исследования глубинного строения в районе, в котором расположена геофизическая база, выполняются при финансовой поддержке РФФИ, гранты 11-05-00491-а, 11-05-00496-а, 11-05-92501-АФГИР-Э_а, 11-05-97515-р_центр_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G.* Occam's inversion; a practical algorithm for the inversion of electromagnetic data // Geophysics. 1987. 52. P.289-300.

2. *Kuvshinov A.V.* Deep electromagnetic studies from land, sea, and space. Progress status in the past 10 years // IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop Review Paper. Giza, Egypt, September 18-24, 2010.

3. *Larsen J.C.* Noise reduction in electromagnetic time series to improve detection of seismic-induced signals // J.Geomag. Geoelectr, 1997. 49. P.1257-1265.

4. *Parker R.L.* The inverse problem of electromagnetic induction: existence and construction of solutions based on incomplete data // J.Geophys. Res. 1980. 85. P.4421-4428.

5. *Ringwood A.E.* Composition and Petrology of the Earth's Mantle // McGraw-Hill. New York, 1975.

6. *Schuster A., Lamb H.* The diurnal variation of terrestrial magnetism // Phi. Trans. Roy. Soc. London. 1889. 45. P.481-486.

7. *Semenov V.Yu., Adam A., Hvozdara M., Wesztergom V.* Geoelectrical structures of the Earth's mantle in Pannonian Basin // Acta Geod. et Geophys. Hungarica. 1997. 32, No 1-2.

8. *Semenov V.Yu.*, *Pek J.*, *Ádám A.*, *Jóźwiak W.*, *Ladanyvskyy B.*, *Logvinov I.M*, *Pushkarev P.*, *and Vozar J.* Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project //Acta Geophys. 2008. 56, 4. P.957-981, DOI: 10.2478/s11600-008-0058-2.

9. *Semenov V.Yu.*, *Ladanivsyy B.*, *Novozynski K.* New Induction Sounding Tested in Central Europe // Acta Geophysica. 2011. V.59, № 5. P.815-832.

10. *Shimizu H.*, *Yoneda A.*, *Baba K.*, *Utada H.* and Palshin N.A. Sq effect on the electromagnetic response functions in the period range between 104 and 105 s // Geoph. J. Int. 2011. V. 186. P.193-206.

11. *Varentsov Iv.M.*, *Sokolova E.Yu.*, *Martanus E.R.* EMTESZPomerania WG. Array view on EM transfer functions in the EMTESZPomerania project. Study of geological structures containing wellconductive complexes in Poland // Publ. Inst. Geoph., Pol. Acad. Sci. C95(386). 2005. P.107–121.

12. *Varentsov Iv.M.* Arrays of simultaneous electromagnetic soundings: design, data processing and analysis. Electromagnetic sounding of the Earth's interior. Methods in geochemistry and geophysics. V. 40. / Ed. V.V.Spichak // Elsevier. 2007. P.263–277.

13. *Utada H.*, *Koyama T.*, *Shimizu H.* and *Chave A.D.* A semi-global reference model for electrical conductivity in the mid-mantle beneath the north Pacific region // Geophys. Res. Lett. 2003. 30, 43-1.

14. *Zhdanov M.S.*, *Green A., Gribenko A.*, *Cuma M.* Large-scale three-dimensional inversion of EarthScope MT data using the integral equations method // Физика Земли. 2010. № 8. С.27-35.