

ПРИЛИВНЫЕ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ИСКУССТВЕННОГО СНЧ-ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА БАЛТИЙСКОМ КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ЩИТЕ

Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф.

Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН, г. Мурманск

Представлены результаты эксперимента по исследованию динамики электромагнитного поля стационарного искусственного источника СНЧ-диапазона в течение 30 суток на Балтийском кристаллическом щите. Обнаружены суточные вариации полей и медленные 14-суточные вариации поверхностного импеданса. Суточные вариации полей главным образом вызваны колебаниями ионосферных параметров из-за изменений освещенности Солнцем. В поведении поверхностного импеданса обнаружены вариации с периодом, близким к 14 суткам. Сопоставление этих вариаций с медленной приливной деформацией земной коры позволяет сделать вывод об их связи с приливными процессами в земле. На основе результатов моделирования получены оценки возможных изменений структуры и проводимости подстилающей среды, вызываемых приливными деформациями.

Ключевые слова: приливные вариации, импеданс, контролируемый источник, СНЧ

Исследования вариаций кажущегося сопротивления импеданса на поверхности земли проводились неоднократно [1-3]: как с использованием естественных полей, так и с применением контролируемого СНЧ-источника. Измерения в двух точках на Балтийском кристаллическом щите, дали значительно отличающиеся друг от друга результаты: в районе Вуоксы (Ленинградская обл.) [1] размах суточных вариаций не превышал 7%, но в п. Авва-Губа (Кольский п-ов) [2] наблюдались вариации величиной до 30% за сутки. В связи с этим возник интерес к дополнительным исследованиям этого явления и в 2009 г. на Кольском п-ове был проведен новый эксперимент по мониторингу вариаций электромагнитного поля, создаваемого тем же самым СНЧ-источником. В отличие от вышеуказанных работ, в которых проводились эпизодические измерения, продолжительность рассматриваемого в данной работе нового эксперимента охватывает один сидерический период обращения Луны.

Для наблюдения слабых приливных вариаций электромагнитного поля очевидны преимущества искусственного контролируемого источника с известными параметрами излучения. При изучении влияния приливных эффектов в земной коре наиболее удобна промежуточная зона, находящаяся на удалении от передатчика в пределах 0.5-2 высот волновода Земля-ионосфера. Поле в этой зоне при горизонтально-слоистой структуре земли имеет установившуюся степенную зависимость от ее проводимости, а влияние ионосферы крайне мало.

Описание эксперимента

Радиопередающая установка СНЧ-диапазона (рис. 1) [4] осуществляла практически непрерывную круглосуточную генерацию электромагнитного поля с частотой 82 Гц при силе тока в передающей антенне примерно 200 А. Измерение напряженности электрического и магнитного полей производилось в обсерватории ПГИ КНЦ РАН Ловозеро – на удалении порядка 90 км на юго-восток от источника излучения.



Рис. 1. Карта-схема эксперимента

По результатам наблюдений были получены временные ряды значений больших полуосей горизонтальных эллипсов поляризации электрического и магнитного полей A_e и A_m . Ряды значений

A_e и A_m были синхронно нормированы на силу тока в антенне, что позволило исключить зависимость результатов измерений от вариаций тока в антенне.

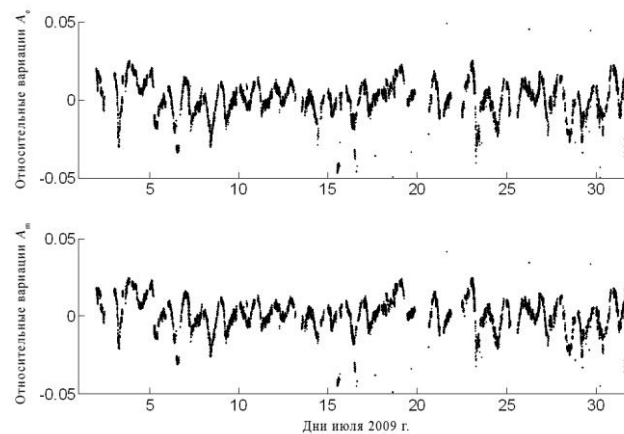


Рис. 2. Измеренные относительные вариации больших полуосей эллипсов поляризации электрического (вверху) и магнитного (внизу) полей

Безразмерные относительные вариации больших полуосей электрического и магнитного полей, т. е. вариации, приведенные к среднему значению по выборке, показаны на рис. 2. На интервалах, где отсутствовали данные измерений, была проведена интерполяция рядов кубическими полиномами. Для удобства последующей обработки ряды данных были сглажены. Относительные вариации полуосей эллипсов поляризации имеют выраженную составляющую с периодом ≈ 24 ч, причем суточные максимумы интенсивности полей приходятся примерно на 0 ч UT, а минимумы – на 10-12 ч UT.

Используя известные выражения, описывающие поле линии, заземленной на концах [5], для заданных в эксперименте расстояний от источника, частоте излучения, а также учитывая практически линейную поляризацию поля, можно показать, что отношение A_e/A_m формально совпадает с выражением для поверхностного импеданса однородного полупространства [6]: $\tilde{Z} \equiv A_e/A_m \approx |E_y/H_x| \approx |Z|$.

Обсуждение результатов

Суточные вариации δE и δH , как показали измерения, более чем в 10 раз превышают относительный размах вариаций импеданса $\delta \tilde{Z}$. Однако при малых вариациях проводимости земли соотношения между ними при разложении в ряд Тейлора выражений для поля протяженной линии без учета влияния ионосферы, дает значительно меньшую разницу: $\delta E \approx 2\delta H \approx 2\delta \tilde{Z}$. Следовательно, в условиях данного эксперимента при исследовании приливных вариаций влиянием ионосферы на поле нельзя пренебрегать. Изменения в ионосфере из-за меняющейся ее освещенности Солнцем, а также случайные возмущения, затрудняют обнаружение слабых по интенсивности вариаций полей, обусловленных приливными силами, в первую очередь на относительно коротких периодах измерений.

Для надежного обнаружения приливных вариаций полей требуется более продолжительный период наблюдений, а также применение специальных методов анализа, позволяющих выделять их на фоне преобладающих периодических процессов иного происхождения. Временной ход \tilde{Z} связан с изменениями кажущегося сопротивления в результате действия приливных гравитационных сил, которое можно оценивать по деформации земной коры. На рис. 5 показан теоретический график вертикального приливного смещения земной поверхности в районе проведения измерений и его огибающие – для июля 2009 г. За нулевой уровень по вертикали условно принято среднее положение земной поверхности за рассматриваемый период. Расчеты приливных смещений твердой Земли выполнены с помощью программы Solid [7], реализующей вычисление на основе алгоритмов, описанных в [8]. На рис. 5 средняя кривая, проходящая между верхней и нижней огибающими, описывает медленные приливные смещения земной поверхности и имеет преобладающую периодичность приблизительно 14 сут.

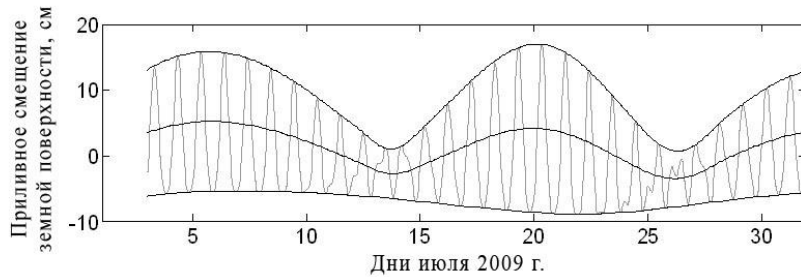


Рис. 5. Расчетные кривые вертикального приливного смещения поверхности (обозначение кривых – в тексте)

График аппроксимирующего полинома 8-ой степени для временного ряда \tilde{Z} был сопоставлен с медленными вариациями смещения земной поверхности (рис. 6). Видно, что медленные вариации импеданса и приливные смещения земной поверхности протекают практически в противофазе. При этом экстремумы кривой медленной вариации импеданса \tilde{Z} расположены вблизи экстремумов медленных смещений земной поверхности (приблизительные даты: 05.07.2009, 12.07.2009, 18.07.2009 и 25.07.2009).

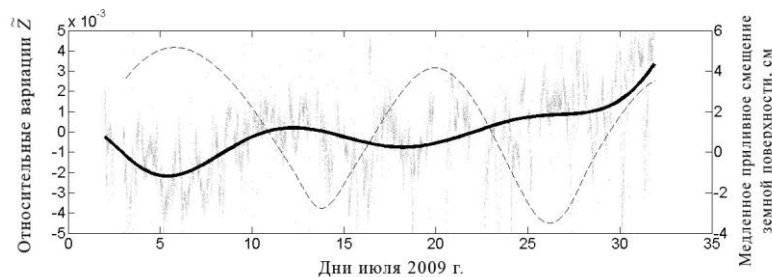


Рис. 6. График медленного приливного смещения земной поверхности (пунктир) и относительные вариации импеданса (светлый тон - данные измерений; сплошная черная кривая – сглаженные медленные вариации)

В работе [9] приведен профиль кажущегося сопротивления земной коры, определенный по результатам электромагнитного зондирования на Кольском п-ове. Используя результаты этой работы, рассмотрим модель плоско-слоистой структуры. Она представляет собой два слоя с мощностями $d_1=3 \cdot 10^3$ м, $d_2=7 \cdot 10^3$ м и удельными сопротивлениями $\rho_1=9 \cdot 10^4$ Ом·м, $\rho_2=4 \cdot 10^4$ Ом·м соответственно, лежащих на полубесконечной подложке с удельным сопротивлением $\rho_3=3 \cdot 10^5$ Ом·м.

При характерном для Кольского п-ова кажущемся сопротивлении земной коры примерно $2 \cdot 10^4$ Ом·м величина скин-слоя для поля с частотой 82 Гц составляет приблизительно 8 км и поэтому более тонкие особенности структуры, а также проводимость на больших глубинах можно не учитывать. Так как такая величина скин-слоя не превышает суммарной мощности слоев 1 и 2, то вариации кажущегося сопротивления в основном определяются изменениями удельных сопротивлений верхних слоев 1 и 2 и вертикальным смещением плоскости, разделяющей их.

В нашем эксперименте максимальный относительный размах вариаций импеданса \tilde{Z} на периоде не более суток наблюдался 30.07.2009 г. и составил величину $\approx 0.9\%$. В среднем размах суточных вариаций \tilde{Z} составляет 0.3%-0.5%. Используя эти оценки, были произведены расчеты возможных изменений параметров модельной среды на периодах не более 24 ч по двум сценариям:

а) вычисления показали, что для принятой модели изменение импеданса на 0.9% (по абсолютной величине – от 5.82 Ом до 5.77 Ом при среднем $Z_0 \approx 5.80$ Ом) соответствует поднятию границы раздела слоев 1-2 от глубины ≈ 3.080 км до ≈ 2.920 км, т. е. примерно на 160 м;

б) если же зафиксировать положение границы раздела слоев 1-2, то для обеспечения требуемых вариаций импеданса должны изменяться их удельные проводимости. При этом σ_1 нужно изменить от $\approx 1.10 \cdot 10^{-5}$ См/м до $\approx 1.123 \cdot 10^{-5}$ См/м (приблизительно на 2%), а σ_2 – от $\approx 2.485 \cdot 10^{-5}$ См/м до $\approx 2.516 \cdot 10^{-5}$ См/м (примерно на 1.3%). Физическая осуществимость такого варианта приливного процесса более вероятна благодаря тому, что необходимые изменения σ_1 и σ_2 невелики. Такие вариации проводимостей вполне могут быть обеспечены вертикальным перемещением распределенных в толще коры проводящих грунтовых вод, накапливаемых на глубинах ниже скин-слоя ≈ 8 км. Это

согласуется с результатами работы [10], где говорится о том, что для верхних слоев земной коры на Кольском п-ове характерна субвертикальная ориентация пор, содержащих влагу, проникающую с поверхности, переходящая на глубинах примерно 10 км в субгоризонтальную, создавая условия для накопления поверхностных грунтовых вод.

Выводы

Основная периодичность вариаций СНЧ-полей с относительной величиной до 5%– суточная с максимумом поля около полуночи и минимумом – около полудня. Очевидно, главную роль в суточных вариациях поля играет ионосфера, поскольку сопоставимых значимых суточных вариаций поверхностного импеданса, показывающих изменчивость параметров подстилающей среды, в это же время не наблюдается. Вариации ионосферы вследствие изменения освещенности Солнцем, а также случайные ионосферные возмущения препятствуют обнаружению слабых суточных приливных эффектов в электромагнитном поле и в импедансе.

Наблюдения на длительном интервале – в течение нескольких суток – позволяют сглаживать влияние случайных возмущений, и тем самым улучшаются условия для обнаружения медленных приливных вариаций импеданса и полей. В частности, в поведении импеданса были обнаружены 14-суточные вариации с относительным размахом в пределах 0.3%-0.5%. При этом колебания происходили практически в противофазе с медленной приливной волной вертикального смещения земной поверхности.

Моделирование на основе реальных значений вариаций \tilde{Z} , полученных в эксперименте, показало, что влияние приливных эффектов в земной коре на поверхностный импеданс заключалось, вероятнее всего, в относительно слабых колебаниях удельной проводимости слоев (1%-2%).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт от 11 октября 2011 г. № 16.515.12.5012).

Список литературы

1. Saraev A. K., Pertel M. I. and Malkin Z. M. Correction of the electromagnetic monitoring data for tidal variations of apparent resistivity // *Journal of Applied Geophysics*. 2002. Vol. 49. № 1-2. P. 91-100.
2. Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. Влияние лунно-солнечных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры // Доклады Академии наук. 2000. Т. 270. № 2. С. 342-349.
3. Saraev A.K., Pertel M.I. and Malkin Z.M. Monitoring of tidal variations of apparent resistivity // *Geologica Acta*. 2010. Vol. 8. № 1. P. 5-13.
4. Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Сидоренко А.Е., Миличенко А.Н., Собчаков Л.А., Васильев А.В. Влияние ионосферы на электромагнитные волны от наземного излучателя в диапазоне частот 1-10 Гц // *Геомagnetизм и аэрономия*. 2007. Т. 47. №6. С. 1-2.
5. Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. 2-е изд. Л.: Недра. 1980. 391 с.
6. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. М.: Наука. 1991. 196 с. ISBN 5-02-006827.
7. Solid [Электронный ресурс] : программа для вычисления приливных смещений твердой Земли / программирование – Milbert D. – Version updated: 06/11/2012. – Электрон. прогп. (1 файл: 922191 байт). – Solid Earth Tide, 2012. – Режим доступа: <http://home.comcast.net/~dmilbert/softs/solid.htm>, свободный. – Загл. с экрана.
8. McCarthy, D. D. and Petit, G. IERS Conventions (IERS Technical Note; 32). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. 2004. 127 pp. ISBN 3-89888-884-3.
9. Жамалетдинов А. А. Новое о строении континентальной земной коры по результатам электромагнитных зондирований с мощными контролируруемыми источниками поля // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438. №4. С. 538-542.
10. Николаевский В.Н. Катакластическое разрушение пород земной коры и аномалии геофизических полей // *Физика Земли*. 1996. № 4. С. 41-50.