

А. П. Николаенко

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 64085, Украина

E-mail: sasha@ire.kharkov.ua

МОНИТОРИНГ ПИКОВЫХ ЧАСТОТ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА И АНАЛЕММА

Сопоставляются многолетние наблюдения сезонных вариаций первой пиковой частоты шумановского резонанса, наблюдаемого в вертикальной электрической компоненте поля, с изменениями среднего солнечного времени (аналеммой). Используются записи вертикальной электрической компоненты поля в венгерской обсерватории Надьченк (47,6° с.ш., 16,7° в.д.). Суточные вариации частоты усреднялись в течение каждого месяца, и по ним определялся диапазон (размах) изменений. Использовались как непосредственно сезонные изменения размаха частоты, так и сумма годовых и полугодовых составляющих этой величины, выделенная с помощью сингулярного спектрального анализа. Показано, что суточно-сезонные изменения воспроизводятся год от года. Проведено сравнение данных глобального электромагнитного резонанса с периодическими изменениями среднего солнечного времени. Последние связаны с эллиптичностью земной орбиты, из-за чего видимый центр солнечного диска в течение года описывает на небе петлеобразную кривую – аналемму. Впервые проводится корреляционный анализ десятилетних непрерывных записей и демонстрируется выдающееся подобие электромагнитных и астрономических данных. Обсуждается, как можно объяснить связь между двумя, на первый взгляд независимыми процессами. Ил. 5. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: глобальный электромагнитный резонанс, первая пиковая частота, аналемма.

В настоящей работе рассматриваются сезонные изменения пиковой частоты первого мода шумановского резонанса, наблюдаемой в вертикальной электрической составляющей электромагнитного поля, и подобии этих изменений вариациям среднего солнечного времени. Мониторинг пиковых частот глобального электромагнитного (шумановского) резонанса выявляет изменения суточного хода с периодами от полугодового до нескольких дней [1–3].

1. Наблюдательные данные и результаты обработки. На рис. 1 приведены усредненные за месяц суточные вариации пиковой частоты первого мода шумановского резонанса, полученные в обсерватории Надьченк (47,6° с.ш., 16,7° в.д.). Они охватывают период с января 1994 по декабрь 2003 г. Кривая 1 с максимальной детализацией приводит годовой (1994 г.) обзор суточных вариаций первой пиковой частоты f_1 шумановского резонанса, наблюдавшейся в вертикальной электрической компоненте поля. Ниже расположены аналогичные кривые 2–4, охватывающие 3, 5 и 10 лет наблюдений. Из этих графиков видно, что характер изменений воспроизводится год от года.

Суточные вариации на рис. 1 показаны следующим образом. Вдоль ординаты отложена первая пиковая частота в герцах. Абсцисса разделена на интервалы, каждый из которых отвечает отдельному месяцу, а в этом интервале показан средний за данный месяц суточный ход частоты. Такой способ представления позволяет свести воедино суточные изменения за много месяцев и одновременно увидеть сезонные зависимости формы и размаха.

Кривая 5 показывает сезонные изменения диапазона (размаха) суточных вариаций частоты $dF_1 = f_1^{MAX}(UT) - f_1^{MIN}(UT)$, где f_1^{MAX} и f_1^{MIN} обо-

значают максимальное и минимальное значения частоты за сутки по мировому (гринвичскому) времени UT . Таким образом, для каждого месяца из 24 точек суточных вариаций $f_1(UT)$ мы получаем одну точку dF_1 на графике 5.

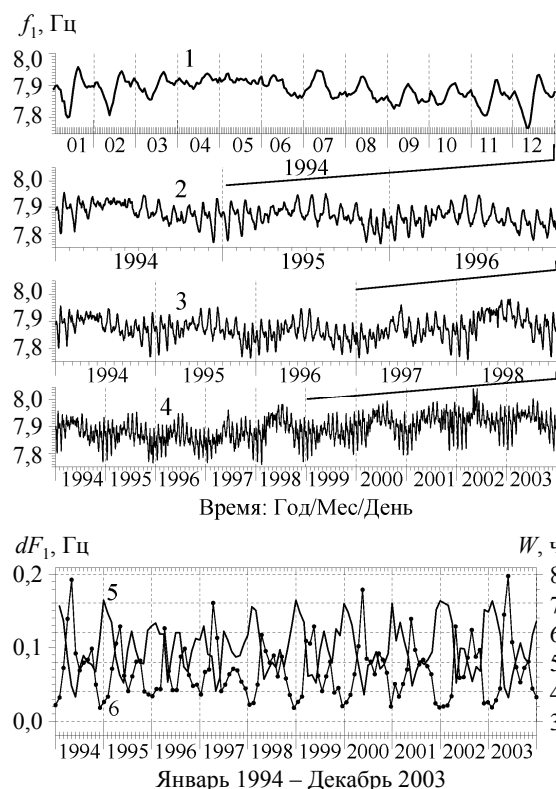


Рис. 1. Вариации пиковой частоты первого шумановского резонанса по записям поля E_z

Кривая с точками 6 на этом же графике построена относительно правой ординаты, она изображает сезонные изменения эффективной

ширины области, занятой грозами. Ширина источника была получена с помощью калибровочной кривой, рассчитанной для обсерватории Надьченк [3].

В размахе суточных вариаций частоты dF_1 хорошо видны периодические составляющие. Годовому периоду отвечают наиболее глубокие минимумы размаха, приходящиеся на апрель-май. Полугодовой период обусловлен дополнительным широким, но не столь глубоким минимумом в октябре-сентябре. Отметим, что годовые и полугодовые вариации регистрировались не только в частотах, но и в амплитудах шумановского резонанса [1–3], но здесь они не рассматриваются.

Для выделения главных составляющих сезонных изменений применялся алгоритм «Гусеница» [4–8]. Эта программа реализует процедуру сингулярного спектрального анализа (ССА), называемого также методом главных компонент. Формально «Гусеница» является вариантом алгоритма классификации множественных сигналов (*multiple signal classification – MUSIC*), см. например [9].

Идея сингулярного спектрального анализа состоит в следующем. Сначала исходные временные данные преобразуют в прямоугольную матрицу и находят ее собственные функции и собственные значения. Первые составляют ортогональный базис, по которому разлагается исходная временная последовательность, а вторые показывают долю энергии сигнала, приходящуюся на отдельные компоненты базиса [6]. Преимущество такого подхода по сравнению с обычным спектральным анализом состоит в том, что ортогональный базис (главные компоненты) не задается заранее, а находится автоматически при обработке конкретной временной последовательности.

Если исходные данные составляют продолжительную запись стационарного периодического сигнала (например, меандра), то обработка с использованием ССА выделит набор синусоид и косинусоид соответствующих частот и амплитуд, а ее результаты совпадут с обычным преобразованием Фурье. В приложениях к записям шумановского резонанса ССА обработка дает результаты, напоминающие те, что получают с помощью полосовых фильтров, настроенных на годовые и полугодовые периоды. Главное преимущество ССА состоит в том, что он не только успешно отделяет тренды от периодических изменений, но и находит заранее неизвестные ортогональные компоненты. Причем они не обязательно окажутся синусоидами, что не нарушает взаимной ортогональности.

На рис. 2 кривыми 1–3 показаны результаты обработки сезонных вариаций размаха первой пиковой частоты шумановского резонанса.

Электромагнитные данные сопоставляются с вариациями среднего солнечного времени, приведенными линией 4. Абсцисса показывает месяцы, начиная с января 1994 г. Ординаты четырех верхних графиков показывают размах суточных изменений первой пиковой частоты шумановского резонанса в герцах. Линия 1 воспроизводит исходную реализацию dF_1 , наблюдаемую в вертикальной электрической компоненте поля.

Алгоритм «Гусеница» выделил четыре главные компоненты: две из них несут 27,4 и 26,7 % от полной энергии сезонных изменений и отвечают годовым изменениям (кривая 2). Третья и четвертая главные компоненты несут 15 и 14,3 % полной энергии и относятся к полугодовой составляющей. Годовая составляющая показана линией 2, она имеет период около 12 месяцев и переменную амплитуду. Линия 3 изображает сумму полугодовых и годовых изменений, которая содержит 83,4 % энергии сезонных изменений. Видно, что сумма годовой и полугодовой компонент 3 напоминает картину «биения» двух гармоник переменной амплитуды с изменяющимся фазовым сдвигом.

График 4 на рис. 2 приводит данные, не имеющие на первый взгляд никакого отношения к глобальному резонансу. Это годовые изменения среднего солнечного времени. Они вызваны сезонными вариациями положения центра солнечного диска на небесной сфере, который описывает в течение года петлю в виде восьмерки – аналемму. Аналемма (положение центра солнечного диска на небе) обусловлена эксцентриситетом земной орбиты.

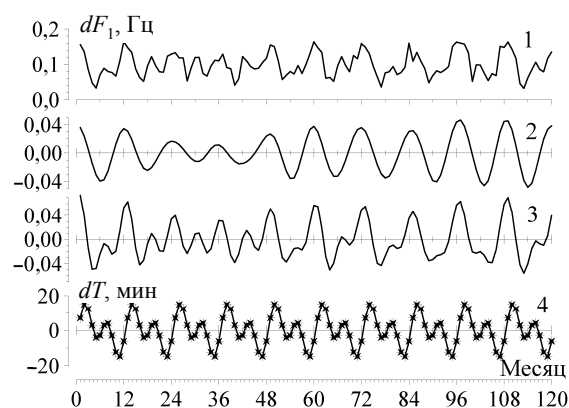


Рис. 2. Главные компоненты сезонных вариаций размаха суточных изменений первой пиковой частоты шумановского резонанса и их сходство с вариациями среднего солнечного времени

2. Астрономические данные. На рис. 3 схематически показано годовое перемещение центра солнечного диска по небосводу. Моделируются полуденные наблюдения в Харькове (50° с.ш. и 37° з.д.) Если переместить наблюдате-

ля по долготе, то картина сезонных изменений останется прежней: диск Солнца в течение года будет отклоняться от местного направления на юг примерно на $\pm 4^\circ$. Если же сместить обсерваторию по широте, то петля аналеммы сдвигается вверх или вниз по углу места так, что в дни весеннего и осеннего равноденствия центр Солнца занимает угол $\theta = 90^\circ - \nu$, где θ – угол места, равный ко-широте обсерватории, ν – широта наблюдателя, а $\varepsilon = 23,44^\circ$ обозначает угол наклона оси Земли к плоскости орбиты.

Легко видеть, что для экваториального наблюдателя центр солнечного диска в дни равноденствия проходит через зенит. В дни летнего и зимнего солнцестояния Солнце смещается соответственно к северу и югу на $\varepsilon = 23,44^\circ$.

Петля аналеммы на рис. 3 иллюстрирует важную сезонную особенность. Продолжительность «астрономической» зимы отвечает периоду от конца октября до середины февраля, что составляет примерно 3–4 месяца. Лето длится от середины мая до второй декады августа, примерно 2 месяца. На весну также приходится 2 месяца, а на осень – около 3. Если сравнить эти данные с наблюдениями шумановского резонанса [1, 10–17], то окажется, что продолжительность «астрономических» сезонов очень близка к «электромагнитным».

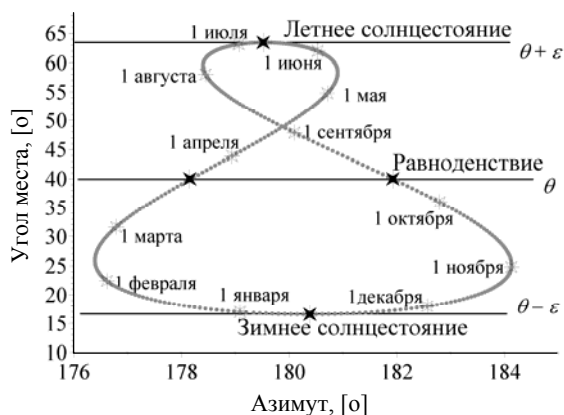


Рис. 3. Движение центра солнечного диска по небу в течение года, обусловленное эллиптичностью земной орбиты. Наблюдатель расположен в Харькове (50° с.ш. и 37° з.д.)

Среднее солнечное время можно вычислить с помощью уравнения времени

$$dT = -7,659 \sin M + 9,863 \sin(2M + 3,5932), \quad (1)$$

где dT – поправка времени полдня в минутах, а $M = 66,240040077 + 0,01720197 D$ – нормированный орбитальный угол Земли, описывающий положение Земли на орбите и зависящий от номера дня D , отсчитываемого от 1 января. Очевидно, что dT отражает видимый азимут центра солнечного диска.

Сезонные изменения угла места Солнца приблизительно равны

$$\delta = -23,44^\circ \cos\left(\frac{360}{365,24} D\right). \quad (2)$$

Эти изменения складываются со средним за год углом места центра солнечного диска, равным ко-широте обсерватории θ . Для Харькова $\theta = 40^\circ$.

Сезонные изменения времени полдня dT достигают 15 мин, они объясняются неравномерностью перемещения Земли по эллиптической орбите. Из-за этого центр Солнца пересекает небесный меридиан несколько раньше или несколько позже 12 ч [18].

3. Сравнение электромагнитных и астрономических данных. На первый взгляд трудно указать причину наблюдаемой связи между положением Солнца на небе и размахом суточных изменений первой пиковой частоты глобального электромагнитного резонанса. Однако сходство кривых 4 и 5 на рис. 4 несомненно, правда зависимости сдвинуты относительно друг друга. Маловероятно, чтобы подобная близость наблюдалась в течение 10 лет из-за игры слепого случая, и мы попытаемся дать объяснение такому сходству.

Количественной мерой подобия изменений служит коэффициент взаимной корреляции, построенный на верхних графиках рис. 4.

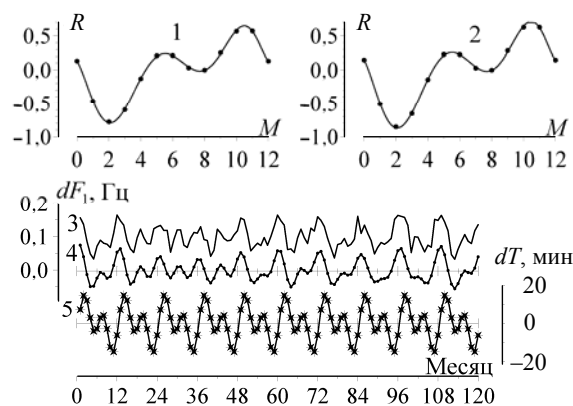


Рис. 4. Коэффициент взаимной корреляции сезонных вариаций пиковой частоты и среднего солнечного времени

График 1 на рис. 4 показывает, как изменяется коэффициент взаимной корреляции R между исходными изменениями размаха пиковой частоты и аналеммы при сдвиге кривой $dT(M)$ на целое число месяцев. Сдвигка отложена по оси абсцисс, а коэффициент взаимной корреляции показан по оси ординат. Точки дают значения коэффициента взаимной корреляции, а кривая иллюстрирует аппроксимацию зависимости полиномом восьмого порядка. Максимальное по

модулю значение $R = -0,777$ отвечает запаздыванию аналеммы на 2 месяца. Другими словами, размах суточных изменений пиковой частоты изменяется подобно среднему солнечному времени, взятому с противоположным знаком и с запаздыванием около 2 месяцев.

Эту связь можно увидеть, сравнивая графики 3 и 5 на нижней панели рис. 4. Здесь кривой 3 показаны долгосрочные изменения размаха первой пиковой частоты шумановского резонанса. Кривая 5 приводит изменения среднего солнечного времени. Аналогия станет еще более очевидной, если обратиться к кривым 5 и 4. Кривая 4 показывает сумму годовой и полугодовой компонент размаха частоты. Здесь отчетливо видна антикорреляция и запаздывание электромагнитных данных относительно астрономических.

Кривая 2 на рис. 4 показывает коэффициент взаимной корреляции R среднего солнечного времени и суммы годовой и полугодовой компонент размаха первой пиковой частоты. Сингулярный спектральный анализ устранил шумы и улучшил взаимное соответствие кривых, поэтому коэффициент взаимной корреляции достигает значения $R = -0,852$.

4. Обсуждение и выводы. Подобие данных различной физической природы на первый взгляд кажется неожиданным. Нет сомнений, что связь обусловлена излучением Солнца. Конкретный механизм можно пояснить следующим образом.

Тропический пояс Земли дает главный вклад в грозовую активность планеты, а значит, и в сигналы глобального электромагнитного резонанса. Особенность климата экваториальной области состоит в том, что здесь в течение года Солнце дважды проходит через зенит. Поэтому вместо четырех времен года, привычных для жителей средних широт, на экваторе наблюдается только два периода – сезон дождей и сезон засухи. Эти сезоны чередуются, и в течение года их бывает два.

Период дождей вызывает муссон, охватывающий и субтропические широты. Муссон достигает максимального развития примерно через 2 месяца после весеннего или осеннего равноденствия. Именно муссон приносит мощные дожди, а мировые грозы охватывают в это время максимальную площадь. Хорошо известно, что увеличение зоны, занятой грозами, уменьшает размах суточных вариаций первой пиковой частоты шумановского резонанса [3, 7, 8]. Так, например, суточные вариации исчезнут, если грозы равномерно распределены по поверхности планеты.

По наблюдаемому размаху суточных вариаций первой пиковой частоты можно рассчитать эффективную ширину области, занятой мировыми грозами [3]. Эти данные воспроизводятся на рис. 5 кривой 3.

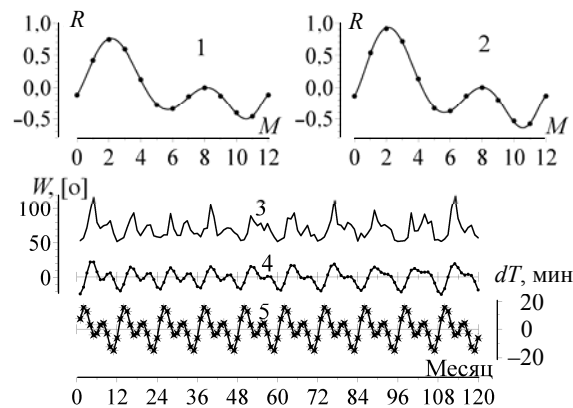


Рис. 5. Коэффициент взаимной корреляции сезонных вариаций ширины области, занятой мировыми грозами, и среднего солнечного времени

Подобно рис. 4, на верхних панелях рис. 5 кривыми 1 и 2 показаны изменения коэффициента взаимной корреляции ширины источника и аналеммы при различных сдвигках последней. Графики 3–5 соответственно показывают сезонные вариации ширины источника, сумму годовой и полугодовой компонент и среднее солнечное время.

Из графика 3 следует, что периодические составляющие столь же хорошо видны в сезонных изменениях эффективной ширины области, занятой мировыми грозами. В отличие от пиковой частоты, в апреле–мае (весенний муссон) наблюдается максимум эффективной ширины источника, имеются также не столь высокие максимумы в октябре–сентябре (осенний муссон).

Поскольку сезонные вариации размаха пиковой частоты обратно пропорциональны эффективной ширине источника, коэффициент взаимной корреляции между размером источника и аналеммой оказывается положительным. При той же сдвигке в 2 месяца он достигает максимума, равного $R = 0,745$ и $R = 0,915$, соответственно для ширины источника и для главных компонент ее сезонных изменений. Необходимо отметить, что это исключительно высокие значения.

Таким образом, хорошо выраженная отрицательная корреляция размаха суточных вариаций частоты и аналеммы возникает в результате периодических сезонных изменений размеров области, занятой мировыми грозами. Запаздывание электромагнитных данных относительно астрономических связано с тепловой инерцией атмосферы. Это явление той же природы, что и сезонные изменения температуры почвы и конвекции в тропосфере. Мы знаем, например, что в средних широтах дневная температура и количество гроз 22 мая и 22 июля заметно отличаются, хотя эти даты симметрично отстоят от дня летнего солнцестояния. Из-за тепловой инерции смена

времен года запаздывает относительно перемещения Солнца по небосводу.

Отметим еще одну особенность обсуждаемых солнечно-земных связей. Годовые изменения потока солнечной радиации обусловлены изменением расстояния от Земли до Солнца из-за эллиптичности орбиты, однако эти изменения (около 6 %) играют второстепенную роль в климате по сравнению с географической асимметрией распределения суши по поверхности Земли. Летом в Северном полушарии мировые грозы смещаются к северу, где суши больше, и «упираются» в пояс пустынь Африки и Азии, поэтому вместе с ростом грозовой активности, сосредоточенной над континентами, происходит ее пространственная концентрация. Аналогичная концентрация выражена слабее летом в Южном полушарии. Так совместно с изменениями интенсивности гроз и амплитуды резонансных колебаний возникают годовые изменения эффективного размера источника.

Полугодовые вариации связаны с сезонном дождем и развитием муссонов, которые приводят к «расползанию» гроз по планете и появлению второй гармоники в размахе пиковой частоты. Поскольку размах суточного хода частоты уменьшается с увеличением размера источника, наблюдаются отрицательные значения коэффициента взаимной корреляции.

Выводы. Анализ десятилетних записей шумановского резонанса показал, что сезонный ход размаха суточных изменений первой пиковой частоты, наблюдаемой в энергетических спектрах вертикального электрического поля, коррелирует с аналеммой.

Механизм этой связи обусловлен сезонными изменениями потока солнечной радиации, географическими особенностями распределения суши в Северном и Южном полушариях и тепловой инерцией земной атмосферы.

Автор благодарит проф. Г. Сатори за предоставленные данные долгосрочного мониторинга шумановского резонанса и разрешение воспользоваться ими.

Библиографический список

1. *Sátori G.* El Niño related meridional oscillation of global lightning activity / G. Sátori, B. Zieger // *Geophys. Res. Lett.* – 1999. – 26, N 10. – P. 1365–1368.
2. *Sátori G.* Variability of global lightning activity on the ENSO time scale / G. Sátori, E. Williams, I. Lemperger // *Atmos. Res.* – 2008. – 91, N 2–4. – P. 500–507.
3. *Parameters* of global thunderstorm activity deduced from long term Schumann resonance records / A. P. Nickolaenko, G. Sátori, B. Zieger et al. // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 1998. – 60, N 3. – P. 387–399.
4. *Данилов Д. Л.* Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Д. Л. Данилов, А. А. Жиглявский. – СПб: Изд-во СПбГУ, 1997. – 307 с.
5. *Golyandina N.* Analysis of time series structure / N. Golyandina, V. Nekrutkin, A. Zhiglyavsky. – L.: Chapman and Hall, CRC, Boca Raton, 2001. – 288 p.
6. *Danilov D. L.* Principal Components in Time Series Forecast / D. L. Danilov // *Proc. of the Statistical Computing Section, The American Statistical Association.* – 1996. – P. 156–160.
7. *Nickolaenko A. P.* Resonance in the Earth-ionosphere cavity / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa. – Dordrecht-Boston-L.: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 380 p.
8. *Nickolaenko A. P.* Schumann resonance for tyros / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa. – Tokyo-Heidelberg-N. Y.-Dordrecht-L.: Springer, 2014. – 348 p.
9. *Марпл С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл; пер. с англ. под ред. И. С. Рыжака. – М.: Мир, 1990. – 548 с.
10. *Sátori G.* On the dynamics of the North–South seasonal migration of global lightning / G. Sátori // *Proc. 12th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity. Global Lightning and Climate.* – Versailles, 2003. – P. 1–4.
11. *Sátori G.* On the dynamics of the North–South seasonal migration of global lightning / G. Sátori, E. R. Williams, D. J. Boccippio // *AGU Fall Meeting.* – San Francisco, 2003. – P. AE32A-0166.
12. *Sátori G.* Response of the Earth–ionosphere cavity resonator to the 11-year solar cycle in X-radiation / G. Sátori, E. R. Williams, V. Mushtak // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2005. – 67, iss. 6. – P. 553–561.
13. *Sátori G.* Schumann resonance signatures of global lightning activity // *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, H. D. Betz, U. Schumann and P. Laroche (Eds) / G. Sátori, V. Mushtak, E. R. Williams. – Dordrecht: Springer, 2012. – P. 347–386.
14. *Николаенко А. П.* Определение параметров мировых гроз по записям шумановского резонанса (еще раз о точечном источнике в исследованиях шумановского резонанса) / А. П. Николаенко // *Радиофизика и электрон.* – 2014. – 5(19), № 2. – С. 33–41.
15. *11-year solar cycle in Schumann resonance Antarctic data: preliminary interpretations* / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa, A. V. Koloskov, and O. V. Budanov // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2014.
16. *Shvets A. V.* Variations of the global lightning distribution revealed from three station Schumann resonance measurements / A. V. Shvets, Y. Hobara, M. Hayakawa // *J. Geophys. Res.* – 2010. – 115, iss. A12. – 12 p.
17. *Shvets A.* Global lightning activity on the basis of inversions of natural ELF electromagnetic data observed at multiple stations around the world / A. Shvets, M. Hayakawa // *Surv. Geophys.* – 2011. – 32. – P. 705–732.
18. *Википедия.* Equation of time [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Equation_of_time. – Загл. с экрана.

Рукопись поступила 13.08.2014.

A. P. Nickolaenko

MONITORING THE PEAK FREQUENCIES OF SCHUMANN RESONANCE AND ANALEMMA

The long-term observations of the seasonal variations of the first Schumann resonance frequency observed in the vertical electric field component are compared with the changes of median solar time (analemma). The records of the Hungarian observatory Nagycenk (47.6° N, 16.7° E) are used. Daily variation of the peak frequency were averaged for each month and thus the diurnal range was determined. We use both the seasonal variations of this range and the sum of its annual and semi-annual components found by means of singular spectrum analysis (SSA). It is demonstrated that the diurnal-seasonal changes are reproduced year after year. A comparison was made between the global electromagnetic resonance data and the periodic changes of the mean solar time. The latter are caused by the ellipticity of the Earth's orbit, which results in displacement of the visible center of the solar disk. It

outlines the looped curve in the sky during the year (analemma). For the first time correlation analysis of the continuous ten-years-long records is performed and an outstanding similarity of electromagnetic and astronomical data is demonstrated. An explanation is suggested for the link of the two seemingly dissimilar processes.

Key words: global electromagnetic resonance, the first peak frequency, analemma.

О. П. Николаенко

МОНІТОРИНГ ПІКОВИХ ЧАСТОТ ШУМАНІВСЬКОГО РЕЗОНАНСУ ТА АНАЛЕММА

Зіставлено багаторічні спостереження сезонних варіацій першої пікової частоти шуманівського резонансу, що реєструється у вертикальній електричній компоненті поля, зі змінами середнього сонячного часу (аналемма). Використо-

вуються записи угорської обсерваторії Надьченк (47,6° п.ш., 16,7° с.д.). Добові варіації частоти усереднювалися протягом кожного місяця і з них визначали діапазон (розмах) змін. Використовувалися як безпосередньо сезонні зміни розмаху частоти, так і сума річних і піврічних складових цієї величини, виділена за допомогою сингулярного спектрального аналізу. Показано, що добово-сезонні зміни відтворюється рік від року. Проведено порівняння даних глобального електромагнітного резонансу з періодичними змінами середнього сонячного часу. Останні пов'язані з еліптичністю земної орбіти, тому центр сонячного диску, що спостерігається протягом року описує на небі петлеподібну криву – аналемму. Вперше проводиться кореляційний аналіз десятирічних безперервних записів і демонструється видатна подібність електромагнітних то астрономічних даних. Обговорюється, як можна пояснити зв'язок між цими двома, на перший погляд незалежними процесами.

Ключові слова: глобальний електромагнітний резонанс, перша пікова частота, аналемма.