

27-ДНЕВНЫЕ ВАРИАЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ВО ВРЕМЯ 23-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

27-DAY VARIATIONS OF GLOBAL ELECTRON CONTENT DURING 23rd CYCLE OF SOLAR ACTIVITY

Э.Л. Афраймович¹, Э.И. Астафьева¹, И.В. Живетьев², Ю.В. Ясюкевич¹

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН,

²Институт космических исследований и распространения радиоволн, ДВО РАН

Global electron content (GEC) equals the total number of electrons in the near space, it is a new method of study the relation between solar activity and the ionosphere. In our paper we analyzed data for the period 1996-2006 and we found that the value of GEC changes follows variations of sunspot number and solar radiation UV and radio emission at 10.7-cm wavelength, showing 11-year and 27-day periodicities. 27-day variations of GEC are very similar to the ones of the index F10.7 and UV, but GEC undergoes a lagging of about of 2 days as compared to the values of the F10.7 index and UV. 27-day variations of GEC decrease from 8% to 3.5% as solar activity varies from its minimum to its maximum. These changes of relative amplitude of 27-day GEC variations agree well with the characteristics of active areas on the Sun.

1. Введение

Ионосфера Земли является важной частью околоземного космического пространства, состояние которого определяется потоками солнечного излучения на различных длинах волн [1, 6, 7]. Начиная с классической работы [11] неоднократно предпринимались попытки восстановления характеристик солнечного излучения по данным наблюдений за состоянием ионосферы [9]. Необходимость решения этой проблемы по-прежнему актуальна.

В настоящее время мониторинг ионосферы осуществляется различными средствами наземного и спутникового радиозондирования [3]; чаще всего при этом определяются локальные характеристики ионосферы, которым присущи существенные глобальные отличия. Это затрудняет использование ионосферных данных для получения количественных характеристик солнечного излучения.

В ИСЗФ СО РАН предложен новый подход к решению проблем восстановления характеристик солнечного излучения путем определения глобального электронного содержания (ГЭС), равного полному количеству электронов в околоземном космическом пространстве, ограниченном высотой орбиты ИСЗ радионавигационной системы GPS (около 20200км) [2, 10]. Преимуществом такого подхода является то, что локальные особенности характеристик ионосферы нивелируются, в итоге выявляются закономерности, характеризующие динамику глобального электронного содержания.

2. Метод определения глобального электронного содержания

Метод определения глобального электронного содержания основан на использовании разработанной в нескольких лабораториях (JPLG, США; CODG, Швейцария, и др.) технологии построения глобальных ионосферных карт. Глобальные карты полного электронного содержания (ПЭС), Global Ionospheric Maps – GIM, рассчитываются по данным международной сети приемников GPS [15, 18] в различных научных центрах. Пространственный диапазон карт GIM, представленных в сети Интернет [<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>] в стандартном формате IONEX, от 0° до 360° по долготе и от -90° до 90° по широте; размер элементарной ячейки GIM - 5° по долготе и 2.5° по широте. Для каждого момента времени с двухчасовым временным разрешением из файлов IONEX известны значения вертикального ПЭС $I_{i,j}$, где индексы i, j отмечают координаты (широту и долготу) ячейки GIM.

Глобальное электронное содержание $G(t)$ вычисляется путем суммирования по всем ячейкам GIM значений ПЭС для каждой ячейки, умноженных на площадь ячейки GIM S_{ij} [2, 10]

$$G = \sum S_{i,j} \cdot I_{i,j} \quad (1)$$

Для удобства анализа динамики ГЭС авторами [2] предложена единица измерений $GECU = 10^{32}$ электронов.

Точность оценки ГЭС на один-два порядка выше точности определения ПЭС в одной ячейке GIM (СКО определения ПЭС в GIM-ячейке составляет от 10% до 20% [15, 18]), поскольку усреднение независимых значений ПЭС осуществляется по всему земному шару с общим количеством ячеек GIM, равным 5184. Это позволяет обнаружить колебания и тренды ГЭС весьма незначительной амплитуды, что невозможно при анализе ПЭС в отдельно взятой ячейке GIM.

3. Цикл солнечной активности

В качестве характеристики солнечной активности используется суммарная по всему солнечному диску величина потока УФ излучения Солнца $U(t)$ в диапазоне 0.1–50 нм, измеренные на космической станции SEM/SOHO [14; http://www.usc.edu/dept/space_science/semdatafolder/].

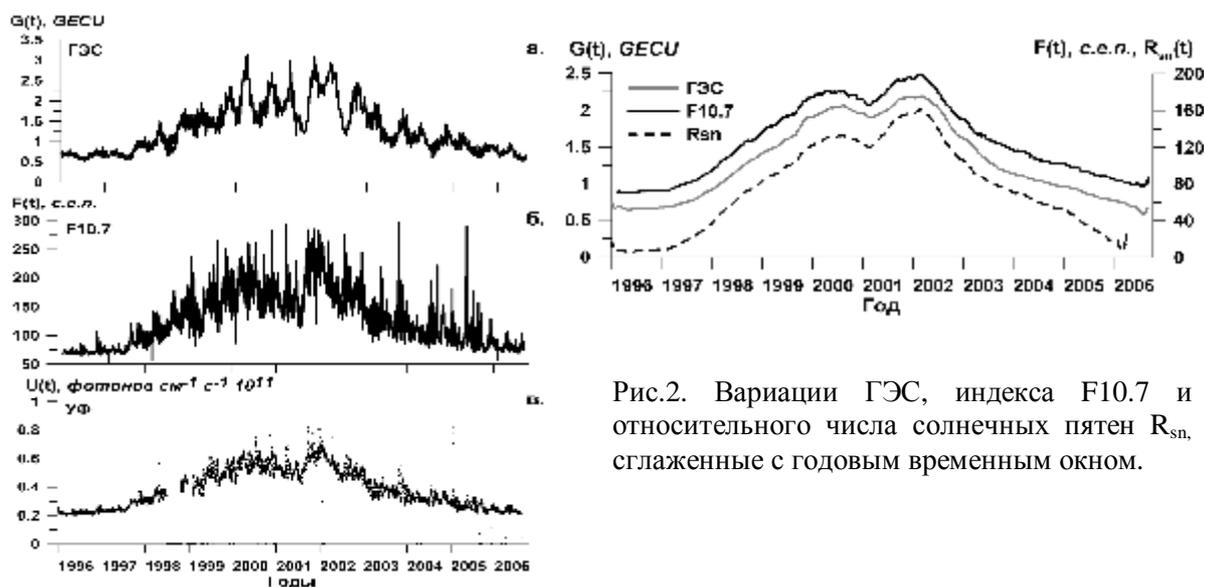


Рис.1. Вариации ГЭС, индекса солнечной активности F10.7 и потока УФ излучения в течение 23-го цикла солнечной активности.

Рис.2. Вариации ГЭС, индекса F10.7 и относительного числа солнечных пятен R_{sn} , сглаженные с годовым временным окном.

Величины ГЭС и УФ линейно зависимы с незначительным СКО $\sim 20\%$. Разброс регрессионной зависимости ГЭС и F10.7 существенно выше (СКО $\sim 50\%$). Сравнение вариаций ГЭС с вариациями индекса солнечной активности F10.7 (рис. 1. а, б), показало, что зависимость $G(t)$ находится в хорошем согласии с $F(t)$. Особенно хорошо это видно при сравнении зависимостей $G(t)$ и $F(t)$, сглаженных с годовым временным окном (рис. 2; черная и серая кривые, соответственно). Там же для сравнения представлена сглаженная с годовым окном временная зависимость относительного числа солнечных пятен $R_{sn}(t)$ (пунктирная кривая), которая демонстрирует хорошее согласие как с $G(t)$, так и с $F(t)$.

4. 27-дневные вариации

Одним из важных факторов влияния солнечного излучения на состояние ионосферы является 27-дневная цикличность, обусловленная вращением Солнца. Изучению этого фактора посвящено немало работ [1, 5, 6, 12, 13]. Однако 27-дневная модуляция ионосферных параметров, измеренных в одном пункте, маскируется множеством других факторов, что затрудняет получение достоверных количественных характеристик влияния 27-дневной вариации УФ излучения Солнца на ионосферу.

На рис. 3 представлена динамика абсолютной амплитуды вариаций, полученной с помощью фильтрации исходных рядов в диапазоне периодов 20-40 дней. На рисунке изображены вариации абсолютной амплитуды ГЭС $dG(t)$, серые кривые; индекса солнечной активности F10.7 $dF(t)$, черные кривые, и величины потока солнечного УФ излучения $dU(t)$, пунктирные кривые, за период с 1.06.2003 г. по 18.05.2004 г., включающего в себя промежуток времени, когда были зарегистрированы сильные гелиосферные возмущения октября-ноября 2003 г. [4].

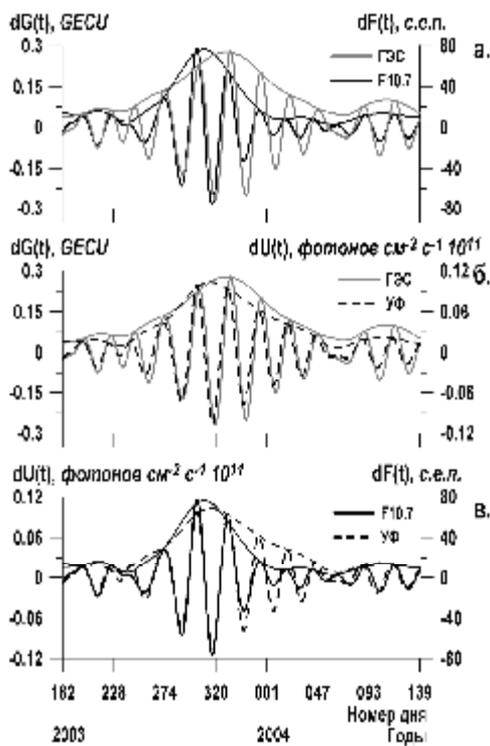


Рис.3. Отфильтрованные в диапазоне периодов 20-40 дней вариации ГЭС и индекса F10.7, ГЭС и УФ, F10.7 и УФ для периода с 1.06.2003 г. по 18.05.2004 г.

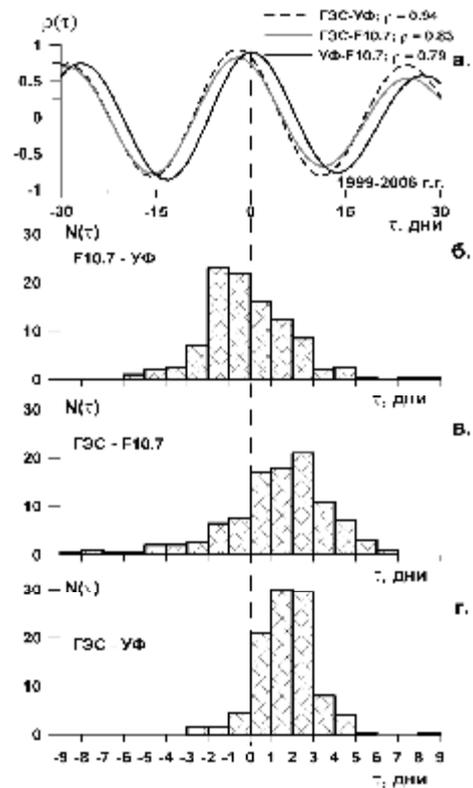


Рис.4. Корреляционная функция отфильтрованных в диапазоне периодов 20-40 дней вариаций ГЭС, УФ и F10.7. Гистограммы относительного запаздывания 27-дневных вариаций.

Корреляционный анализ данных для периода с 1999–2006 г.г. выявил высокую степень подобия 27-дневных вариаций рядов $G(t)$, $F(t)$ и $U(t)$, полученных путем фильтрации исходных рядов в диапазоне периодов 20-40 дней. Коэффициент корреляции между ГЭС и УФ достигает 0.94, коэффициенты корреляции между рядами ГЭС и F10.7, а также между F10.7 и УФ несколько ниже – 0.83 и 0.79 соответственно.

Рассмотрим более детально гистограммы относительного запаздывания 27-дневных вариаций $N(\tau)$ между рядами $dG(t)$, $dF(t)$ и $dU(t)$, полученные для $N=102$ оборотов Солнца (рис. 4, б-г). Наиболее вероятное и среднее значения запаздывания $\tau=2$ дня, определенные

по гистограммам рис. 4в и 4г, близки к значению запаздывания максимума корреляционных функций $\rho(\tau)$ рис. 4а. Однако разброс τ между рядами $dG(t)$ и $dF(t)$ существенно больше разброса между $dG(t)$ и $dU(t)$, что вполне согласуется с выводом о более тесной корреляции рядов ГЭС и УФ, чем ГЭС и F10.7 (см. выше).

Таким образом, 27-дневные вариации ГЭС запаздывают в среднем на 2 дня по сравнению с соответствующими вариациями F10.7 и УФ. Известно, что реакция ионосферы на изменения потока УФ излучения определяется постоянными времени ионизации и рекомбинации порядка часа [1, 6]. Запаздывание 27-дневных вариаций ГЭС относительно соответствующих изменений потока F10.7 и УФ может быть обусловлено существенно большими постоянными времени, характерными для термосферы, поскольку вариации ГЭС обусловлены не только изменениями солнечного ионизирующего излучения, но и процессами в термосфере. С увеличением потока солнечного излучения, который ионизирует ионосферу и нагревает термосферу, увеличивается температура и общая плотность атмосферы, изменяются скорость и направление нейтрального ветра [3]. Необходимо также учитывать, что временные масштабы изменений электронного содержания в плазмосфере Земли меняются в диапазоне от 2 до 5 дней [7]. Детальный анализ факторов, отвечающих за обнаруженную задержку 27-дневных вариаций, представляет собой довольно сложную задачу и выходит за рамки данной работы.

Весьма важной является оценка зависимости огибающей амплитуды 27-дневных вариаций $G27(t)$ на протяжении цикла солнечной активности. На рис. 5б представлены временные зависимости $G27(t)$ (серые кривые) и $F27(t)$ (черные кривые) в течение 23-го цикла солнечной активности (1996-2006г.г.), сглаженные с временным окном 365 дней. Для сравнения на рис. 5а показаны сглаженные зависимости F10.7 (черная кривая), и суточное значение относительного числа солнечных пятен R_{sn} (пунктирная кривая) для периода с 1996 по 2006г.г. Максимальное отклонение относительной амплитуды $G27(t)$ 27-дневных вариаций ГЭС, сглаженных с временным окном 365 дней, меняется от 8% на подъеме и спаде солнечной активности до 2% в периоды максимума и минимума. Вместе с тем амплитуда 27-дневных вариации в периоды подъема и спада солнечной активности индекса F10.7 достигает 12-14% (рис. 5б).

Такая закономерность обусловлена особенностями активных образований на поверхности Солнца, число которых возрастает с увеличением солнечной активности [8, 16]. При этом уменьшается амплитуда 27-дневной модуляции потока ультрафиолетового излучения. В течение периода роста и особенно спада солнечной активности на поверхности Солнца образуются «вмороженные» интенсивные активные образования, которые могут существовать в течение нескольких оборотов Солнца [5, 8, 16]. При высоком уровне солнечной активности на поверхности Солнца образуется и постоянно перемещается большое количество активных образований. Несмотря на то, что при этом средняя амплитуда модуляции функции $U(t)$ увеличивается, относительная амплитуда 27-дневных вариаций, наоборот, уменьшается. В период низкой солнечной активности, когда количество активных образований минимально (стремится к нулю), наблюдается минимальный уровень 27-дневной модуляции.

На рис. 6 изображены огибающие 27-дневных вариаций ГЭС, которые являются касательными к максимумам 27-дневных вариаций $dG(t)$, $dF(t)$ и $dU(t)$, показанных на рис. 3. Горизонтальной пунктирной линией показан уровень 0.5 от максимумов огибающих 27-дневных вариаций, стрелками изображены интервалы времени ΔT , в течение которых значение огибающей превышало уровень 0.5. Значения ΔT могут быть использованы для того, чтобы оценить время жизни «вмороженных» активных образований на Солнце, которые излучают в разных диапазонах длин волн. На рис. 6 видно, что интенсивность 27-дневных вариаций F10.7, УФ и ГЭС начала возрастать практически синхронно, с разницей в несколько дней. Уменьшение интенсивности

вариаций $dG(t)$ и $dU(t)$ происходило также синхронно, но с задержкой около 30 дней относительно вариаций $dF(t)$. Установленное запаздывание может быть связано с различием в происхождении и в пространственно-временных характеристиках излучения Солнца в УФ и радио диапазонах [17].

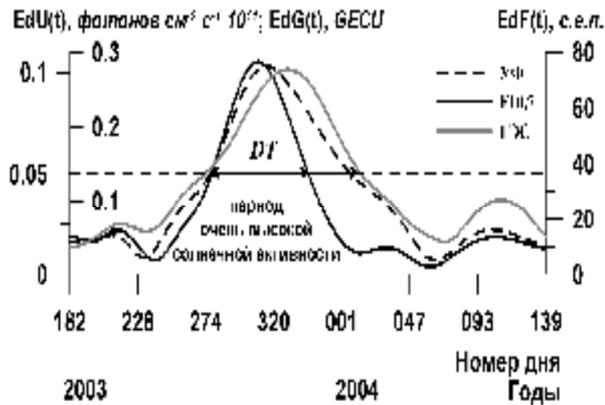


Рис. 6. Огибающая 27-дневных вариаций ГЭС, индекса F10.7 и УФ в период с 1.06.2003 г. по 18.05.2004 г.

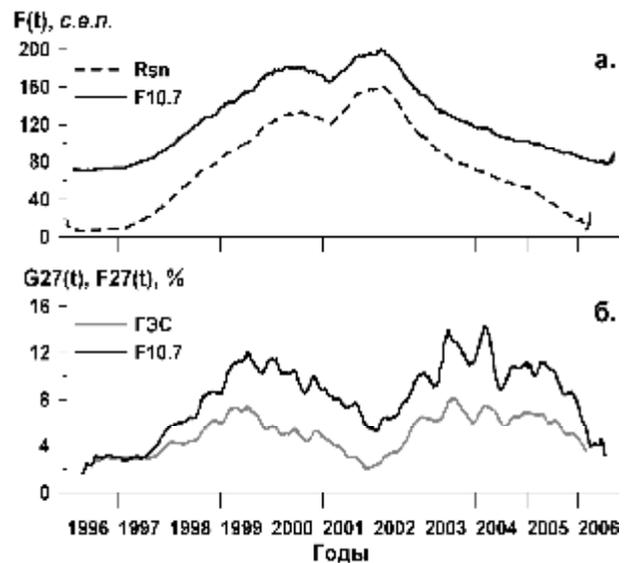


Рис. 5. Сглаженные с годовым временным окном зависимости индекса F10.7, числа солнечных пятен R_{sn} , зависимости огибающей 27-дневных вариаций ГЭС и F10.7.

5. Заключение

В настоящей работе показано, что:

1. В течение 23-го цикла солнечной активности уровень глобального электронного содержания менялся в пределах 0.5–3.2 GECU, в соответствии с динамикой УФ излучения Солнца и индекса F10.7.

2. 27-дневные вариации глобального электронного содержания запаздывают в среднем на 2 дня относительно вариаций F10.7 и УФ. Вместе с тем, 27-вариации ГЭС и УФ очень схожи между собой (коэффициент корреляции больше 0.9). Установлено, что относительная амплитуда 27-дневных вариаций уменьшается с 8%, в периоды роста и спада солнечной активности, до 2% в периоды максимума и минимума солнечной активности, что в целом соответствует динамике активных образований на Солнце в течение 11-летнего цикла активности.

Наши результаты представляют интерес для развития ионосферных моделей, а также для решения задач восстановления характеристик солнечного излучения по данным наблюдений за ионосферой. Кроме того, полученные данные могут быть полезны для изучения процессов в верхней атмосфере, которые связаны с УФ излучением Солнца.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ N 06-05-39026, 07-05-00127, интеграционного гранта СО РАН-ДВО РАН-НАН Украины N 3.24, а также при частичной поддержке проекта INTAS N 06-100013-8823.

Список литературы

1. Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. – М.: Мир, 1975. Т.1. – 512 с.
2. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. Солнечная активность и глобальное электронное содержание // ДАН. 2006. 409, № 3, С. 399-402.
3. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука. 1988. – 499 с.

4. Веселовский И. С. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г.: причины и следствия // *Космические исследования*. Т. 42. №5. С. 453-508. 2004.
5. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
6. Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. Солнце и ионосфера. – Москва: Наука. 1969. – 456 с.
7. Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмаосфера. – М. Наука, 1984. – 189 с.
8. Мордвинов А.В., Плюснина Л.А. Когерентные структуры в динамике крупномасштабного магнитного поля Солнца // *Астрономический журнал*. 2001.Т. 78, N8, С. 753-760.
9. Нусинов А.А. Ионосфера как природный детектор для исследования долговременных изменений потоков солнечного геоэффективного излучения // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2004.Т. 44, N6, С. 779-786.
10. Afraimovich E.L., Astafyeva, E.I., Oinats, A.V., Yasukevich, Yu.V., Zhivetiev, I.V.: Global electron content as a new index of solar activity. Comparison with IRI modeling results // *IRI news*. 2006. 13, N1, October 2006, A5.
11. Beynon, W.J.G., Brown, G.M. Region E and solar activity // *J. Atm. Phys.* 1959. V.15, P.168-174.
12. Jakowski, N., Fichtelmann, B., Jungstand, A. Solar activity control of Ionospheric and thermospheric processes // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1991. V.53, P.1125-1130.
13. Jakowski, N., Heise, S., Wehrenpfennig, A., Schluter, S., Reimer R. GPS/GLONASS-based TEC measurements as a contributor for space weather // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2002. V.64(5-6), P.729-735.
14. Judge, D. L., D. R. McMullin, H. S. Ogawa, D. Hovestadt, et al./ First Solar EUV Irradiances Obtained from SOHO by the Cielas/Sem // *Solar Physics*. 1998. V.177, P.161-173.
15. Mannucci, A.J., Wilson, B.D., Yuan, D.N., Ho, C.M., Lindqwister, U.J., Runge, T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // *Radio Sci.* 1998. V.33(3), P.565-582.
16. Mordvinov, A.V., Willson, R.C. Effect of large-scale magnetic fields on total solar irradiance. *Solar Physics*. 2003. V.215. P.5-16.
17. Nusinov, A.A. and V.V. Katyushina. Lyman-alpha line intensity as a solar activity index in the far ultraviolet range // *Solar Physics*. 1994. V.152. P.201-206.
18. Schaer, S., Beutler, G., Rothacher, M. Mapping and predicting the ionosphere // *Proceedings of the IGS AC Workshop*. Darmstadt, Germany. February 9-11. 1998. P.307-320.