

УДК 550.388.2

ГЛОБАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ДИНАМИКА В ТЕЧЕНИЕ 23-го ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

¹Э.Л. Афраимович, ¹Э.И. Астафьева, ¹Ю.В. Ясюкевич, ²И.В. Живетьев

GLOBAL ELECTRON CONTENT. ESTIMATION METHOD AND DYNAMICS DURING THE 23rd CYCLE OF SOLAR ACTIVITY

¹E.L. Afraimovich, ¹E.I. Astafyeva, ¹Yu.V. Yasukevich, ²I.V. Zhivetiev

В работе представлены первые результаты исследования динамики глобального электронного содержания (ГЭС), равного общему количеству электронов в околоземном космическом пространстве (ОКП), ограниченном высотой орбиты ИСЗ навигационных систем GPS (20 тыс. км). Предложен метод определения ГЭС на основе технологии GIM (Global Ionospheric Maps). Приводятся результаты анализа динамики ГЭС за период 1998–2005 гг.

We present the first results for investigation the dynamics of global electron content (GEC) that is equal to the total number of electrons in the near-Earth space environment bounded by the GPS orbital altitude (about 20 000 km) for the period 1998–2005. We propose a method of GEC estimation based on the Global Ionospheric Maps technique (GIM).

Введение

Ионосфера Земли является важной частью околоземного космического пространства (ОКП), состояние которого определяется потоками излучения Солнца в различных диапазонах длин волн [1–3]. Начиная с классической работы [4], неоднократно предпринимались попытки восстановления характеристик солнечного излучения по данным наблюдений за состоянием ионосферы [5]. Необходимость решения этой проблемы по-прежнему актуальна, несмотря на разработку современных внеатмосферных (спутниковых) средств мониторинга солнечного излучения.

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 разработаны метод и программный комплекс для определения глобального электронного содержания (ГЭС), равного общему количеству электронов в ОКП, ограниченном высотой орбиты ИСЗ навигационных систем GPS-ГЛОНАСС (20 тыс. км) [6]. Преимуществом такого подхода является то, что локальные особенности характеристик ионосферы нивелируются, в итоге выявляются закономерности, характеризующие динамику глобального содержания. Этот обобщенный ионосферный параметр может быть использован не только для решения прямых задач по оценке динамики ионосферы при изменении солнечной активности, но и для решения обратных задач, например, получения количественных характеристик потока ультрафиолетового излучения Солнца и пр.

Метод определения ГЭС

Наш метод основан на использовании разработанной в нескольких лабораториях (JPL, США; CODE, Швейцария, и др.) технологии построения глобальных ионосферных карт (GIM) полного электронного содержания (ПЭС) по данным международной сети приемников GPS [7]. В совокупности с

возможностью получения данных по сети Интернет технология GIM дала исследователям новое мощное средство для изучения крупномасштабных ионосферных процессов в спокойных и возмущенных условиях.

Пространственный диапазон карт GIM в стандартном формате IONEX – от 0° до 360° по долготе Λ и от –90° до 90° по широте Φ ; размер элементарной ячейки GIM – 5° по долготе и 2.5° по широте; общее количество ячеек GIM равно 5184. Для каждого момента времени с двухчасовым временным разрешением из файлов IONEX известны значения вертикального ПЭС I_{ij} , где индексы i, j отмечают координаты (широту и долготу) ячейки GIM. Глобальное электронное содержание G вычисляется путем суммирования по всем ячейкам GIM значений ПЭС для каждой ячейки, умноженных на площадь ячейки GIM:

$$G = \sum S I_{ij} = \sum I_{ij} * S_{ij}. \quad (1)$$

Для удобства анализа изменений ГЭС авторы предложили единицу измерений $GECU = 10^{32}$ электронов.

Динамика ГЭС в течение 23-го цикла солнечной активности

Представленная на рис. 1, а зависимость ГЭС $G(t)$ за период 1998–2005 гг. иллюстрирует существенную изменчивость ГЭС на протяжении 23-го цикла солнечной активности – от 0.5 до 3.5 GECU. Сравнение с вариациями индекса солнечной активности $F_{10.7}$ $F(t)$ (рис. 1, б), равного потоку солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см в единицах с.е.п. (10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹), показало, что зависимость $G(t)$ адекватно отражает влияние изменения солнечной активности на ионосферу. Особенно четко это видно при сравнении зависимостей $G(t)$ (жирная кривая) и $F(t)$ (тонкая кривая), сглаженных с годовым временным окном (рис. 1, в). Среднеквадратичное отклонение сглаженных кривых не превышает 0.05 GECU. Регрессионная зависимость глобального электронного содержания от индекса $F_{10.7}$ за период 1998–2005 гг. (рис. 2) может быть представлена в линейной форме $G(t) = 0.01 [F(t) - 75] + 0.5$. Эта зависимость вполне согласуется с аналогичными соотношениями для критических частот слоя

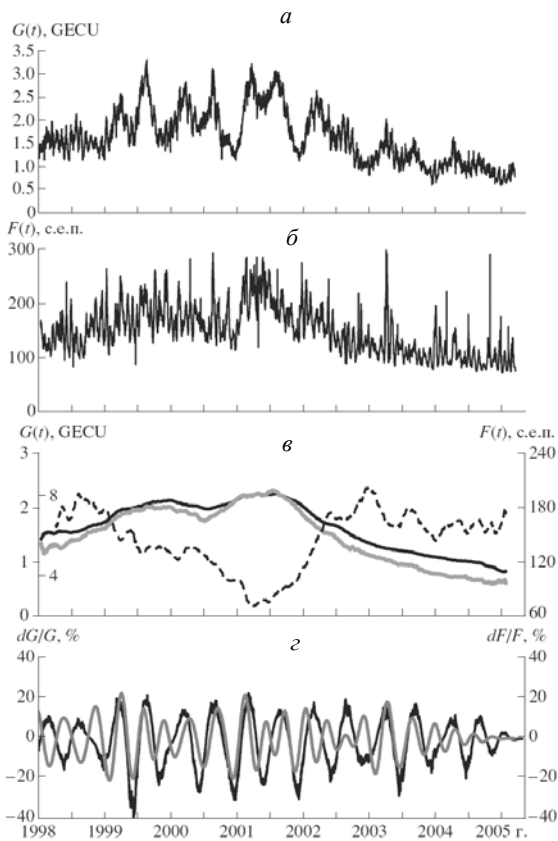


Рис. 1. Изменения глобального электронного содержания $G(t)$ и индекса $F_{10.7}$ $F(t)$ за период 1998–2005 гг.

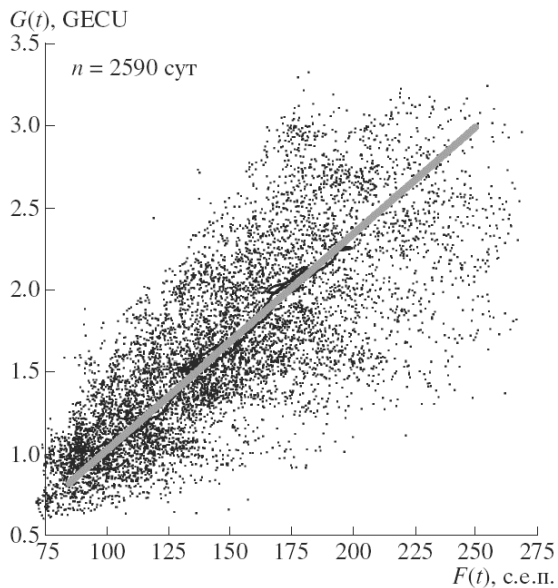


Рис. 2. Регрессионная зависимость глобального электронного содержания $G(t)$ от индекса $F_{10.7}$ $F(t)$ за период с 1998–2005 гг.

F2 ионосферы, принятыми в современных эмпирических моделях ионосферы [3].

Для ГЭС характерны сильные сезонные (полугодовые) вариации с максимальным отклонением относительной амплитуды от 10 % на подъеме и спаде до 30 % в период максимума солнечной активности. При этом полугодовые вариации ГЭС и $F_{10.7}$, как и следовало ожидать, некоррелированы. Это иллюст-

рируют отфильтрованные в диапазоне периодов от 100 до 300 дней и представленные на рис. 1, г вариации относительной амплитуды $dG(t)/G(t)$ – жирная кривая, и $dF(t)/F(t)$ – тонкая кривая. Максимальные значения ГЭС наблюдаются в равноденствие; это вполне согласуется с тем фактом, что плотность нейтральной атмосферы на ионосферных высотах максимальна в апреле и октябре [3].

Одним из важных факторов влияния солнечного излучения на состояние ионосферы является 27-дневная цикличность, обусловленная вращением Солнца. Изучению этого фактора посвящено много работ [1, 2, 8, 9]. Глобальное электронное содержание отражает и эту особенность ультрафиолетового излучения Солнца. За недостатком места мы иллюстрируем эту зависимость только для 1999 г. В верхней части рис. 3, а представлены вариации $G(t)$, рассчитанные для каждого дня и интервалов времени 17:00, 19:00 и 21:00 UT. Для сравнения с аналогичными вариациями $F_{10.7}$ ряды $G(t)$ и $F(t)$ были отфильтрованы в диапазоне периодов от 16 до 50 дней и нормированы на фоновые значения $G(t)$, $F(t)$. На рис. 3, б черной кривой показаны изменения относительной амплитуды 27-дневных вариаций dG/G , а серой кривой – соответствующие изменения dF/F .

Корреляционный анализ для всего цикла данных 1998–2005 гг. выявил высокую степень подобия 27-дневных вариаций $G(t)$ и $F(t)$ (максимальный коэффициент корреляции выше 0.8). Оказалось также, что 27-дневные вариации ГЭС, рассчитанного для всего земного шара, запаздывают на время от 1.5 до 2.5 сут. относительно соответствующих изменений потока $F_{10.7}$ (см. рис. 3, б).

Известно, что реакция ионосферы на изменения потока ультрафиолетового излучения определяется постоянными времени ионизации и рекомбинации порядка часа [2, 3]. В то же время обнаруженное нами запаздывание 27-дневных вариаций ГЭС относительно соответствующих изменений потока $F_{10.7}$ может быть обусловлено существенно большими постоянными времени, характерными для термосферы, поскольку вариации ГЭС обусловлены не только изменениями солнечного ионизирующего

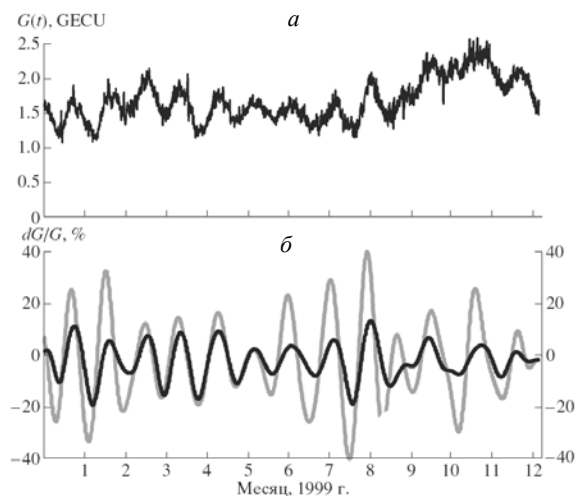


Рис. 3. Относительная амплитуда 27-дневных вариаций глобального электронного содержания $G(t)$ и индекса $F_{10.7}$ $F(t)$ за 1999 г.

излучения, но и процессами в термосфере. С увеличением потока солнечного излучения, ионизирующей ионосферу и греющей термосферу, увеличивается температура и общая плотность атмосферы, изменяются скорость и направление нейтрального ветра [3].

Максимальное отклонение относительной амплитуды 27-дневных вариаций ГЭС уменьшается от 15 % на подъеме и спаде до 7 % в период максимума солнечной активности. Эта закономерность показана на рис. 1, в пунктирной кривой в форме сглаженной с годовым окном огибающей $E27(t)$, %, 27-дневных вариаций $G(t)$ с характерным минимумом в период максимума 23-го цикла. Эта закономерность обусловлена особенностями активных образований на поверхности Солнца, число которых возрастает с увеличением солнечной активности [8, 9]. При этом уменьшается амплитуда 27-дневной модуляции потока ультрафиолетового излучения.

Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 03-05-64627).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир, 1975. Т. 1. 512 с.
2. Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. Солнце и ионосфера. М.: Наука, 1969. 456 с.

3. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
4. Beynon W.J.G., Brown G.M. // J. Atm. Phys. V. 15. P. 168–174.
5. Нусинов А.А. // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 6. С. 779–786.
6. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. // ДАН. 2006. Т. 409, № 3, С. 399–402.
7. Mannucci A.J., Wilson B. D., Yuan D. N., et al. // Radio Sci. 1998. V. 33. P. 565–582.
8. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986. 296 с.
9. Мордвинов А.В., Плюснина Л.А. // Астрономический журнал. 2001. Т. 78, № 8. С. 753–760.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
e-mail: zhiv@ikir.kamchatka.ru