

ГЛОБАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ В 23 И 24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

¹А.С. Ясюкевич, ^{1,2}Ю.В. Ясюкевич, ³И.В. Живетьев

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия
annpol@iszf.irk.ru

GLOBAL ELECTRON CONTENT IN SOLAR CYCLES 23 AND 24

¹A.S. Yasyukevich, ^{1,2}Yu.V. Yasyukevich, ³I.V. Zhivetiev

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia

Аннотация. На основе данных глобальных карт полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы выполнен анализ поведения глобального электронного содержания (ГЭС) в течение 23-го и 24-го циклов солнечной активности. Изучены динамика ГЭС, а также его годовые, полугодовые и 27-дневные вариации. Выполнено сравнение параметров вариаций ГЭС и регионального электронного содержания (РЭС). Рассмотрены вариации ГЭС для байкальского, европейского и японского регионов. Показано, что общая динамика РЭС, ГЭС и их вариаций повторяют изменения солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$. При этом максимальная амплитуда указанных вариаций наблюдается в Японии. Выявлено, что в исследуемых регионах зависимость амплитуды суточных вариаций РЭС от $F_{10.7}$ близка к линейной, в отличие от аналогичной зависимости глобального электронного содержания.

Ключевые слова: ионосфера, глобальное электронное содержание, солнечная активность.

Abstract. Using the Global Ionospheric Maps data of total electron content (TEC) we analyze behavior of the ionospheric global electron content (GEC) during the 23^d and 24th solar activity cycles. We examine GEC dynamics as well as its annual, semiannual and 27-day variations and compare features of the variations in GEC and regional electron content (REC). REC analyzes is performed for the Baikal, European and Japan regions. General dynamics in REC, GEC and their variations is shown to repeat the $F_{10.7}$ solar radio emission changes. Herewith the maximal amplitude of considered variations is observed in Japan. Dependence of diurnal REC variations amplitude on the $F_{10.7}$ index is revealed to be close to linear for all the regions under study, unlike the analogous GEC dependence.

Keywords: ionosphere, global electron content, solar activity.

Введение

Глобальное электронное содержание (ГЭС) — термин, введенный впервые в работе [Афраймович и др., 2006], представляет собой величину равную полному количеству электронов вокруг земного шара. Авторами работ [Афраймович и др., 2008; Afraimovich et al., 2008; Chen et al., 2015; Jacobi et al., 2016] было показано, что ГЭС может быть эффективным и удобным параметром для изучения и оценки общего состояния ионосферы, ее регулярных вариаций, а также реакции на гелио-геофизические события в глобальном масштабе.

Расчет ГЭС проводится на основе глобальных ионосферных карт (GIM). Карты GIM содержат данные вертикального полного электронного содержания (ПЭС) по всему земному шару в узлах ячеек размером 5° по долготе и 2.5° по широте [Schaer et al., 1998]. В настоящей работе были использованы карты лаборатории CODE (Center for Orbit Determination in Europe, [http://www.cx.unibe.ch]). Вычисление ГЭС осуществляется путем суммирования по всему набору ячеек значений ПЭС I_i в каждой ячейке GIM, умноженных на площадь этой ячейки S_i :

$$G = \sum_i S_i I_i \quad (1)$$

Аналогичным образом можно проводить расчет регионального электронного содержания (РЭС),

с той разницей, что суммирование будет проводиться не для всей карты GIM, а для какого-либо выбранного региона. Для удобства анализа и сравнения под ГЭС и РЭС можно также понимать их средневзвешенные значения в мире или регионе, вычисляемые путем суммирования ПЭС с учетом весового множителя:

$$\langle I \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N S_i I_i}{S} \quad (2)$$

где S — полная площадь поверхности.

Целью настоящей работы являлся анализ поведения глобального и регионального электронного содержания в течение 23-го и 24-го циклов солнечной активности, а также исследование их регулярных (годовые, полугодовые, 27-дневные и суточные) вариаций. Рассмотрена динамика РЭС над регионами Байкальской рифтовой зоны (БРЗ, $50-55^\circ$ N, $105-110^\circ$ E), Японии ($35-40^\circ$ N, $135-140^\circ$ E) и западной Европы ($50-55^\circ$ N, $15-20^\circ$ E).

Динамика ГЭС и РЭС в 23 и 24 циклах солнечной активности

На рис. 1 представлены динамика: потока радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ в 23–24 циклах солнечной активности (а), среднего и средневзвешенного ГЭС (б), а также РЭС в регионе байкальской риф-

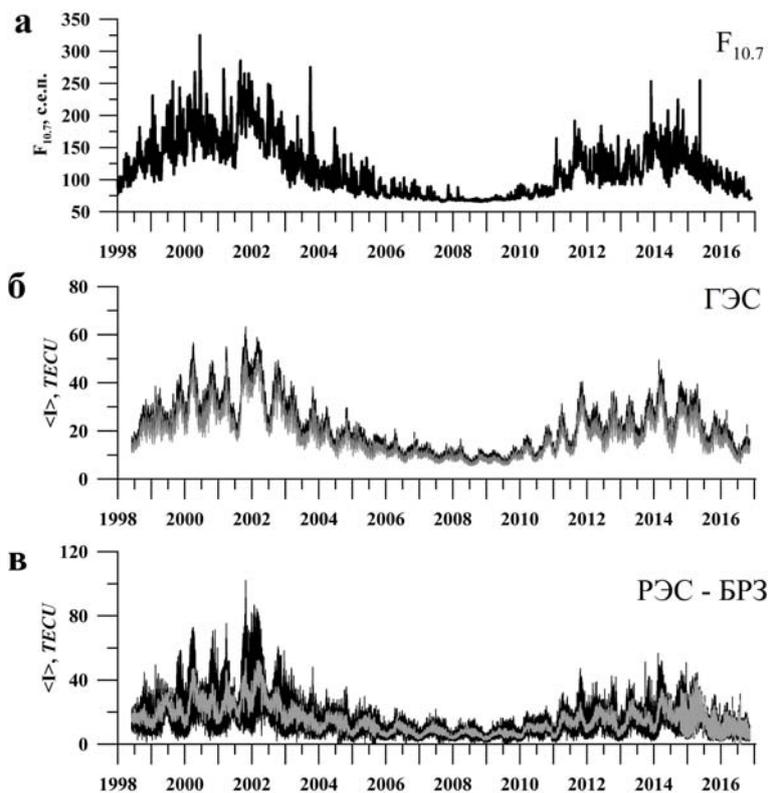


Рис. 1. Динамика: а) потока радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ в 23-24 циклах солнечной активности; б) среднего (серая кривая) и средневзвешенного (черная кривая) ГЭС; в) РЭС в БРЗ (черная кривая), и РЭС сглаженного с 11 дневным окном (серая кривая)

товой зоны (в). Видно, что изменение ионосферных параметров строго повторяет динамику солнечного радиоизлучения. Коэффициент корреляции ГЭС и индекса $F_{10.7}$ составляет 0.85; для РЭС в БРЗ — 0.81, в Японии — 0.8, в Европе — 0.78. Отличие величин ГЭС, регистрируемых в максимуме 23 цикла и в период минимума 2008–2010 гг. достигает до 6 раз. Наибольшие значения ГЭС в максимуме 24-го цикла на 15–20 TECU ниже, чем в максимуме 23-го, для РЭС эта разница еще более существенная — до ~30 TECU.

На рис. 2 представлены распределения амплитуд годовых (а) и полугодовых (б) вариаций ГЭС и РЭС в БРЗ и Японии. Хорошо видно, что амплитуда рассматриваемых вариаций промодулирована циклом солнечной активности. Величина амплитуды годовых вариаций в максимумах солнечной активности в 2–3 раза превышает значения в минимуме, для полугодовых вариаций разница более существенная — до 10 раз. Например, в 2000 г. амплитуда полугодовых вариаций РЭС в БРЗ составляет ~10 TECU, в 2002 — ~8.5 TECU, а в период глубокого солнечного минимума с 2007 по 2010 г. не превышает 1–1.5 TECU.

Максимум годовых вариаций РЭС наблюдается, в основном, в летние месяцы. В то же время годовые вариации ГЭС сдвинуты по фазе — их максимумы регистрируются зимой. Это означает, что южное полушарие вносит более существенный вклад в годовые вариации.

Максимумы полугодовых вариаций приходятся на равноденствия, минимумы — на солнцестояния. В отличие от годовых, интенсивность полугодовых вариаций РЭС и ГЭС изменяется синфазно.

В максимумах солнечной активности амплитуда полугодовых вариаций как для ГЭС, так и для РЭС превышает амплитуду годовых, в минимуме, напротив, годовые вариации выражены значительно сильнее полугодовых. При этом максимальная амплитуда указанных вариаций наблюдается для региона Японии.

На рис. 3 представлены динамические Фурье-спектры вариаций ГЭС (а) и потока солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$ (б) с периодами до 3.5 лет. Видно, что в целом, спектр ионосферных вариаций повторяет динамику $F_{10.7}$ с глубоким минимумом в 2008–2009 гг. Наиболее интенсивными гармониками в спектре ГЭС являются годовая и полугодовая, отчетливо также выделяется гармоника с периодом три года. Интересно отметить также наличие суточной составляющей в вариациях ГЭС, которое, вероятно, связано с глобальной долготной асимметрией ионосферы.

Далее нами проведен анализ зависимости амплитуды суточных вариаций ГЭС и РЭС от величины индекса $F_{10.7}$ с помощью аппроксимации данных полиномом второй степени ($I=A+B \cdot F_{10.7}+C \cdot F_{10.7}^2$). В таблице представлены коэффициенты полученных полиномов. Видно, что для РЭС в выбранных (среднеширотных) регионах зависимость от $F_{10.7}$ близка к линейной, а коэффициент при линейном члене имеет схожую величину и составляет ~2.4–2.6. При этом среднеквадратичное отклонение от полинома увеличивается с ростом солнечной активности. Для ГЭС величина коэффициента при квадратичном члене существенно выше, чем для РЭС, что говорит о наличии эффекта насыщения, обусловленного

Параметры полиномиальной аппроксимации

Регион	A	B	C
РЭС БРЗ	-8.97	0.233	-0.0001
РЭС Япония	-9.456	0.256	-0.00014
РЭС Европа	-11.603	0.264	-0.00023
ГЭС	-19.74	0.518	-0.0009

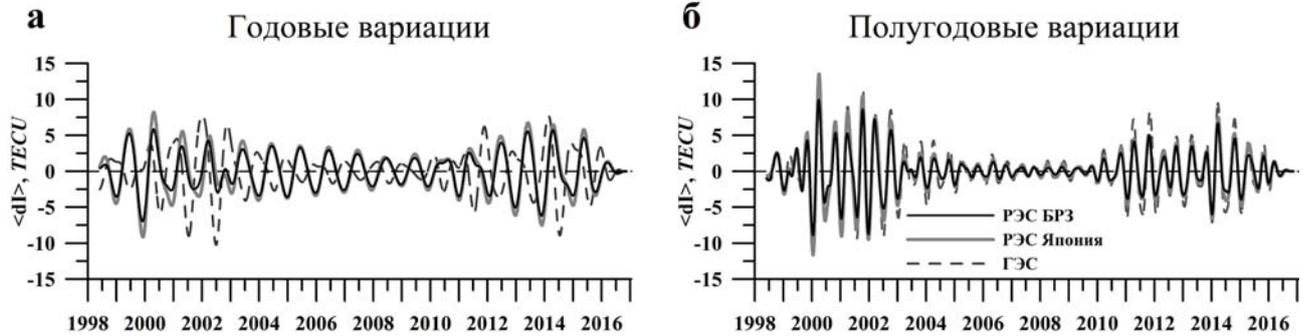


Рис. 2. Амплитуда годовых (а) и полугодовых (б) вариаций ГЭС и РЭС в БРЗ и Японии

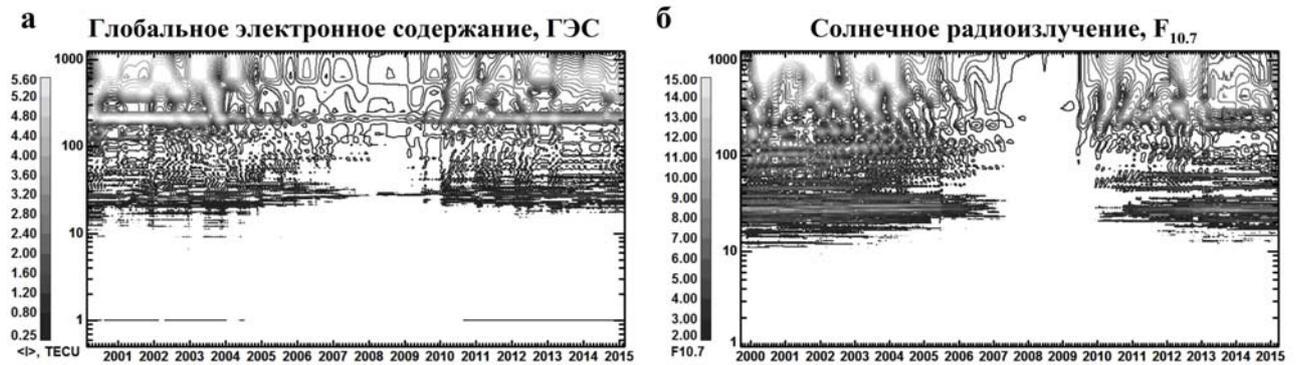


Рис. 3. Динамические спектры ГЭС (а) и потока радиоизлучения Солнца ($F_{10.7}$)

вкладом в ГЭС приэкваториальных областей. Существенный эффект насыщения ПЭС в экваториальных областях с ростом солнечной активности был выявлен, например, в работе [Liu, Chen, 2009].

Заключение

Выполнен анализ динамики глобального электронного содержания в течение 23-го и 24-го циклов солнечной активности, а также его регулярных вариаций. Показано, что общая динамика ионосферных вариаций повторяет изменения солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$. Определены параметры зависимости амплитуды суточных вариаций ГЭС и РЭС от солнечной активности.

Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-6894.2016.5) и проекта РФФИ № 16-35-60018.

Список литературы

Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. Солнечная активность и глобальное электронное содержание // ДАН. 2006. Т. 409, № 3. С. 399–402.

Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. и др. Глобальное электронное содержание в 23-м цикле солнечной активности // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2008. Т. 48, № 2. С. 195–208.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., et al. Global electron content: a new conception to track solar activity // Annales Geophysicae. 2008. V. 26. P. 335–344.

Chen Y., Liu L., Le H., Zhang H. Discrepant responses of the global electron content to the solar cycle and solar rotation variations of EUV irradiance // Earth, Planets and Space. 2015. 67:80. DOI: 10.1186/s40623-015-0251-x.

Jacobi C., Jakowski N., Schmidtke G., Woods T.N. Delayed response of the global total electron content to solar EUV variations // Adv. Radio Sci. 2016. V. 14. P. 175–180. DOI: 10.5194/ars-14-175-2016

Liu L., Chen Y. Statistical analysis of solar activity variations of total electron content derived at Jet Propulsion Laboratory from GPS observations // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A10311. DOI: 10.1029/2009JA014533.

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.