

Флуктуации полного электронного содержания ионосферы Земли в период максимума и минимума солнечного цикла по данным систем GPS/ГЛОНАСС

Е.В. Смирнова, В.М. Смирнов

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал,
Фрязино Московской обл., Россия
E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru*

На основе данных навигационных спутниковых систем в работе рассмотрены вариации полного электронного содержания, наблюдаемые в период осеннего и весеннего равноденствия в 23-м цикле солнечной активности, соответствующей минимуму и максимуму данного цикла. Показано, что в период максимума солнечного цикла скорость изменения полного электронного содержания примерно в 2–3 раза превышает аналогичные данные для периода минимума солнечной активности. Это справедливо для весеннего и осеннего равноденствия.

Ключевые слова: ионосфера Земли, навигационные системы, полное электронное содержание, флуктуации, солнечная активность.

Введение

Одним из наиболее важных и практически значимых параметров, характеризующих состояние околоземного космического пространства, являются вариации электронной концентрации. При исследовании ионосферных возмущений на первый план выступают глобальные, круглосуточные измерения, которые необходимы для того, чтобы понять физические механизмы образования, переноса и разрушения неоднородностей ионосферной плазмы.

Изменчивость и неоднородность являются характерной особенностью ионосферы Земли. В значительной мере они проявляются в полном электронном содержании (ПЭС), которое представляет собой количество электронов, содержащихся в столбе единичного сечения вдоль линии наблюдения. Вариации полного электронного содержания обусловлены изменениями электронной концентрации вдоль трассы распространения радиоволн и могут служить индикатором состояния ионосферной плазмы. Методы, применяемые для исследования ионосферных вариаций, достаточно разнообразны. В настоящее время одним из основных способов получения ПЭС является использование глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Развитие сетей наземных приемников GPS/ГЛОНАСС и разработка технологии построения глобальных карт вертикального ПЭС позволяют получить достаточно детальную картину распределения электронной концентрации в интересующем регионе и динамику ее изменения.

Алгоритм определения ПЭС

Навигационные приемники, работающие по фазовым и кодовым измерениям дальности, позволяют с достаточно высокой точностью определить полное электронное содержание по хорошо известным формулам:

$$TEC = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + N_{12} + \sigma L] - \text{в случае фазовых измерений};$$

$$TEC = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + \sigma P] - \text{в случае дальномерных измерений}.$$

Здесь f_1 и f_2 – излучаемые частоты; λ_1 и λ_2 – длины волн излучения; $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – приращения фазового пути радиосигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере; $L_1 = \Delta \varphi_1 / 2\pi$ и $L_2 = \Delta \varphi_2 / 2\pi$ – фазовые измерения навигационного приемника; N_{12} – неоднозначность фазовых измерений; σL – ошибка фазовых измерений; P_1 и P_2 – псевдодальность при проведении кодовых измерений; σP – ошибка кодовых измерений.

Измерения фазы в системах GPS/ГЛОНАСС проводятся с высокой точностью, так что ошибка в определении ПЭС при штатной дискретности работы приемника в 30 с не превышает 10^{14} м^{-2} или $0,01 \text{ TECU}$ ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). Однако следует заметить, что при использовании фазовых измерений абсолютное значение ПЭС остается неизвестным. Применение кодовых измерений, позволяющих определять абсолютное значение ПЭС, из-за высокого уровня шума делает практически невозможным выделение вариаций ПЭС, обусловленных неоднородностями распределения электронной концентрации. В ионосферных исследованиях наиболее предпочтительным является использование ПЭС, полученное комбинированием фазового и кодового методов измерений.

Для исследования временных вариаций ПЭС целесообразно использовать приращение электронного содержания, т.е. анализировать скорость изменения ПЭС. В этом случае этот параметр можно определить по формуле

$$DTEC(t) = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \{ [L_1(t+T) - L_1(t)] \lambda_1 - [L_2(t+T) - L_2(t)] \lambda_2 \} / T,$$

где T – интервал времени наблюдения (съема информации). Значения этого параметра не зависят от инструментальной погрешности измерений и определяются только средой распространения, в частности ионосферой, состояние которой определяется в основном солнечной активностью. Интервал времени наблюдения в современных навигационных приемниках может варьироваться от 30 секунд до 0,01 секунды и менее. Это позволяет исследовать практически мгновенные вариации электронной концентрации, наблюдаемые вдоль трассы распространения навигационных сигналов.

Основные характеристики 23-го цикла солнечной активности

Рассмотрим изменение параметра $DTEC$ в период осеннего и весеннего равноденствия в 23-м цикле солнечной активности, соответствующей минимуму и максимуму

данного цикла. Как показано в [1], уровень геомагнитной активности и связанных с ней явлений имеет сезонный ход. Он выше в периоды равноденствия и ниже в период солнцестояния. Объясняется эта закономерность геометрией магнитных полей. В марте Земля движется по орбите вокруг Солнца южным полушарием вперед. Положительная магнитная составляющая межпланетного магнитного поля (ММП), проектируясь на магнитную ось Земли, создает компоненту ММП, направленную к северу, не усиливающую магнитную активность. Осенью Земля входит в положительный сектор ММП. В положительном секторе возникает компонента, направленная к югу, усиливающая вероятность возникновения геомагнитных возмущений.

23-й цикл солнечной активности начался в мае 1996 г. и завершился в декабре 2008 г. Он продолжался 12,6 лет. Максимум сглаженных среднемесячных чисел Вольфа за время цикла равнялся 120,8, а минимум – 1,7. В общей сложности 820 дней цикла пятен на Солнце не наблюдалось. Распределение чисел Вольфа W в 23 цикле показано на *рис. 1*.

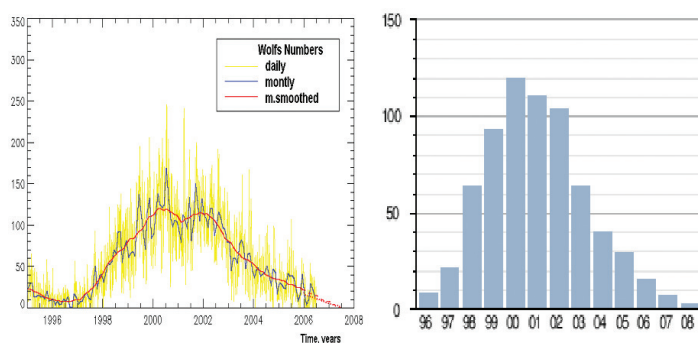


Рис. 1. Распределение чисел Вольфа в 23-м цикле солнечной активности [SIDC data]

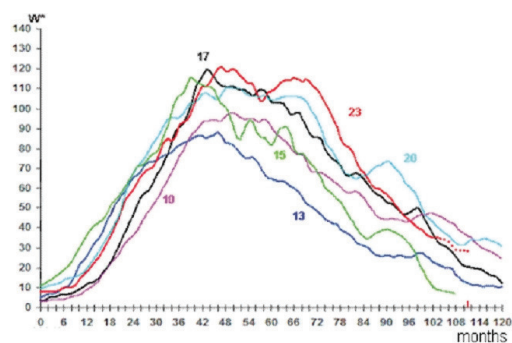


Рис. 2. Семейство солнечных циклов средней величины [2]

Основные характеристики этого цикла соответствуют параметрам солнечных циклов средней величины. Развитие 23-го цикла полностью укладывается в схему развития ему подобных, для которых $80 < W < 130$ (*рис. 2*). Геофизические характеристики 23-го цикла солнечной активности представлены в *табл. 1*.

По данным спутника GOES в 23-м цикле были зафиксированы 10 наиболее значительных по пиковой интенсивности рентгеновского излучения солнечных вспышек. Характеристики вспышек приведены в *табл. 1*. Сильнейшая геомагнитная буря в 23-м цикле наблюдалась 20 ноября 2003 г. Dst -индекс геомагнитной активности достиг значения – 422 нТл. Эта вспышка по Dst -индексу стала пятой по счету с начала наблюдения – январь 1957 г. Экстремальные события 23 цикла, как это следует из *табл. 2*, проходили на этапах роста и спада солнечной активности и не затрагивали периодов минимума и максимума. Более того, анализируемый период равноденствия характеризовался относительно спокойной солнечной активностью.

В скобках указаны количество наиболее экстремальных вспышек выше класса «X9», экстремально-сильных магнитных бурь с $K_x = 9$ и их продолжительностью в часах.

Таблица 1. Характеристики геофизической аномальности 23-го цикла солнечной активности [http://antivictory.org].

<i>Год</i>	<i>Характеристик потока ультрафиолетовой радиации X-ray</i>			<i>Характеристики геомагнитной активности по индексу Kx</i>		
	Период аномального устойчивого фона выше класса «С», сутки	Количество вспышек максимальной мощности класса «X»	Коэффициент аномальности потока X-ray	Количество экстремально сильных магнитных бурь	Период экстремальной возмущенности магнитосферы, час	Коэффициент геомагнитной аномальности
1996	0	1	0,0	1	3	0,0
1997	1,5	3	0,003	6	24	0,003
1998	1,7	14	0,05	9	66	0,008
1999	63	4	0,17	5	33	0,004
2000	112	14	0,31	11 (1-Kx9)	78 (9-Kx9)	0,009
2001	153	20 (два выше класса X9)	0,42	10	69	0,008
2002	151	9	0,42	9	42	0,005
2003	40	22 (три выше класса X9)	0,11	14 (3-Kx9)	105 (12-Kx9)	0,012
2004	19	10	0,05	8 (3-Kx9)	81 (18-Kx9)	0,010
2005	25	22 (три выше класса X9)	0,07	14 (3-Kx9)	69 (9-Kx9)	0,008
2006	3	4	0,006	4	24	0,003
2007	1	0	0,0	1	3	0,0
2008	0	0	0,0	1	3	0,0
2009	0	0	0,0	0	0	0,0
2010	4	0	0,006	1	3	0,0

Таблица 2. Экстремальные события 23-го цикла солнечной активности

<i>№ п/п</i>	<i>Дата</i>	<i>Балл</i>
1	4 ноября 2003 г.	X28,0
2	2 апреля 2001 г.	X20,0
3	28 октября 2003 г.	X17,2
4	7 сентября 2005 г.	X17,0
5	15 апреля 2001 г.	X14,4
6	29 октября 2003 г.	X10,0
7	6 ноября 1997 г.	X9,4
8	5 декабря 2006 г.	X9,0
9	2 ноября 2003 г.	X8,3
10	20 января 2005 г.	X7,1

Анализ результатов обработки навигационных данных

Результаты обработки навигационных данных, полученных с GPS-приемника, расположенного в городе Звенигороде Московской области, представлены на *рис. 3, 4*. На *рис. 3* показаны данные для весеннего равноденствия, на *рис. 4* – для осеннего. Из приведенных данных хорошо видно, что в период максимума солнечного цикла значения параметра *DTEC* примерно в 2–3 раза превышают аналогичные данные для периода минимума солнечной активности. Кроме этого, сама форма кривых, полученных в течение суток по всем наблюдаемым спутникам, существенно отличается. В период максимума солнечного цикла скорость изменения полного электронного содержания *DTEC* существенно выше. В это время и выше флуктуации параметра *DTEC*. Это справедливо для весеннего и осеннего равноденствия.

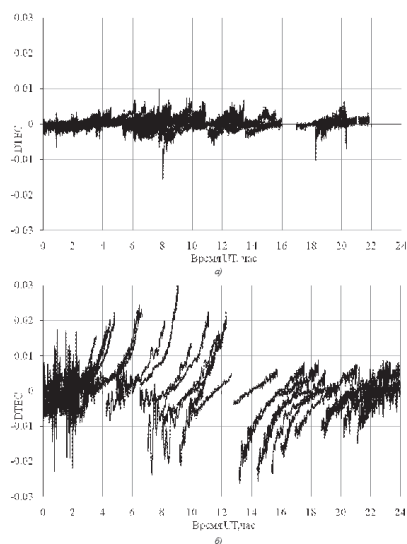


Рис. 3. Скорость изменения ПЭС в период весеннего равноденствия в минимуме (а) и максимуме (б) 23-го цикла солнечной активности

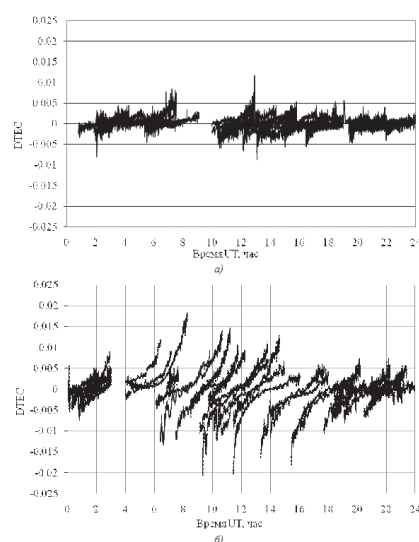


Рис. 4. Скорость изменения ПЭС в период осеннего равноденствия в минимуме (а) и максимуме (б) 23-го цикла солнечной активности

Детальный анализ результатов обработки показал, что в день весеннего равноденствия в период максимума солнечного цикла наблюдались значительные вариации скорости изменения полного электронного содержания. Эти вариации были зарегистрированы в ночные (1–2 часа по *UT*) и утренние (4–8 часов по *UT*) часы. Наиболее сильные из них наблюдались с 6 до 8 часов *UT* (*рис. 5*) и с 1,5 до 2,5 часов *UT* (*рис. 6*). По местному времени это соответствовало полуденному и ночному времени. Вариации в ночное время суток носили быстро осциллирующий характер с амплитудой $\pm 0,02 \text{ TECU/s}$, в дневное время наблюдались периодические вариации параметра *DTEC* с периодом 20–30 минут. Длительность вариаций ПЭС, наблюдаемых в ночное время суток, составляет около 1 часа и соответствует, по всей видимости, структуре перемещающегося волнового пакета с характерными периодами времени от 5 до 10 минут. Вероятность появления перемещающихся волновых пакетов, как указано в [2], практически не зависит от уровня геомагнитной активности.

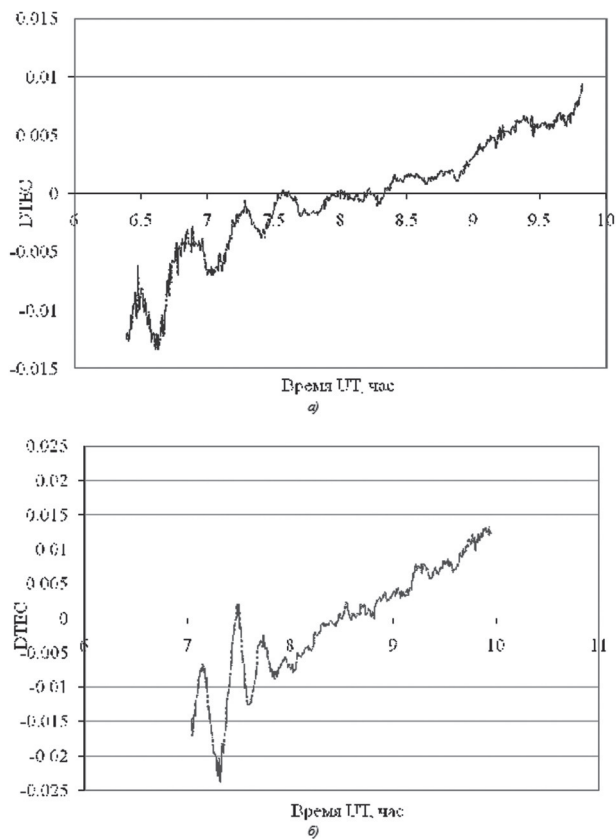


Рис. 5. Вариации скорости изменения полного электронного содержания в максимуме 23-го цикла солнечной активности в период осеннего (а) и весеннего (б) равноденствия

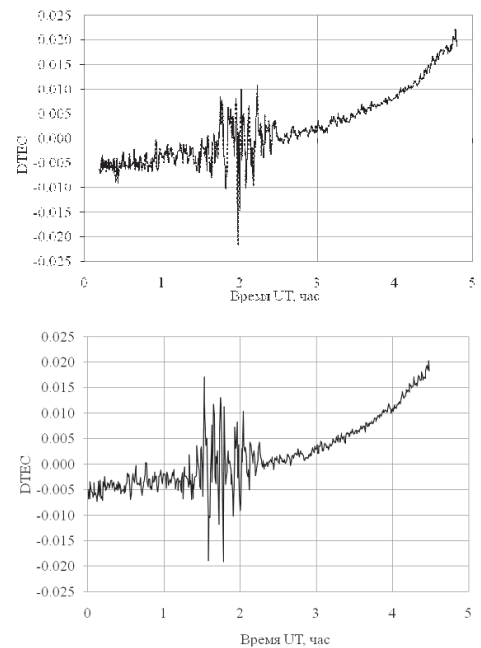


Рис. 6. Вариации скорости изменения полного электронного содержания в максимуме 23-го цикла солнечной активности в период весеннего равноденствия в ночное время суток по наблюдениям двух разных спутников

Вариации полного электронного содержания, наблюдаемые в период времени 6–8 часов *UT*, могут быть обусловлены крупномасштабными перемещающимися ионосферными возмущениями. Для проверки этого предположения необходимо провести детальный анализ данных измерений, которые могут быть получены с других навигационных приемников, расположенных в европейской части территории России. Следует обратить внимание на тот факт, что эти вариации наблюдались в период как весеннего, так и осеннего равноденствия в одно и то же время в максимуме 23-го цикла солнечной активности. Использование нескольких навигационных приемников, расположенных на близких расстояниях (1–100 км) и принимающих сигналы одних и тех же спутников, может обеспечить детектирование ионосферных неоднородностей, обусловленных воздействием тех или иных факторов на плазменную оболочку Земли. Одновременная обработка полученных таким образом данных позволяет устранить влияние на ионосферу естественных факторов. Такой вариант проведения измерений может быть полезен при проведении экспериментов по воздействию на ионосферу мощного электромагнитного излучения.

Заключение

Анализ скорости изменения полного электронного содержания позволяет достаточно уверенно выделять в ионосфере процессы с различными пространственно-временными характеристиками. Показано, что в период максимума солнечного цикла скорость изменения полного электронного содержания примерно в 2–3 раза превышает аналогичные данные для периода минимума солнечной активности. Это справедливо как для весеннего, так и для осеннего равноденствия. Использование же нескольких навигационных приемников, расположенных на близких расстояниях, может быть полезно при проведении экспериментов по воздействию на ионосферу мощного электромагнитного излучения, так как в этом случае возможно детектирование ионосферных неоднородностей, обусловленных воздействием на ионосферу только внешних факторов. Таким образом, навигационные спутниковые системы могут быть успешно использованы для исследования разнообразных радиофизических процессов, протекающих в ионосфере в различные периоды солнечной активности, что важно для понимания физики протекающих в ней процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы» и программы ОФН РАН «Фундаментальные проблемы воздействия мощными радиоволнами на ионосферу и магнитосферу Земли».

Литература

1. *Афраймович Э.Л., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВЧ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
2. *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
3. *Ишков В.Н.* Текущий 23-й цикл солнечной активности: развитие и основные свойства // World Data Center in Russia, 2006.

Total electron content fluctuations of the Earth ionosphere during a maximum and a minimum of a solar cycle according to the GPS/GLONASS systems

E.V. Smirnova, V.M. Smirnov

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino branch,
Fryazino, Moscow region, Russia
E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru*

The variations of the total electron content observable during an autumn and spring equinox in 23 solar activity cycle, corresponding a minimum and a maximum of the given cycle are considered on the basis of the GPS/GLONASS data. It is shown that during a maximum of a solar cycle the speed of change of the total electron content exceeds approximately in 2-3 times similar data for the period of solar activity minimum. It is fair for a spring and autumn equinox.

Keywords: the Earth ionosphere, navigating systems, total electron content, fluctuation, solar activity.