18. АНАЛИЗ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В ВОСТОЧНОСИБИРСКОМ РЕГИОНЕ В АВГУСТЕ 2009 Г.

Воейков С.В.¹, Ясюкевич Ю.В.¹, Полякова А.С.¹, Подлесный А.В.¹

Саньков B.A.²

Башкуев Ю.Б.³

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН ,²Институт земной коры СО РАН,

³Бурятский научный центр СО РАН

Аннотация. В августе 2009 г. в Восточносибирском регионе был проведен комплексный эксперимент по исследованию геофизической обстановки. Были обнаружены достаточно серьезные нарушения суточного хода электронной концентрации и полного электронного содержания (ПЭС). В ряде случаев дневные значения ПЭС были меньше ночных. В трех случаях наблюдалось выраженное уменьшение интенсивности вариаций ПЭС в диапазоне периодов 30-60 мин примерно на сутки до уровня меньше 0.1 ТЕСU. Это понижение наблюдалось примерно через 2-3 дня после повышения интенсивности колебаний ПЭС в том же диапазоне периодов примерно до 0.3 – 0.4 ТЕСU. Для 6 суток наблюдались близкие к нулю ночные значения ПЭС. Причем, из них четыре дня попали в список дней с существенно повышенным уровнем интенсивности вариаций ПЭС в диапазоне периодов 0-10 мин (> 0.025 ТЕСU).

ВВЕДЕНИЕ

В августе 2009 г. в Восточносибирском регионе (здесь мы используем этот термин для обозначения широтно-долготного интервала 50-55° С.Ш., 95-110° В.Д.) был проведен комплексный эксперимент по исследованию геофизической обстановки с использованием данных измерений вариаций ионосферы, магнитосферы и колебаний земной коры. В настоящей статье представлен анализ результатов измерений ионосферных параметров в регионе. Для этой цели были использованы данные измерений полного электронного содержания (ПЭС) на сети приемников GPS, карты ПЭС GIM [1], данные измерений критической частоты максимума F2-слоя, полученные при вертикальном зондировании на дигизонде в Иркутске и на слабонаклонной трассе Усолье-Сибирское – Торы на ЛЧМ-ионозонде.

ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1. представлена геометрия эксперимента. Жирными точками показаны использовавшиеся станции GPS. Крестиком дано приблизительное положение точки

отражения для слабонаклонной трассы Усолье-Сибирское – Торы. Иркутский дигизонд расположен в ~10 км от станции GPS IRKM.



Рис. 1. Геометрия эксперимента в августе 2009 г.

АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ПЭС

Методы определения ионосферных параметров на основе фазовых измерений GPS сигналов были описаны в нескольких работах, включая работу [2]. Измерения фазы в системе GPS проводятся с высокой степенью точности, при которой ошибка в определении вариаций ПЭС не превышает 10^{14} эл/м². Это позволяет изучать вариации ПЭС в широком динамическом диапазоне, достигающем 10^{-4} от полного суточного изменения ПЭС. Для измерения ПЭС использовалась общепринятая единица TECU, равная 10^{16} эл/м². Первичными данными являются временные ряды измерений ПЭС I(t) вдоль наклонного луча, связывающего приемник GPS и ИСЗ, а также соответствующие им ряды угла места и азимута текущего направления на ИСЗ.

Процедура обработки данных GPS выглядела следующим образом. Для каждой обрабатываемой станции GPS рассчитывались вариации ПЭС на всех лучах «приемник-ИСЗ». Методом скользящего среднего полученные ряды I(t) фильтровались в двух диапазонах периодов 0-10 мин и 30-60 мин. Соответствующие

Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой

отфильтрованные ряды мы соотносим с ионосферными возмущениями мелкого и крупного масштабов. Для полученных отфильтрованных рядов в качестве величины, характеризующей интенсивность вариаций, рассчитывались ряды огибающих – $E_s(t)$ (0-10 мин) и $E_L(t)$ (30-60 мин). Затем из полученных рядов интенсивности вариаций ПЭС для разных лучей «приемник-ИСЗ» собирался один ряд. Наиболее достоверные результаты определения параметров ионосферы соответствуют большим углам места ИСЗ, поэтому для каждого момента времени среди всех лучей мы выбирали лучи, соответствующие максимальному углу места.

Таким образом, для каждой станции GPS были рассчитаны ряды интенсивности вариаций ПЭС в двух диапазонах периодов 0-10 мин и 30-60 мин – $E_{s}(t)$ и $E_{L}(t)$, соответственно. Далее мы произвели усреднение рядов $E_{s}(t)$ и $E_{L}(t)$ по всем используемым станциям и получили соответствующие ряды – $\langle E_{s}(t) \rangle$ и $\langle E_{L}(t) \rangle$.



Рис. 2. Геомагнитная обстановка и интенсивность вариаций ПЭС.

Как видно из рис. 2а геомагнитную обстановку в августе 2009 г. (213–243 дни) можно охарактеризовать как спокойную. За исключением 4 дней (218, 231, 232 и 242) значения индекса Кр не превышали 3. Максимальное значение Кр наблюдалось в

предпоследний день августа и составило 6-. В течение всего месяца индекс Dst варьировался очень слабо, в основном оставаясь в пределах от 25 до -25 нТл. Только в 218 день значение Dst упало ниже отметки в -25 нТл и достигло наименьшего значения за весь месяц -38 нТл.

Ряды усредненной по региону интенсивности вариаций ПЭС в двух диапазонах периодов 0-10 мин и 30-60 мин – $\langle E_S(t) \rangle$ и $\langle E_L(t) \rangle$ – представлены на рис. 26 и 28. Прежде всего, надо отметить, что мы не наблюдаем сколько-нибудь выраженной зависимости рядов $\langle E_S(t) \rangle$ и $\langle E_L(t) \rangle$ от значений индексов Dst и Kp. Видимо, это связано с достаточно низким уровнем геомагнитной возмущенности.

Из рис. 2б видно, что ряд $\langle E_L(t) \rangle$ мало меняется день ото дня – в основном в пределах от 0 до 0.2 ТЕСU. Наблюдается также слабовыраженный суточный ход. Стоит отметить одно явление – в трех случаях регистрируется выраженное уменьшение интенсивности вариаций ПЭС примерно на сутки до уровня меньше 0.1 ТЕСU (рис. 2б) – 216 день и на стыках между 222 и 223 и между 232 и 233 днями. Во всех трех случаях это понижение наблюдалось примерно через 2-3 дня после повышения интенсивности колебаний ПЭС примерно до 0.3 – 0.4 ТЕСU. Это явление, хотя и не так сильно выраженное, можно видеть и для ряда $\langle E_S(t) \rangle$ (рис. 2в). С чем это явление связано, сказать пока сложно.

Ряд интенсивности мелкомасштабных вариаций ПЭС $\langle E_S(t) \rangle$ (рис. 2в) в отличие от ряда $\langle E_L(t) \rangle$ весьма существенно изменяется день ото дня. Условно можно разделить весь ряд данных $\langle E_S(t) \rangle$ по величине интенсивности вариаций ПЭС на спокойные и возмущенные дни. В качестве условного порогового значения мы выбрали 0.025 TECU (красная горизонтальная линия на рис. 2в). Чтобы не рассматривать случайные выбросы значений интенсивности сразу определимся, что нас интересуют только достаточно продолжительные усиления колебаний ПЭС – длительностью не менее 2-3 часов. Таким образом, мы выделяем 11 суток с возмущенным уровнем $\langle E_S(t) \rangle - 213-215, 218, 220-221, 227, 229, 238, 240 и 243.$

Отметим, что с 231 по 237 дни значения ряда $\langle E_S(t) \rangle$ практически не превышают 0.02 ТЕСU – на протяжении всего августа 2009 г. это самый спокойный период в поведении интенсивности вариаций ПЭС в диапазоне периодов 0-10 мин.

АНАЛИЗ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

Для анализа общего состояния ионосферы в Восточносибирском регионе (ВСР) на основе данных глобальных карт полного электронного содержания (Global Ionosphere Maps – GIM) [1] нами было рассчитано региональное электронное содержание (среднее региональное ПЭС) по региону 50-55° С.Ш., 105-110° В.Д. Карты GIM, имеющие пространственное разрешение 5° по долготе и 2.5° по широте,

представлены в свободном доступе на интернет-сайте [3]. В настоящей работе мы использовали данные лаборатории CODE.

Среднее региональное ПЭС рассчитывается аналогично глобальному электронному содержанию [4], как полное число электронов над заданным регионом, и нормируется на площадь поверхности.

$$\langle I \rangle = \frac{1}{S} \sum_{i} S_{i} I_{i} \tag{1}$$

где S – полная площадь поверхности, S_i и I_i – площадь и ПЭС в i-ой ячейке GIM. Произведение S_i·I_i представляет собой полное число электронов в ячейке GIM. В ряде работ (см. например, [5]) среднее ПЭС считается как среднеарифметическое по всем значениям ПЭС. Отбрасывание статистического весового множителя возможно, но является менее точным, по сравнению с применяемым нами подходом.

На рис. За представлена динамика среднего регионального ПЭС в ВСР в 1998-2010 гг. Значительный «шум» обусловлен суточными и 27-дневными вариациями. В динамике хорошо прослеживаются годовые вариации, а также общий 11-летний ход, характеризующий цикл солнечной активности с максимумом в 2002 г.





На рис. Зб представлено среднее региональное ПЭС в ВСР в августе 2009 г. Для исследуемого интервала в регионе мы видим достаточно низкие ночные значения ПЭС (для отдельных дней менее 0.5 TECU). Максимальные значения ПЭС днем не превосходят 16 TECU. В отдельные дни максимальное дневное значение ПЭС не

превосходит 8 TECU. Для сравнения на рис. Зб приведены значения критической частоты слоя F2, полученные по данным Иркутского дигизонда DPS-4. Можно видеть достаточно хорошее согласование этих данных, хотя полуденный минимум не во все дни проявляется по данным двух инструментов одинаково.



Август 2009 г.

Рис. 4. Региональное глобальное содержание в Восточносибирском регионе и Европе в августе 2009 г. Красной кривой на панели б приведено усредненное за август 2009 г. значение РЭС для соответствующего UT

На рис. 4а представлены данные среднего регионального ПЭС для ВСР (черная кривая) и для аналогичного широтного региона в Европе (50-55° С.Ш., 15-20° В.Д.). Суточные вариации сдвинуты по фазе на 7 часов вследствие долготного разнесения регионов. Кроме того, можно видеть, что амплитуда суточных вариаций в Европейском регионе меньше чем в ВСР.

В Европейском регионе значения ПЭС в находятся в пределах 3.5-12 ТЕСU и за исключением 7 дней не превышают 10 ТЕСU. В ВСР диапазон изменения ПЭС ~0-14 ТЕСU. В 218, 221, 227, 237, 240, 242 дни наблюдаются экстремально низкие значения среднего ПЭС в ВСР. Здесь отметим – четыре дня (218, 221, 227 и 240) попали в список дней с возмущенным уровнем интенсивности вариаций ПЭС в диапазоне периодов 0-10 мин $\langle E_{s}(t) \rangle$ (рис. 2в). Отметим также, что в период с 232 по 237 дни амплитуда суточных колебаний ПЭС в ВСР становится практически минимальной за

Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой

весь месяц и близкой к амплитуде суточных вариаций ПЭС в Европейском регионе. Но этот период практически соответствует спокойному периоду в поведении интенсивности $\langle E_S(t) \rangle$ вариаций ПЭС в диапазоне периодов 0-10 мин (рис. 2в) – с 231 по 237 дни.

Амплитуда суточных вариаций ПЭС в августе 2009 г. в ВСР меняется от 5.9 ТЕСИ до 14.9 ТЕСИ и значительно превосходит амплитуду суточных вариаций в Европейской части 4-9.3 ТЕСИ. Как можно видеть из рис. 4б суточный ход ПЭС достаточно сильно отличается в отдельные дни от среднего суточного хода (красная кривая на рис. 4б). Однако полуденный минимум выражен достаточно хорошо практически во все дни за исключением 242 дня. В 213-217, 220, 222, 223 дни значение среднего регионального ПЭС в дневное время ниже, чем минимальное ночное значение в этот день. Для анализа нарушения суточного хода возможно использовать соотношение дневной и ночной ионизации, характеризующее суточную динамику ПЭС в исследуемом регионе. Для этих целей мы рассчитали ряд среднего регионального ПЭС для 13 часов локального времени LT и для 1 LT. Далее эти ряды были сглажены скользящим средним с временным окном 3 дня. Соотношение величин дневной и ночной ионизации R определяется как

$$R=I_{13}/I_{1},$$
 (2)

где I₁₃, I₁– среднее региональное ПЭС для 13 LT и 1 LT, соответственно. Для сравнения мы провели расчет величины R для аналогичного широтного диапазона в Европе (50-55° С.Ш., 15-20° В.Д.). Результаты расчетов представлены на рис. 5. Черная кривая – для ВСР, серая кривая – для Европейской части. На рис. 5а представлены результаты за период с 1998 г. по 2010 г., на рис. 5б – за август 2009 г.

Хорошо прослеживаются годовые вариации значения R, связанные с тем, что разница между ночной и дневной ионизацией выражена зимой гораздо более существенно (рис. 5а). При высокой солнечной активности в отдельные зимние дни величина R для BCP достигает 8. Достаточно интересен факт, что, начиная с 2004 г., т.е. в минимуме солнечной активности, значения R в BCP летом становятся меньше единицы. Что говорит о существенном нарушении суточного хода в данном регионе летом. В августе 2009 г. мы можем видеть эту картину в 214-216, 222, 223 дни (см. рис. 5б). В то же время в 227 день эта величина достигает 6, что связано с очень низким значением ночной ионизации (см. рис. 3б).



Рис. 5. Соотношение величин дневного и ночного среднего ПЭС

Как можно видеть, значение R для Европейской части близко к 2 и достаточно слабо меняется. В ВСР можно видеть существенную динамику соотношения дневной и ночной ионизации. Величина R меняется от 0.25 до 6.

Таким образом, можно сказать, что суточный ход ПЭС в регионе ВСР достаточно сильно отличается от суточного хода на аналогичных широтах в Европейском регионе. И даже более того, суточный ход ионизации существенно отличается от «классической» динамики ПЭС, соответствующей модели Чепмена. Согласно модели Чепмена большему зенитному углу солнца соответствует большее значение электронной концентрации (а, следовательно, ПЭС). В исследуемом регионе мы наблюдаем картину, когда ночные значения ПЭС превосходят дневные.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ЛЧМ-ИОНОЗОНДА

В анализе использованы ежеминутные данные слабонаклонного зондирования ионосферы на трассе Усолье Сибирское – Торы (Бурятия, Тункинская долина) протяженностью ~100 км и вертикального зондирования в п. Торы. Мощность излучения передатчика ЛЧМ зонда при слабонаклонном зондировании 150 Вт. В п.

Торы работал моностатический ЛЧМ-ионозонд, с базой порядка 60 м и мощностью излучения ~ 2 Вт. В РФ и в целом по миру ведутся активные исследования ионосферы с применением бистатических ЛЧМ-радаров, поэтому теория их работы хорошо описана, например, в обзоре [6].

На рис. 6 приведено сравнение полученных данных значений foF2 слабонаклонного зондирования с прогнозом IRI-2007 в период 3-12 августа.



Рис. 6. Август 2009г. Точки – foF2 на трассе Усолье - Торы, сплошная линия – прогноз IRI-2007.

Ниже в табл. 1 приведены максимальные и среднеквадратичные отклонения foF2 от прогнозируемых IRI за весь период наблюдений 3-23 августа.

Табл. 1. Максимальные и среднеквадратичные отклонения foF2 на трассе Усолье –

Торы от прогноза IRI за период 3-23 августа 2009
--

Число	Δ, ΜΓц	σ, ΜΓц	Max, МГц	Δ %	σ%	Max %
3	-0,19	0,52	1,17	-4,01	12,36	13,56
4	-0,26	0,35	0,89	-5,87	8,04	10,82
5	-0,71	0,40	1,44	-17,49	9,62	0,95
6	-0,43	0,40	1,31	-9,76	9,50	16,47
7	-0,55	0,33	1,35	-14,05	7,60	2,19
8	-0,18	0,57	1,12	-3,74	13,44	19,52
9	-0,37	0,35	0,94	-8,50	8,21	12,43
10	-0,74	0,52	1,40	-18,51	13,54	10,95
11	-0,68	0,33	1,33	-16,70	7,91	-0,69
12	-0,53	0,44	1,41	-12,71	10,73	6,73
13	-0,47	0,44	1,25	-11,29	10,94	9,39

14	-0,76	0,42	1,45	-19,87	12,74	5,41
15	-0,63	0,34	1,38	-16,03	8,72	0,46
16	-0,47	0,53	1,17	-10,92	12,86	15,75
17	-0,33	0,45	1,24	-7,04	10,52	12,12
18	-0,36	0,54	1,50	-8,22	13,40	16,60
19	-0,30	0,43	1,08	-7,78	9,74	12,37
20	-1,06	0,31	1,74	-29,00	12,05	-14,01
21	-0,68	0,27	1,37	-17,34	7,35	-5,07
22	-0,61	0,40	1,33	-15,90	10,88	5,00
23	-0,76	0,25	1,10	-17,55	6,50	-5,67

Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой

В табл. 1: Δ - средняя разность, σ – среднеквадратичное отклонение и Max – прогнозом максимальное отклонение между IRI И данными ионозонда. Соответствующие значения в процентах были получены нормировкой на значения foF2, определенные по модели IRI. Из табл. 1 видно, что прогноз систематически завышен в среднем на величину порядка 10%, а максимальные отклонения foF2 в отдельные дни превышают величину 20%. Кроме этого, по данным зондирования, в августе наблюдаются сильные спорадические образования в Е-области, максимально применимые частоты которых достаточно часто превышают максимальную частоту зондирования.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на спокойную геомагнитную обстановку в Восточносибирском регионе в августе 2009 г. наблюдались достаточно интересные явления:

1) По данным Иркутского дигизонда, ЛЧМ-ионозонда в п. Торы и глобальных карт ПЭС наблюдаются достаточно серьезные нарушения суточного хода электронной концентрации, а, следовательно, и ПЭС. В ряде случаев дневные значения ПЭС были меньше ночных.

2) В трех случаях наблюдалось выраженное уменьшение интенсивности вариаций ПЭС в диапазоне периодов 30-60 мин примерно на сутки до уровня меньше 0.1 ТЕСU. Это понижение наблюдалось примерно через 2-3 дня после повышения интенсивности колебаний ПЭС в этом же диапазоне периодов примерно до 0.3 – 0.4 ТЕСU. 3) По данным карт ПЭС для 6 суток наблюдались экстремально низкие значения ПЭС (близкие к 0). Причем, из них четыре дня попали в список дней с возмущенным уровнем интенсивности вариаций ПЭС в диапазоне периодов 0-10 мин (> 0.025 TECU).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность К.Г. Ратовскому за данные критической частоты f0F2. Авторы также благодарны Институту прикладной астрономии РАН (г. Санкт-Петербург) за предоставленные данные станции GPS BADG. Работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 56, гранта РФФИ 10-05-00113-а и гранта президента РФ МК-3094.2010.5.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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 ionosphere TEC measurements // Radio Sci. 1998. V. 33. № 3. P. 565–582.

2. Afraimovich E.L., Palamarchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of traveling ionospheric disturbances // J. Atm. Solar-Terr. Phys., 1998. V. 60. P. 1205-1223.

3. ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/ products/ionex

4. Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. Global Electron Content: a new conception to track solar activity // Annales Geophysicae. 2008. V.26. P. 335-344.

5. Hocke K. Oscillations of global mean TEC // Journal of geophysical research. 2008. V. 113. A04302. doi:10.1029/2007JA012798.

6. Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В. ЛЧМионозонд и его применение в ионосферных исследованиях //Известия Вузов. Радиофизика. 2003. т.46, № 11. с. 919-952.