

АНОМАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ И ИХ МОДИФИКАЦИЯ ПРИ МОЩНОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ ПО ДАНЫМ СПУТНИКОВ ИНТЕРКОСМОС БОЛГАРИЯ-1300 И КОСМОС-1809

Геннадий Беляев¹, Бойчо Бойчев², Владимир Костин³, Геннадий Комраков⁴,
Елена Трушкина¹, Ольга Овчаренко¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН
e-mail: belyaev@izmiran.ru

²Институт космических исследований – Болгарская академия наук
e-mail: boytchev@bas.bg

³Государственный университет управления, Москва, Россия
e-mail: kostin@maryno.net

⁴Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород, Россия

Абстракт: Продолжен детальный анализ аномальных структур в верхней ионосфере над циклонами, достигшими ураганной силы, и терминатором и их модификации при мощном дополнительном нагреве ВЧ-излучением стенда Сура. Выявлено специфическое изменение параметров ионосферы в зените над ураганом на стадии его зарождения и развития. Показано, что развитие *bubbles*, которые регулярно наблюдались при высокой солнечной активности на высотах ~ 900 км за терминатором, подавляется при развитии урагана и при работе стенда Сура. Данный эффект наблюдается на витках, проходящих западнее плоскости магнитного меридиана. Обнаружено, что ВЧ нагрев излучением стенда Сура проявляется также и в полярной ионосфере.

ANOMALOUS STRUCTURES IN UPPER IONOSPHERE AND THERE MODIFICATIONS WITH STRONG HIGH-FREQUENCY HEATING ACCORDING INTERCOSMOS BULGARIA-1300 AND KOSMOS-1809 SATELLITES DATA

Gennady Belyaev¹, Boycho Boychev², Vladimir Kostin³, Gennady Komrakov⁴,
Elena Trushkina¹, Olga Ovcharenko¹

¹Institute of Terrestrial Magnetism Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS
e-mail: belyaev@izmiran.ru

²Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: boytchev@bas.bg

³State University of Management, Moscow, Russia
e-mail: kostin@maryno.net

⁴Research radio physical institute, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract: The detailed analysis of anomalous structures in the upper ionosphere above the cyclones, which reached hurricane force, and terminator and their modification with the powerful supplemental heat by the HF- emission of the stand Sura is continued. Specific changes of the ionosphere parameters in the zenith above the hurricane at the stage of its origin and stage of intensification are revealed. It is shown that the development of bubbles, which were regularly observed at the heights ~ of 900 short circuits by terminator with the high solar activity, is suppressed with the development of hurricane and with the work of the stand Sura. This effect is observed on the turns, which pass to the west of the magnetic meridian planes. It is discovered, that the HF heating by the emission of the stand Sura is manifested also in the polar ionosphere.

Введение

Научная аппаратура спутника Интеркосмос-Болгария-1300 была разработана в Болгарии и состояла 11 приборов, предназначенных для исследования физических процессов в ионосфере и магнитосфере. Спутник был запущен 7 августа 1981, в год 1300-летия Болгарии и работал по 1983 г. на орбите с апогеем ~ 900 км, перигеем ~ 800 км и наклоном - 81,3°. Это был первый спутник серии Интеркосмос с трехосной стабилизацией и аппаратурой, имеющей хорошее временное разрешение.

Специалисты ИЗМИРАН принимали участие в создании и обработке данных научного комплекса ИЭСП-ИМПМ [1,2], измерявшего 6 компонент э/м поля в диапазоне 0,1-8 Гц, и трехкомпонентного магнитометра ИМАП [3]. Результаты измерений спутника позволили:

- построить эмпирические модели электрического поля в авроральной ионосфере в зависимости от состояния солнечного ветра и соответствующие модели конвекции плазмы [4-6];
- обнаружить проникновение аврорального электрического поля в главный ионосферный провал [7-8];
- исследовать структуру продольных токов в авроральном овале [3, 9-12];
- выяснить поляризационные и спектральные характеристики э/м скачков (ЭМС) над различными областями полярных сияний, их взаимосвязь с потоками энергичных частиц, предложить самосогласованную модель ЭМС [13-14].

Уникальность измерений со спутника Интеркосмос-Болгария-1300 заключается в том, что они получены в годы очень высокой солнечной активности, которая в текущем солнечном цикле не достигается. Через 10 лет другой исследовательский спутник Космос-1809 также работал в годы максимума солнечной активности на квазикруговой орбите в верхней ионосфере. Поэтому авторы этой работы воспользовались данными этих спутников для анализа аномальных структур не только в авроральной области, но и в экваториальной ионосфере [15-17].

В ходе углубленного анализа, который представлен ниже, было обнаружено, что активное воздействие на ионосферу мощного высокочастотного излучения стенда Сура во время вечернего терминатора может демпфировать тайфун и подавлять развитие bubbles, которые достигают верхней ионосферы при высокой солнечной активности. Активное воздействие на ионосферу излучением стенда Сура, в отдельных случаях, может нарушить развитие суббури, как было показано в работе [18]. В данной работе представлены также эффекты воздействия излучения стенда Сура на структуры полярной ионосферы обоих полушарий.

Экспериментальные результаты и их интерпретация

Одной из важных научных задач, решаемых в начале работы спутника Интеркосмос-Болгария-1300, было подтвердить существование на $L = 1.1 - 1.8$ пояса высокоэнергичных электронов ($E > 20$ МэВ) с помощью прибора «Электрон» [19]. Для этого включение научной аппаратуры было запланировано при пролетах вблизи Бразильской магнитной аномалии, где высота отражения захваченных электронов понижается.

В это время (август – сентябрь 1981 г.) в атлантическом океане наблюдалась целая серия тропических ураганов. Сильнейший из них ураган IV категории Harvey развился 11 – 19 сентября с максимальной скоростью ветра порядка 215 км/ч и падением давления 946 hPa. Обычно ураганы в этом регионе развиваются из тропических волн, зарождающихся над антициклоном в Западной Африке.

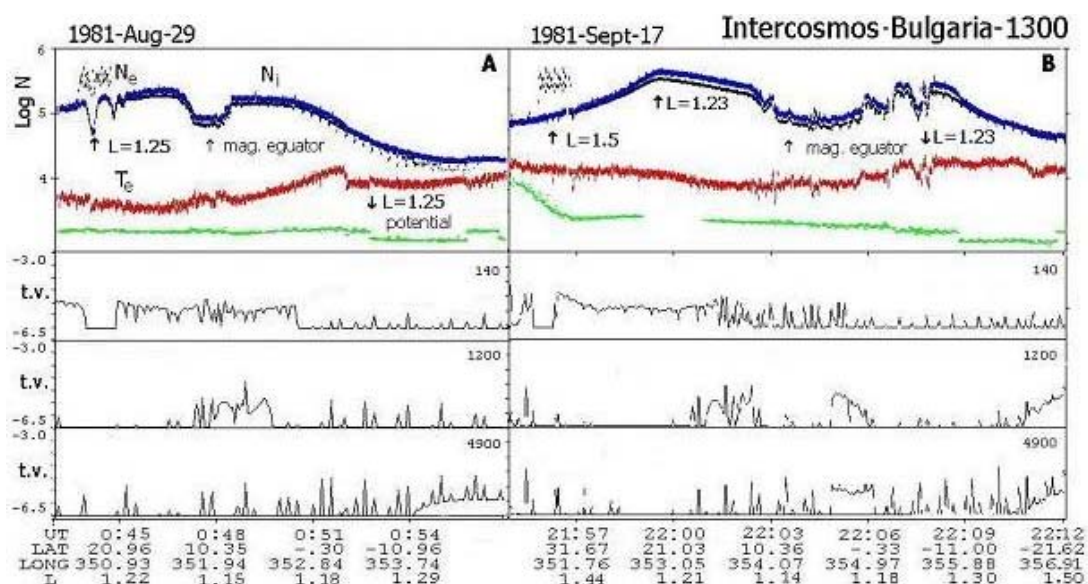


Рис. 1. А – зарождение урагана Harvey над Западной Сахарой $L=1.25$; В – флуктуации электронной компоненты на широте центра высотного антициклона над ураганом $L=1.5$

На рис. 1 и 2 представлены отдельные результаты, полученные со спутника Интеркосмос-Болгария-1300, с учетом динамики развития тропической волны (тропическая депрессия и тропический шторм) до стадии урагана и его разрушения. Приводятся данные измерений: плотности N_i , N_e в логарифмическом масштабе, температуры T_e , потенциала спутника и ОНЧ-колебаний, регистрируемых в каналах 140 Гц, 1200 Гц и 4900 Гц.

Панель А на рис. 1 за 29.08.81г. соответствует периоду зарождения тропической волны. Всплески плотности N_e и провалы N_i на $L=1.25$ наблюдаются над антициклоном в Западной Африке. Такие структуры наблюдались авторами над электромагнитными скачками вблизи аврорального овала над восходящими струями ионов [13,14]. Типичный провал плотности вблизи магнитного экватора соответствует перестройке ионосферы за терминатором в период высокой солнечной активности ($F_{10.7} \sim 260$). Поведение температуры электронов и спектра ОНЧ колебаний являются хорошими индикаторами различных физических процессов в плазме и поэтому приводятся на рисунке.

Панель В на рис.1 соответствует началу затухания урагана Harvey. Скорость ветра в циклоне понизилась до 110 км/ч, а давление повысилось до 995 hPa. В архивных данных [20] указывается, что в период с 11 по 15 сентября 1981 г. в стратосфере над ураганом Harvey сформировался мощный антициклон. К 17 сентября «глаз» урагана (36,8 N, 50,6 W) два дня удалялся на север от высотного антициклона (на ~ 30 N), на широте которого ($L = 1.5$) наблюдаются флуктуации N_e , которые можно объяснить проникновением восходящего потока нейтралов на высоты верхней ионосферы. В этой области наблюдается необычно значительное падение потенциала спутника. Дополнительный пик плотности $L = 1.23$ соответствует выносу плазмы с E-слоя ионосферы на высоты верхней ионосферы. Данный эффект подробно разбирался в работе [15]. В работе авторов [16] было отмечено, что если два супертайфуна взаимодействуют (Page и Owen), то восходящего потока не отмечается. Следует отметить, что в сопряженном полушарии уменьшается влияние урагана, и развиваются bubbles ($L = 1.23$).

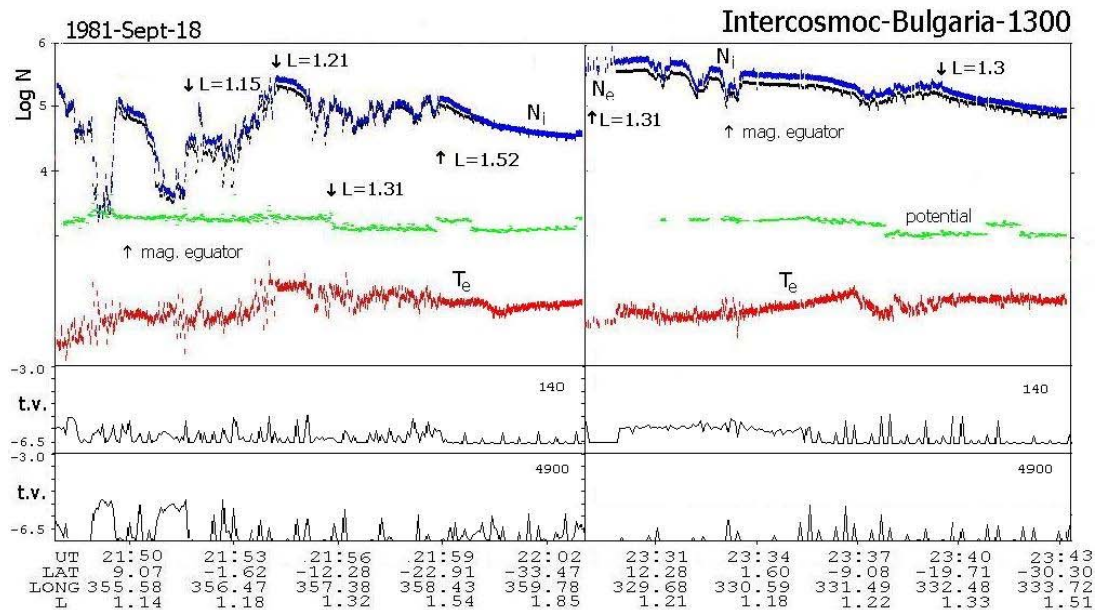


Рис. 2. Влияние на ионосферу тропического шторма Harvey (38 N, 44 W) и зарождающегося урагана Irene (14 N, 30 W)

18 сентября 1981 г. ураган Harvey ослабел, перешел в стадию тропического шторма, и его влияние на ионосферу уменьшилось, поэтому с обеих сторон от геомагнитного экватора наблюдаются сильные структуры bubbles (панель А рис. 2). Более слабые флуктуации плотности типа малых bubbles на $L = 1.32 - 1.54$ приходятся на магнитосопряженную область зарождающегося урагана Irene. Похожая аномальная депрессия плотности в ионосфере над зарождающимся тайфуном Aviona ранее отмечалась в [16]. На панели В рис. 2 представлен следующий виток 18.09.1981 г., который был ближе к центру тропического шторма (TS) Harvey и дальше от зарождающегося Irene. Видны флуктуации плотности электронов над центром тропического шторма ($L = 1.33$), подавление bubbles в окрестности геомагнитного экватора и аномальное поведение плотности и температуры в магнитосопряженном районе ($L = 1.22 -$

1.33). На следующем витке, который проходил западнее магнитного меридиана, проходящего через TS Harvey, развитие bubbles было полностью подавлено [17].

Ранее в работе [15] подробно рассматривались параметры ионосферы в окрестности тайфуна V категории Harry. Траектория спутника проходила ~ на 2° западнее «глаза» тайфуна. Плотность N_e и ее вариации представлены на рис.3. Отчетливо выделяются следующие эффекты:

- пик плотности над «глазом» тайфуна, который возникает из-за столкновения нейтралов с ионами плазмы. Струя над высотным антициклоном, по-видимому, достигает высоты ~ 1500 км, что следует из характерного поведения электрического поля [15]. Такая же зависимость наблюдалась и над тайфуном Sina [16];
- размытый максимум плотности (выделялся и на предыдущем витке) проецируется по магнитному полю на E-область широты тайфуна Harry. Локальное повышение плотности плазмы в верхней ионосфере обнаруживается при интенсификации многих тропических циклонов, например, 24.09.1992 г. в половине из цепочки в 10 тайфунов I-III категорий [16].

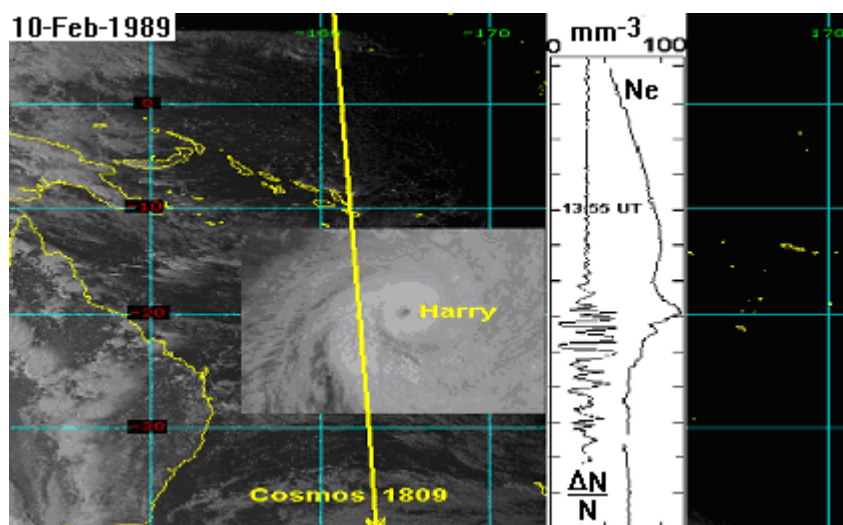


Рис. 3. Формирование пика плотности плазмы в зените над «глазом» тайфуна Harry

Флуктуации плотности N_e на рис.3 аналогичны представленным на рис. 1 и 2. Чтобы разобраться с физикой происходящих процессов были привлечены данные активных экспериментов в космосе, полученные со спутника Космос-1809.

В работе [17] авторами было показано, что наблюдается корреляция между исчезновением bubbles и работой нагревного стенда Сура. В таблице 1 приведены даты, режимы работы стенда Сура и рабочие витки спутника Космос-1809.

Таблица 1. Режимы работы стенда Сура под витки спутника Космос-1809, звездочками отмечены витки, проходящие в южном полушарии.

№	Дата	Время, UT	f, кГц	P, МВт	Режим	Fкр	ΣКр	Виток
1	21.2.91	17:50-18:00	5828	165	непр мод.850 непр 850 Гц непр 850 Гц	7,0	17	21092*
		18:00-18:10						21093
		18:20-18:30						21093*
		20:04-20:14						21094
		20:14-20:24						150
2	20.05.93	15:27-15:46	5828	150	140 Гц, изл.5, пауз. 2 мин 140 Гц, 4-2-4-2-4-2-4 мин 140 Гц, 5-2-5-2-5 мин 140 Гц, 4-2-4-2-4-2-4 мин			32411*
		15:56-16:18						32412
		17:08-17:27						32412*
		17:37-17:59						32413
3	21.05.93	15:43-16:02	5828	150	140 Гц, изл.5, пауз.2 мин 140 Гц, 4-2-4-2-4-2-4 мин 140 Гц, 4-2-4-2-4-2-4 мин			32425*
		16:12-16:34						32426
		17:57-18:19						32427

На рис. 4 представлены измерения плотности электронов на пяти последовательных витках спутника Космос-1809 21.02.1991 г. в период высокой солнечной активности ($F_{10.7} \sim 300$). Звездочками отмечены положение стэнда Сура и его магнитосопряженная точка в южном полушарии. Траектории витков проходили за вечерним терминатором. До включения стэнда Сура (виток 21091) в экваториальной ионосфере наблюдалось интенсивное формирование bubbles. Работа стэнда сура на витках 21092 и 21093 привела к подавлению bubbles на $L = 1.1 - 1.27$. После выключения стэнда формирование bubbles на витках 21094, 21095 восстановилось. Следует отметить, что развитие тропического циклона II категории Debra привело к увеличению плотности плазмы в ионосфере прилегающего региона (виток 21092).

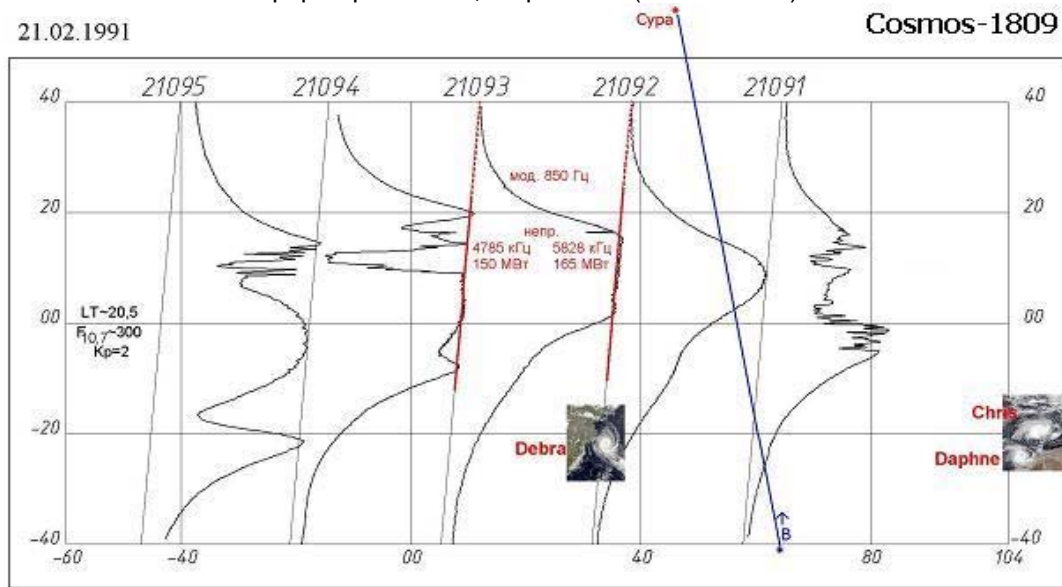


Рис. 4. Подавление развития bubbles на $1.1 < L < 1.27$ при работе стэнда Сура

Аналогичные результаты были получены 18.02.1991 г., но там рабочий виток 21051 пересекал плоскость магнитного меридиана Суры, и за ним bubbles были развиты [17,21].

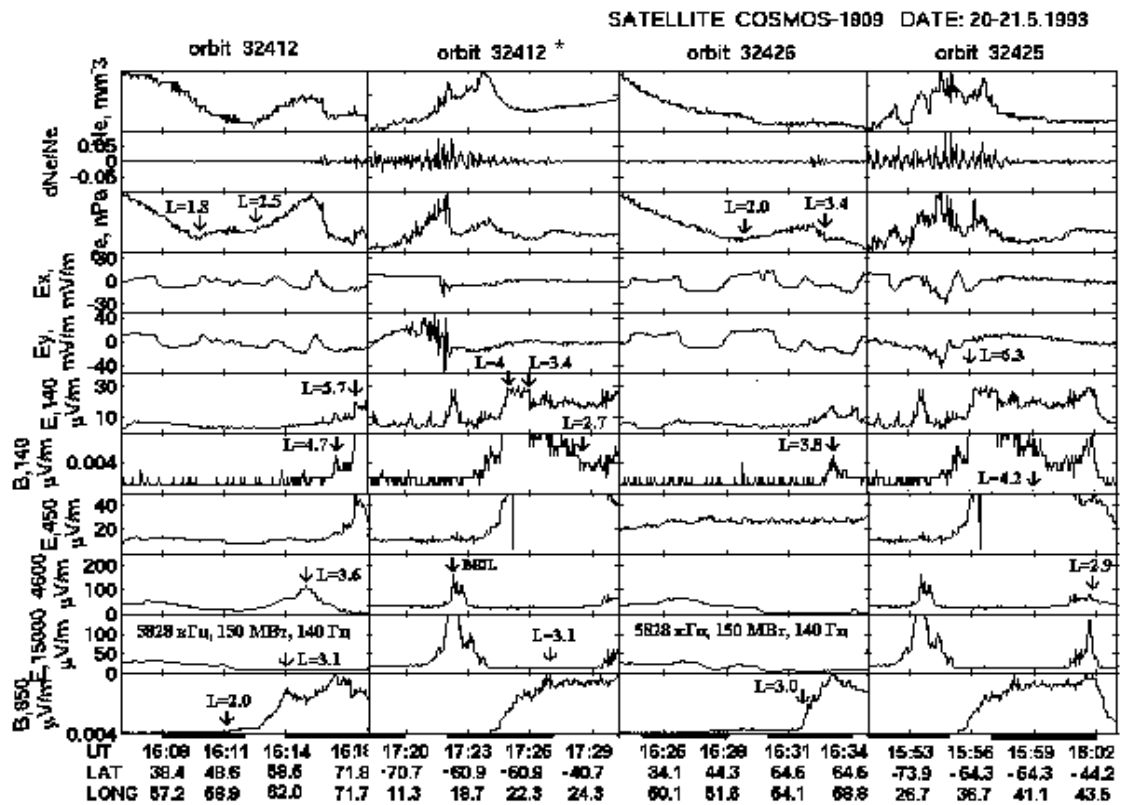


Рис. 5. Влияние работы стэнда Сура на полярную ионосферу. Внизу рисунка интервалы работы стэнда отмечены жирными линиями

Совместные работы стенда Сура и ИСЗ Космос-1809 проводились в 1991-1993 гг. Первые результаты были представлены в работе [22]. Наиболее отчетливо эффекты воздействия высокочастотного излучения (ВЧ) стенда Сура на полярную ионосферу проявлялись в дневных условиях при слабой солнечной активности, когда ВЧ излучение дополнительно модулировалось частотами, которые регистрировались каналами ОНЧ комплекса спутника Космос-1809. Несколько таких регистраций показаны на рис. 5, активность Солнца была $F_{10.7} \sim 100$, а частота модуляции составляла 140 Гц.

В приведенных данных можно выделить несколько механизмов воздействия мощного модулированного ВЧ излучения на плазму ионосферы:

- генерация электромагнитной волны на частоте модуляции, что проявляется в канале 140 Гц (витки в южном полушарии 32412* и 32425). Данное излучение охватывает область западнее стенда Сура ($L = 2,7$) до полярного овала ($L \sim 6$) и исчезает при выключении стенда;
- возбуждение перемещающихся ионосферных возмущений небольшой интенсивности восточнее магнитного меридиана Суры на $L = 1,8 - 2,7$ и значительно большей интенсивности на $L = 2,7 - 4$ (виток 32412 и 32426). Данные результаты согласуются с отдельными выводами работ [18,23,24].

В более сложном случае, когда ВЧ излучение стенда Сура действует на неустойчивую плазму вблизи терминатора при высокой солнечной активности возможно подавление длинноволновых колебаний Релея-Тейлора, что приводит к прекращению роста bubbles. Этот механизм и анализ динамики плазмы ионосферы над тропическими циклонами требует дальнейших исследований.

Выводы

1. Влияние мощных тропических циклонов необходимо учитывать в модели IRI.
2. Возникновение урагана в Атлантике, вероятно, можно прогнозировать за ~10 дней по аномальным характеристикам верхней ионосферы над зарождающейся тропической волной.
3. Показано, что за 1-2 дня до формирования в Атлантике тропической депрессии в верхней ионосфере наблюдается депрессия плотности плазмы со структурами подобными солитонам.
4. Развитие неустойчивости Релея-Тейлора, приводящей к формированию bubbles в ионосфере за терминатором, локально подавляется как при интенсификации ураганов, так и при мощном ВЧ излучении нагревного стенда Сура.

Авторы благодарят профессоров П. Гецова, В. Д. Кузнецова и Ю. Я. Ружина за поддержку работы.

Литература:

1. Stanev, G., M. Petrunova, D. Teodosiev, I. Kutiev, K. Serafimov, S. Chapkunov, V. Chmyrev, N. Isaev, P. Puschakov, I. Pimenov. An instrument for DC electric field and AG-electric and magnetic field measurements aboard "Intercosmos-Bulgaria-1300" satellite // Adv. Space Res. Vol.2. No 7, pp. 43-47. 1983.
2. Афанасьев, Ю. В., С. В. Биличенко, Ю. Н. Бобков, Г. А. Внучков, П. П. Пущаев, В. М. Чмырев. Измерение вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот 0,1-8 Гц на спутнике «Интеркосмос-Болгария-1300» // Научная аппаратура. Т. 2. № 2. С. 15-27. 1987.
3. Аршинков, И. С., А. В. Бочиев, Н. С. Абаджиев, К. И. Аршинова, В. Н. Велев, Е. Г. Захариева, Ю. Б. Мандил, Ш. Ш. Долгинов, Л. Н. Жузгов, В. П. Косачева, Л. В. Струнникова, Л. О. Тюрмина, В. А. Шарова, С. И. Школьников. Первые результаты измерений магнитного поля на спутнике "Интеркосмос-Болгария-1300" // Космические исследования. Т. 21. Вып. 5. С. 710-717. 1983.
4. Исаев, Н. В., Е. П. Трушкина, Н. К. Осипов. Эмпирические модели электрического поля в высокоширотной ионосфере // Препринт № 51 (936). М.: ИЗМИРАН. С. 40. 1990.
5. Исаев, Н. В., Н. К. Осипов, Г. Станев, Е. П. Трушкина. Электрическое поле в высокоширотной ионосфере при больших положительных величинах B_z – компонент межпланетного магнитного поля (ММП) по данным измерений на ИСЗ «ИК-Болгария-1300» // Bulgarian Geophysical Journal. Vol. 27. No. 1, pp. 29-36, 1991.
6. Станев, Г. А. Структура квазипостоянного электрического поля в высокоширотной ионосфере (результаты эксперимента на ИСЗ «Интеркосмос-Болгария-1300» и модель) // Кандидатская диссертация. ИЗМИРАН. 1991.
7. Isaev, N. V., G. L. Gdalevich, N. P. Benkova, V. Gubsky, E. P. Trushkina, E. F. Kozlov, N. I. Samorokin, G. Stanev, D. Teodosiev, T. Samardjiev. Auroral electric field penetration into the middle-latitude trough // Adv. Space Res. Vol. 7. No. 8, pp. 59-65, 1987.

8. Гдалевич, Г., Н. Исаев, В. Губский, Е. Трушкина, Г. Станев. Влияние электрического поля на структуру главного ионосферного провала // *Космические исследования*. Т. 28. Вып. 2. С. 235-242. 1990.
9. Бочев, А., Н. Дачев, Л. Н. Жузгов, В. И. Лазарев, М. В. Тельцов, С. И. Школьникова. Высокоширотные исследования потоков заряженных частиц и продольных токов на ионосферной станции "Интеркосмос-Болгария-1300" // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 24. № 6. С. 948-955. 1984.
10. Isaev, N. V., A. G. Yachnin, S. V. Bilichenko, V. I. Lazarev, G. A. Stanev, D. K. Teodossiev, N. Petkov, E. E. Timofeev, V. M. Chmyrev. A comparison of satellite measurements of electric and magnetic fields and particle fluxes with ground-based data // *Adv. Space Res.* Vol. 3. No. 5, pp.101-107, 1985.
11. Исаев, Н. В., А. Г. Яхнин, С. В. Биличенко, В. М. Чмырев, Г. Станев, Р. Пеллинен, Д. Теодосиев, Т. Н. Колосова, М. В. Тельцов, В. И. Лазарев, Е. Е. Тимофеев, Н. Петков, Е. П. Трушкина, С. И. Школьникова. Сопоставление спутниковых измерений электрических и магнитных полей и потоков частиц с наземными геофизическими данными в раннем утреннем секторе авроральной зоны // *Космические исследования*. Т. 25. № 1. С. 74-85. 1987.
12. Тимофеев, У. У., А. Г. Яхнин, Н. В. Исаев, Е. П. Трушкина, Г. А. Станев, Р. И. Пеллинен. Пространственные профили электрического поля и электронной концентрации в области регистрации аврорального рассеяния радиоволн // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 28. № 5. С. 871-874. 1988.
13. Чмырев, В. М., С. В. Биличенко, Ю. Б. Казанская, В. М. Костин, В. И. Лазарев, М. В. Тельцов. Авроральные частицы, связанные с нелинейными альвеновскими волнами // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 26. № 2. С. 275-281. 1986.
14. Беляев, Г., В. Костин, Е. Трушкина, О. Овчаренко, Б. Бойчев, Н. Банков. Взаимодействие косых альвеновских волн с ионосферой по данным спутника Интеркосмос-Болгария-1300 // *Proceedings SENS 2009*. Sofia, Bulgaria, pp.13-19, 2010.
15. Isaev, N. V., V. M. Kostin, G. G. Belyaev, O. Ya. Ovcharenko, and E. P. Trushkina. Disturbances of the Topside Ionosphere Caused by Typhoons // *Geomagn. Aeron.* Vol. 50, No. 2, pp. 243-254, 2010.
16. Беляев, Г., В. Костин, Е. Трушкина, О. Овчаренко, Б. Бойчев. Вариации параметров ионосферы при формировании и развитии тайфунов // *Proceedings SES 2010*, Sofia, Bulgaria, pp. 83-90. 2011.
17. Belyaev, G., N. Bankov, B. Boychev, V. Kostin, E. Trushkina, O. Ovcharenko. Observation of Plasma Oscillating Structures in External Ionosphere over Cyclones // *SunGeo*. Vol. 7, No. 1, pp. 51-55, 2012.
18. Ружин, Ю. Я., В. Д. Кузнецов, В. И., Ковалев, И. Н. Бершадская, Г. Ф. Карабаджак, Ю. А. Пластинин, В. Л. Фролов, Г. П. Комраков, М. Паро. О возможности локализации суббури нагревным стендом «Сура» // *Изв. вузов. Радиофизика*. Т. 55, № 1. С. 94-105. 2012.
19. Гальпер, А. М., В. М. Грачев, В. В. Дмитриенко, В. Г. Кирилов-Угрюмов, С. Е. Урин. Новая компонента внутреннего радиационного пояса Земли – электроны высоких энергий // *Письма ЖЭТФ*. Т. 38, № 8. С. 409-411. 1983.
20. <http://www.nhc.noaa.gov/climo/>; www.usno.navy.mil.
21. Костин, В. М., Г. Г. Беляев, Е. П. Трушкина, О. Я. Овчаренко. Аномальные квазипериодические структуры в верхней ионосфере, наблюдавшиеся с ИСЗ Космос-1809 при работе стенда Сура // *Сб. докладов VII конференции ОФН РАН «Физика плазмы в солнечной системе»*. ИКИ РАН, 6-10 февраля 2012, С. 71. <http://plasma2012.cosmos.ru/presentations?page=1> (Kostin2012_0.ppt).
22. Kostin, V. M., Yu. A. Romanovskii, V. M. Chmyrev, V. M. Sinelnikov, V. V. Afonin, N. D. Borisov, N. V. Isaev, G. P. Komrakov, O. Ya. Ovcharenko, Ya. P. Sobolev, and E. P. Trushkina, Satellite Investigations of Disturbances of the Outer Ionosphere Due to Modification of the Ionospheric F-Region by High-Power HF Radio Waves, *Cosmic Research. Engl. Transl.*, Vol. 31, No. 1, pp.67-73, 1993.
23. Черногор, Л. Ф., В. Л. Фролов. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // *Изв. вузов. Радиофизика*. Т. 55, № 1. С. 14-35. 2012
24. Sorokin, V. M., O. A. Pokhotelov. The Effect of Wind on the Gravity Wave Propagation in the Earth's Ionosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* Vol. 72, No. 2-3, pp. 213-218, 2010.