

УДК 550.388

ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЛН ДИФфуЗНОГО СВЕЧЕНИЯ В 23-ЕМ ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2012 г. Д. Г. Баишев¹, Е. С. Баркова¹, К. Юмото²

¹Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН

²Space Environment Research Center, Kyushu University, Fukuoka, Japan

e-mail: baishev@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 17.05.2010 г.

После доработки 20.06.2011 г.

Выполнен статистический анализ наблюдений крупномасштабных волн диффузного свечения в течение 23-го цикла солнечной активности. Анализ проведен по оптическим данным двух станций — Тикси (71.6°N, 128.9°E) и Жиганск (66.8°N, 123.4°E). Всего было зарегистрировано 54 события, из них 43 события — в Тикси и 11 событий — в Жиганске. Приведен полный перечень наблюдаемых событий. Отмечена тенденция увеличения частоты появления диффузных волн в вечернем секторе (17–23 LT) на фазе роста (1999 г.) и спада (2003–2005 гг.) солнечной активности. Показано, что крупномасштабные волны диффузного свечения могут генерироваться как на экваториальной границе зоны диффузных сияний, так и внутри диффузной зоны, и не только во время развития магнитных бурь.

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые крупномасштабные волны диффузного свечения на экваториальной границе диффузных сияний были зарегистрированы на спутнике DMSP в вечернем секторе вблизи максимума развития кольцевого тока [Lui et al., 1982]. Волны представляли собой “языки” диффузного свечения, вытянутые к экватору от экваториальной границы диффузных сияний, с амплитудой 40–400 км и длиной волны ~200–900 км. С тех пор это явление привлекает внимание исследователей. Получен ряд результатов, свидетельствующих о связи волнообразных структур с геомагнитными бурями [Lui et al., 1982; Kelley, 1986; Баишев и др., 1997; Baishev et al., 2000; Zhang et al., 2005; Baishev and Rich, 2006; Henderson et al., 2010], определены основные параметры волновых структур [Lui et al., 1982; Nishitani et al., 1994; Баишев и др., 1997; Baishev et al., 2000; Zhang et al., 2005; Баишев и др., 2010; Henderson et al., 2010] и предложены механизмы, объясняющие это редкое явление, например [Kelley, 1986; Yamamoto et al., 1993, 1994]. Nishitani et al. [1994] и Baishev et al. [2000] по наземным оптическим наблюдениям определили, что волны диффузного свечения на экваториальной границе диффузных сияний распространялись на запад со скоростью $V \sim 0.6–0.7$ км/с.

Большинство работ, посвященных изучению крупномасштабных волн свечения, основаны на единичных спутниковых измерениях [Lui et al., 1982; Kelley, 1986; Yamamoto et al., 1993; 1994;

Zhang et al., 2005; Baishev and Rich, 2006; Henderson et al., 2010]. За редким исключением [Баишев и др., 2010], нет работ, выполненных по одновременным спутниковым и наземным наблюдениям. И, наконец, полностью отсутствуют статистические исследования наблюдений крупномасштабных волн в течение длительного времени. Нам удалось восполнить этот пробел. Начиная с 1994–1995 гг., на двух станциях 190° ММ меридиана (Тикси и Жиганск) телевизионными камерами всего неба непрерывно ведутся оптические наблюдения полярных сияний. Накоплен большой наблюдательный материал.

В этой статье мы представили полный список крупномасштабных волн диффузного свечения, зарегистрированных в течение 23 цикла солнечной активности и первые результаты статистического анализа.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Для анализа использованы данные телевизионных наблюдений, начиная с марта 1994 г. в Тикси (71.6°N, 128.9°E) и с ноября 1995 г. в Жиганске (66.8°N, 123.4°E). Регистрация сияний проводилась в безлунные периоды. Описание ТВ камеры всего неба с временным разрешением ~4 с приведено в работе [Shiokawa et al., 1996].

В таблице дан перечень всех крупномасштабных волн диффузного свечения, зарегистрированных с марта 1994 по март 2008 года.

Список крупномасштабных волн диффузного свечения по данным ТВ камеры всего неба в Тикси (март 1994 г.– март 2008 г.) и Жиганск (ноябрь 1995 г.–март 2008 г.)

| №№ | Дата | Время наблюдения, УТ | Станция наблюдения | Кол-во волн | Прозрачность ¹ | Положение ² | Kp | Dst | Примечание |
|-----|------------|----------------------|--------------------|-------------|---------------------------|------------------------|----------------|-------|---------------------------------|
| 1. | 29.10.1994 | 0859–0914 | TIX | 4 | 1 | ? | 6 ₀ | –39 | главная фаза бури |
| 2. | 14.01.1996 | 1055–1105 | ZGN | 2 | 1 | E | 5 ₀ | –34 | фаза восстановления бури |
| 3. | | 1302–1314 | ZGN | 2 | 1 | E | 4 ₊ | –45 | |
| 4. | 11.02.1996 | 1044–1110 | TIX | 5 | 2 | E | 4 ₊ | –39 | |
| 5. | 14.11.1996 | 1118–1135 | ZGN | 2 | 1 | E | 3 ₊ | –47 | |
| 6. | 01.03.1997 | 1055–1126 | TIX | 7 | 2 | ? | 2 ₀ | –33 | фаза восстановления бури |
| 7. | 02.03.1997 | 1214–1240 | TIX | 6 | 1 | D | 2 ₀ | –24 | фаза восстановления бури (?) |
| 8. | 24.10.1997 | 1010–1020 | TIX | 2 | 1 | D | 4 ₊ | –34 | главная фаза слабой бури |
| 9. | 22.11.1997 | 1118–1141 | ZGN | 5 | 2 | D | 5 ₊ | –22 | главная фаза бури |
| 10. | 18.02.1998 | 1213–1226 | TIX | 5 | 1 | D | 3 ₀ | –38 | фаза восстановления бури |
| 11. | 22.02.1998 | 1127–1221 | TIX | 14 | 2/3 | E | 2 ₊ | –7 | |
| 12. | 20.03.1998 | 1334–1348 | TIX | 6 | 1 | E | 2 ₀ | –11 | |
| 13. | 09.11.1998 | 0957–1032 | ZGN | 5 | 1 | E | 6 ₊ | –115 | главная фаза бури |
| 14. | 23.11.1998 | 1235–1255 | TIX | 2 | 2 | E | 3 ₀ | –1 | |
| 15. | 11.12.1998 | 1240–1250 | ZGN | 4 | 3 | E | 4 ₀ | –65 | главная фаза бури |
| 16. | 08.01.1999 | 1209–1240 | TIX | 12 | 1 | D | 3 ₀ | –1 | |
| 17. | 14.01.1999 | 0923–1100 | ZGN | 16 | 1 | E | 5 ₊ | –84 | фаза восстановления бури |
| 18. | 09.03.1999 | 1125–1227 | ZGN | 18 | 2 | D | 3 ₊ | –29 | |
| 19. | 01.11.1999 | 1135–1211 | TIX | 13 | 1 | E | 4 _– | –19 | |
| 20. | 08.11.1999 | 0917–1030 | TIX | 14 | 2 | D | 4 _– | –42 | главная фаза бури |
| 21. | 13.12.1999 | 1100–1117 | ZGN | 3 | 1 | E | 4 ₀ | –62 | фаза восстановления бури |
| 22. | 03.12.2000 | 1035–1115 | TIX | 7 | 1/2 | E | 2 ₀ | –4 | |
| 23. | 23.12.2000 | 0800–0918 | TIX | 17 | 2 | E | 4 ₀ | –49 | фаза восстановления слабой бури |
| 24. | 20.02.2001 | 1025–1039 | TIX | 3 | 1 | D | 1 ₊ | –2 | |
| 25. | | 1208–1216 | TIX | 1 | 1 | E | 2 _– | –7 | |
| 26. | | 1241–1333 | TIX | 12 | 1 | E | 2 _– | –6 | |
| 27. | 21.02.2001 | 1056–1112 | TIX | 2 | 1 | E | 2 _– | –8 | |
| 28. | | 1200–1222 | TIX | 3 | 1 | E | 2 ₀ | 0 | |
| 29. | 23.01.2002 | 1221–1337 | TIX | 12 | 1 | E | 2 _– | –7 | |
| 30. | 30.11.2002 | 1039–1052 | TIX | 5 | 2 | E | 3 ₀ | –31 | |
| 31. | 26.12.2002 | 0950–1004 | TIX | 5 | 2 | E | 3 ₀ | –30 | |
| 32. | | 1134–1210 | ZGN | 6 | 3 | D | 3 ₀ | –43 | |
| 33. | 27.12.2002 | 0833–0852 | TIX | 6 | 2 | D | 5 _– | –62 | главная фаза бури |
| 34. | 07.02.2003 | 1200–1215 | TIX | 6 | 2 | E | 3 ₊ | –35 | |
| 35. | 03.03.2003 | 1053–1148 | TIX | 11 | 1 | E | 2 ₀ | –16 | |
| 36. | 07.03.2003 | 1107–1130 | TIX | 7 | 1 | E | 3 ₊ | –31 | |
| 37. | | 1142–1200 | TIX | 3 | 1 | E | 3 ₊ | –31 | |
| 38. | | 1254–1330 | TIX | 7 | 1 | E | 2 ₊ | –28 | |
| 39. | 21.12.2003 | 1031–1228 | TIX | 24 | 3 | E | 3 ₊ | –17 | |
| 40. | 19.01.2004 | 1251–1303 | TIX | 4 | 1 | E | 4 _– | –12 | |
| 41. | 11.02.2004 | 1044–1049 | TIX | 1 | 2 | D | 3 ₀ | –2 | начальная фаза бури |
| 42. | | 1106–1120 | TIX | 4 | 2 | D | 3 ₀ | –11 | главная фаза бури |
| 43. | | 1325–1335 | ZGN | 3 | 1 | D | 5 _– | –40 | |
| 44. | 25.10.2004 | 1049–1120 | TIX | 6 | 1 | E | 3 ₊ | –16 | |

Таблица. Окончание

| №№ | Дата | Время наблюдения, UT | Станция наблюдения | Кол-во волн | Прозрачность ¹ | Положение ² | Kp | Dst | Примечание |
|-----|------------|----------------------|--------------------|-------------|---------------------------|------------------------|----------------|-------|----------------------------|
| 45. | 17.11.2004 | 0919–0928 | TIX | 3 | 1 | E | 3 ₀ | –49 | главная фаза слабой бури |
| 46. | | 1119–1155 | TIX | 7 | 1 | E | 2 ₊ | –54 | |
| 47. | 12.12.2004 | 0912–1000 | TIX | 8 | 2 | D | 4 ₀ | –38 | |
| 48. | 12.01.2005 | 1208–1217 | TIX | 6 | 1 | D | 5 _– | –48 | главная фаза слабой бури |
| 49. | 09.02.2005 | 0937–0950 | TIX | 4 | 2 | D | 4 ₀ | –39 | |
| 50. | 16.02.2005 | 1143–1222 | TIX | 15 | 2 | E | 3 ₊ | 1 | начальная фаза слабой бури |
| 51. | 25.12.2005 | 0948–1205 | TIX | 23 | 1 | E | 2 _– | –14 | |
| 52. | 28.10.2006 | 1023–1038 | TIX | 5 | 1 | E | 3 _– | –10 | |
| 53. | 15.01.2007 | 0950–1043 | TIX | 6 | 1 | D | 3 ₀ | 1 | |
| 54. | 10.12.2007 | 1220–1349 | TIX | 14 | 1 | E | 2 ₀ | –3 | |

¹Классификация прозрачности:

1 – прозрачность хорошая (видно много звезд);

2 – прозрачность удовлетворительная (видны только яркие звезды);

3 – прозрачность плохая (звезд не видно).

²Местоположение крупномасштабных волн свечения:

E – на экваториальной границе зоны диффузных сияний;

D – внутри зоны диффузных сияний;

? – местоположение не определено.

За анализируемый период было зарегистрировано 54 события (в Тикси – 43, в Жиганске – 11), в которых наблюдалось 393 волны диффузного свечения. Из них 22 события было зарегистрировано в течение магнитных бурь, а 32 события – в отсутствие бурь, т.е. соотношение волновых событий во время магнитных бурь и без бурь равно 2 : 3. Следует отметить, что в Жиганске диффузные волны в основном (8 событий) наблюдались во время магнитных бурь или при $Kp > 3$ (3 события).

Из 54 событий в 35 событиях волны генерировались на экваториальной границе диффузной зоны, а в 17 – внутри диффузной зоны. В 2 событиях местоположение волн визуально не удалось определить. Во время магнитных бурь соотношение событий, зарегистрированных на экваториальной границе диффузных сияний и внутри диффузной зоны, составило 1 : 1 (10 : 10), а в отсутствие магнитных бурь это соотношение примерно равно 3 : 1 (25 : 7).

Волны наблюдались преимущественно в 09–13 UT (18–22 LT). Продолжительность событий составляла от нескольких минут до более двух часов.

На рисунке 1 сверху вниз приведено число солнечных пятен, усредненное за месяц (тонкая линия) и за год (жирная линия) (а), гистограммы частоты появления диффузных волн (б) и общего количества дней работы телевизионной камеры в Тикси (заштрихованный прямоугольник) и Жиганске (светлый прямоугольник) (в) в

течение 23-го цикла солнечной активности. Данные о числах солнечных пятен взяты из сайта ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNS_POT_NUMBERS/.

Поскольку каждый год регистрация проводилась в периоды январь–март и октябрь–декабрь, то мы брали суммарное количество дней в эти два периода. Частота появления диффузных волн определялась как отношение числа событий к общему количеству дней наблюдения. На рисунке 1б гистограммы показывают частоту появления волновых событий по сезонам, а сплошной линией – по годам. Малое количество данных не позволяет выявить статистически значимые закономерности, но можно отметить небольшой рост частоты появления волн на фазе роста (1999 г.) и спада (2003–2005 гг.) солнечной активности.

На рисунке 2 показана гистограмма числа волновых событий в зависимости от их продолжительности (слева) и от количества зарегистрированных волн (справа). Видно, что в основном волновые события продолжаются менее ~40 минут и чаще всего наблюдается ~1–8 диффузных волн, что согласуются с результатами, полученными в работах [Lui et al., 1982; Nishitani et al., 1994; Henderson et al., 2010]. Например, анализ последовательных спутниковых снимков [Lui et al., 1982] свидетельствует, что длительность волновых событий составляла 0.5–3.5 часа. Nishitani et al. [1994] по наземным данным показал, что 4 диффузных волны были зарегистрированы

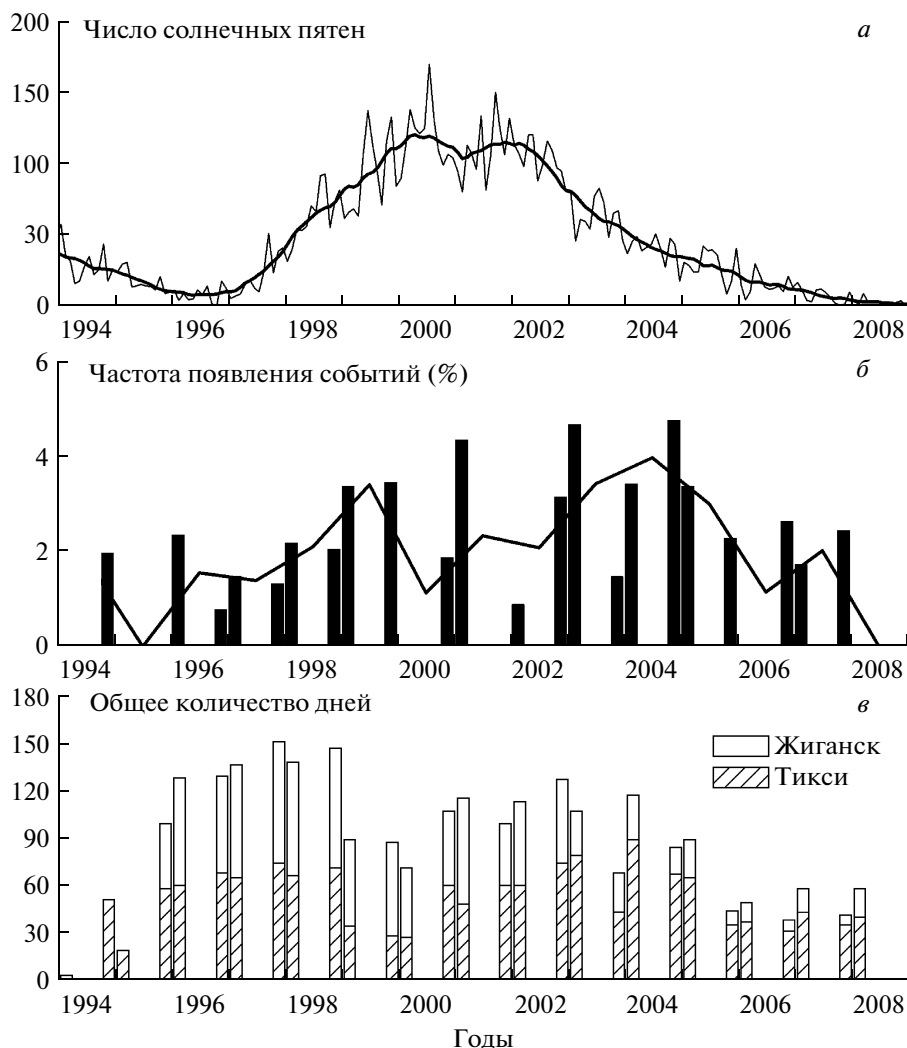


Рис. 1. Сверху вниз: число солнечных пятен, усредненное за месяц (тонкая линия) и за год (жирная линия) (а), гистограммы частоты появления диффузных волн (б) и общего количества дней работы телевизионной камеры в Тикси (заштрихованный прямоугольник) и Жиганске (светлый прямоугольник) (в) в течение 23 цикла солнечной активности.

в течение ~22 мин, а 4 гигантские волны, приведенные в работе [Henderson et al., 2010] по данным спутника IMAGE, существовали в течение ~2 часов.

Согласно работам [Lui et al., 1982; Zhang et al., 2005, Henderson et al., 2010], выполненным по спутниковым данным, волны свечения были зарегистрированы на экваториальной границе зоны диффузных сияний. В работе Баишев и др. [2010] описан случай наблюдения волн диффузного свечения внутри диффузной зоны. В настоящей работе на статистическом материале, полученном в течение 23-го цикла, мы подтвердили, что волны свечения действительно могут генерироваться внутри диффузной зоны. Из 54 волновых событий 17 были зарегистрированы внутри диффузной зоны.

На рисунке 3 приведен пример синхронной регистрации диффузных волн, наблюдающихся

внутри диффузной зоны, на спутнике DMSP F14 и ТВ камерой всего неба в Жиганске 09.03.1999 г. Магнитная активность была умеренной ($Kp = 4+$). На рисунке 3а показан снимок со спутника DMSP F14, полученный во временном интервале 12.19.41–12.32.25 UT. Окружностью обозначено поле обзора ТВ камеры в Жиганске с радиусом 400 км. На рисунке 3б схематически изображены диффузные волны, наблюдающиеся в поле обзора ТВ камеры (рис. 1а). Для сравнения со спутниковыми наблюдениями на рис. 3в, г, д приведены ТВ кадры в 12.22, 12.23 и 12.24 UT, соответственно, когда спутник пролетал вблизи Жиганска. На ТВ кадрах вблизи зенита станции Жиганска видны 4 волны диффузного свечения (обозначены цифрами 1–4). На южном крае небосвода отчетливо прослеживается экваториальная граница диффузных сияний, а на северном горизонте —

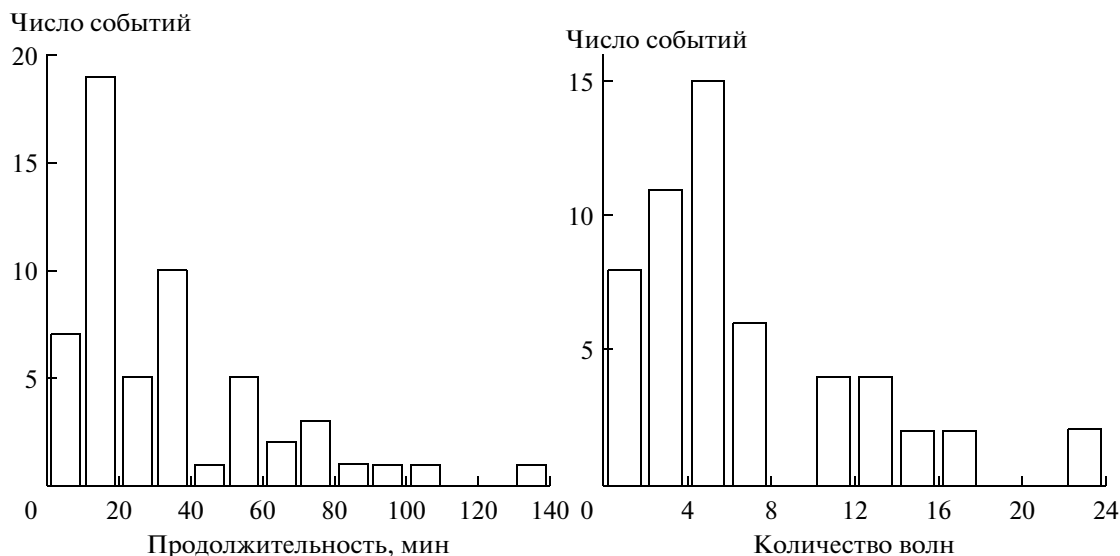


Рис. 2. Гистограмма числа волновых событий в зависимости от их продолжительности (слева) и от количества зарегистрированных волн (справа).

дискретная дуга. Таким образом, по оптическим и спутниковым данным мы отождествили три больших волны диффузного свечения (цифры 1, 2, 4) с амплитудой ~90–100 км и длиной волны ~150–200 км. Третью волну с амплитудой ~70 км и длиной волны ~90 км можно отождествить только на ТВ кадрах. По данным ТВ камеры (рис. 3в, г, д) оценено, что волны распространялись на запад со скоростью ~1 км/с.

Чтобы выяснить отличия в пространственных масштабах волновых структур, наблюдающихся внутри диффузной зоны, в каждом из 17 событий была выбрана наиболее отчетливая волна диффузного свечения и для нее была определена длина и амплитуда волны. На рисунке 4 показаны результаты вычисления пространственных параметров диффузных волн — длины волны и ее амплитуды. Проекция ТВ кадров на земную поверхность вычислялась с учетом высоты сияний на уровне 110 км. Погрешность измерения составила ~10 км.

Видно, что амплитуда волновых структур изменялась в пределах ~50–150 км, а длина волны — от 100 до 300 км, т.е. пространственные параметры волн, генерирующихся внутри диффузной зоны, в несколько раз меньше чем для волн, зарегистрированных на экваториальной границе зоны диффузных сияний [Lui et al., 1982; Baishev et al., 2000; Zhang et al., 2005, Henderson et al., 2010].

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Почти за 15-летний период оптических измерений в Тикси и Жиганске было зарегистрировано всего 54 волновых событий. Даже, если при-

нять во внимание погодные условия и отсутствие наблюдений по техническим причинам, можно заключить, что диффузные волны — это достаточно редкое явление. Малый набор событий не позволил выявить статистически значимых закономерностей о связи частоты появления диффузных волн с циклом солнечной активности. Можно говорить лишь о небольшом повышении частоты появления волн на фазе роста (1999 г.) и спада (2003–2005 гг.) солнечной активности. Если повышение частоты появлений диффузных волн на фазе спада солнечной активности можно связать с известным фактом повышения геомагнитной активности, запаздывающего на 2–3 года относительно максимума солнечной активности (см., например, Fig. 1d из работы [Baishev et al., 2010]), то небольшой рост на фазе роста понять трудно. Можно лишь предположить, что генерация диффузных волн не всегда связана с магнитными бурями, а обусловлена какими-то внутримангнитосферными процессами. Отметим, что в 1999 г. 3 события наблюдались в период магнитной бури, а 3 события — в отсутствие магнитных бурь.

В ранее опубликованных работах [Lui et al., 1982; Nishitani et al., 1994; Баишев и др., 1997; Baishev et al., 2000; Zhang et al., 2005; Baishev and Rich, 2006; Henderson et al., 2010] волны диффузного свечения в вечернем секторе были зарегистрированы во время магнитных бурь. Только 2 события — 04.11.2000 г. при $Kp = 5$ [Henderson et al., 2010] и 12.12.2004 г. при $Kp = 4$ [Баишев и др., 2010], наблюдались в отсутствие магнитных бурь.

Наши результаты статистического исследования в течение 23-го цикла солнечной активности показали, что только 22 события было зарегистри-

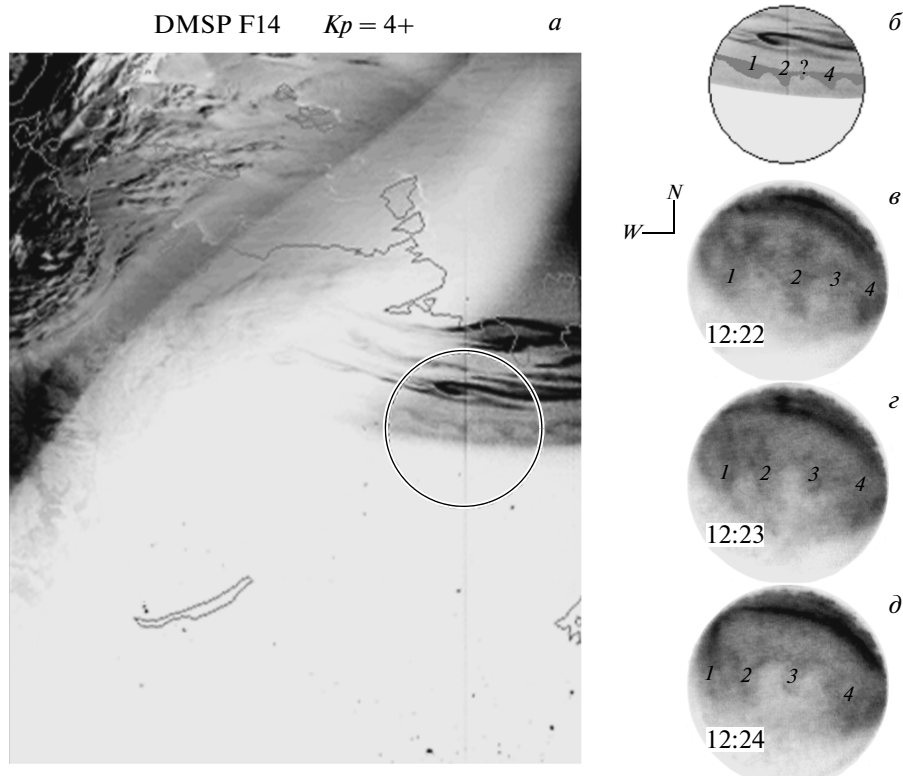


Рис. 3. Пример диффузных волн, синхронно зарегистрированных спутником DMSP F14 (*a, б*) и ТВ камерой всего неба в Жиганске (*в, г, д*) 09.03.1999 г. Снимок сияний, полученный во временном интервале 12.19.41–12.32.25 UT, и ТВ кадры в 12.22, 12.23 и 12.24 UT представлены в негативе. На ТВ кадрах север – вверх и запад – слева. Круг – поле обзора ТВ камеры в Жиганске с радиусом 400 км. 4 волны диффузного свечения обозначены цифрами 1–4.

стрировано в течение магнитных бурь, а 32 события – в отсутствие бурь (соотношение волновых событий составляет 2 : 3). Причина такого соотношения требует дальнейших исследований.

Наиболее вероятным механизмом генерации диффузных волн на экваториальной границе

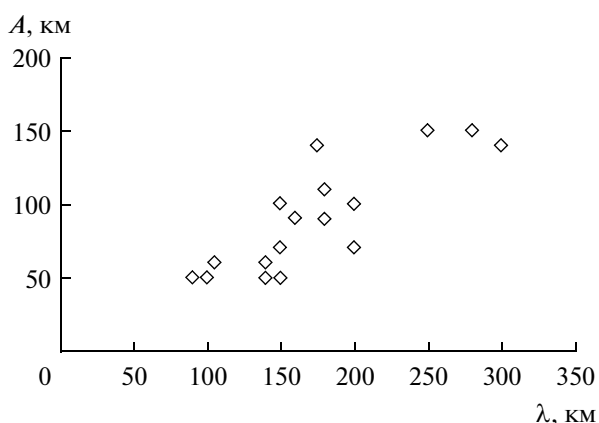


Рис. 4. Результаты вычисления длины волны и ее амплитуды для наиболее отчетливой волны диффузного свечения в каждом из 17 волновых событий, наблюдавшихся внутри диффузной зоны.

диффузных сияний является неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, возникающая при сильном сдвиговом течении плазмы вблизи плазмопаузы [Kelley, 1986]. В настоящее время сильные сдвиговые течения вблизи плазмопаузы связывают с формированием быстрых субавроральных потоков – SAPS [Foster and Burke, 2002]. В работе [Foster and Vo, 2002] проведено статистическое исследование субаврорального поляризационного потока по данным станции некогерентного рассеяния на Миллстоун-Хилл ($L \sim 3$) в течение 2 солнечных циклов (1979–2000 гг.). Получено, что максимальная скорость поляризационного потока, превышающая 1000 м/с, регистрировалась в интервале ~ 18 –21 MLT при $Kp = 6$. С уменьшением магнитной активности скорость поляризационного потока в вечерне-полуночном секторе также понижается, составляя ~ 400 м/с при $Kp = 2$.

В работе [Wang et al., 2008] события SAPS, определенные по измерениям на спутниках серии DMSP за 2002–2003 гг., были разделены на две группы – $Kp < 3$ (спокойные условия) и $Kp \geq 3$ (возмущенные условия). Хотя пролеты спутников DMSP были ограничены в пределах 15–22 MLT, охватывая наиболее вероятное положение субав-

рорального поляризованного потока [Foster and Vo, 2002], наибольшее количество событий SAPS регистрировалась в секторе ~ 19 – 20 MLT для обеих групп. Соотношение событий в зависимости от условий составило примерно 1 : 3.

В работе [Baishev et al., 2010] проведено такое же разбиение 54 волновых событий в зависимости от геомагнитной активности и показано, что большинство событий, как SAPS, регистрируемых на спутниках DMSP [Wang et al., 2008], так и диффузных волн, наблюдались при $Kp \geq 3$. Однако, было отмечено, что волновые события наблюдались при $Kp < 3$, что ранее в литературе не отмечалось. Кроме того, подобное поведение обоих явлений с максимумом в ~ 18 – 20 MLT позволяет предположить, что эти явления причинно связаны.

Исследование нескольких случаев крупномасштабных структур свечения на экваториальной границе диффузного протонного сияния были проведены по оптическим данным со спутника TIMED (Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics) в ультрафиолетовых длинах волн [Zhang et al., 2005]. Синхронные измерения со спутников DMSP в периоды регистрации волн диффузного свечения показали, что необходимыми условиями для генерации крупномасштабных структур свечения являются высокие дрейфовые скорости на запад (>1000 м/с) и их сильный градиент по широте (>0.1 с $^{-1}$), регистрируемые в пределах диффузного аврорального овала.

В работе [Баишев и др., 2010] впервые показано, что крупномасштабные волны внутри диффузной зоны наблюдались при выполнении условий, описанных в работе [Zhang et al., 2005] – высокая дрейфовая скорость $V_y \sim 850$ м/с и сильный градиент ~ 0.08 с $^{-1}$. Можно предположить, что для всех волновых событий, зарегистрированных внутри диффузной зоны, такие условия были выполнены. По нашим данным средняя скорость распространения диффузных волн на запад внутри диффузной зоны составила ~ 800 – 900 м/с. Малые масштабы волн внутри диффузной зоны (см. рис. 4) по сравнению волнами, наблюдаемыми на границе, возможно, обусловлены более узкой полосой сдвигового течения [Kelley, 1986].

4. ВЫВОДЫ

По данным оптических наблюдений в Тикси и Жиганске впервые приведен детальный перечень волн диффузного свечения, наблюдавшихся в течение 23-го цикла солнечной активности. За период с марта 1994 г. по март 2008 г. было зарегистрировано 54 события наблюдений волн свечения, из них в Тикси – 43, а в Жиганске – 11.

Из проведенного статистического анализа наблюдений крупномасштабных волн диффузного свечения можно отметить следующее:

1. Статистически значимых закономерностей связи генерации диффузных волн с циклом солнечной активности не обнаружено, но отмечается тенденция увеличения частоты появления диффузных волн в вечернем секторе (17–23 LT) на фазе роста (1999 г.) и спада (2003–2005 гг.) солнечной активности.

2. Волны диффузного свечения генерируются как во время магнитных бурь (22 события), так и в отсутствие магнитных бурь (32 события).

3. Статистически подтвержден ранее полученный Баишевым и др. (2010) результат о генерации волн диффузного свечения внутри диффузной зоны (17 событий).

Требуются дальнейший анализ данных, чтобы понять физические процессы, происходящие в магнитосферно-ионосферной системе, во время генерации диффузных волн свечения в отсутствии и во время магнитных бурь. Для решения этих задач необходимы одновременные наземные и спутниковые (например, проекты THEMIS, Cluster и др.) измерения.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИКФИА СО РАН, кто обслуживал и обслуживает оптическую аппаратуру на обсерватории Тикси и станции Жиганск. Данные спутника DMSP F14 получены из базы данных SPIDR (<http://spidr.ngdc.noaa.gov>). Работа поддержана грантами РФФИ №09-05-98501-р_восток_a, №09-05-98546-р_восток_a и частично Программой Президиума РАН №16 часть 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баишев Д.Г., Баркова Е.С., Степанов А.Е., Рич Ф., Юмото К. Электрические поля и крупномасштабные волны свечения в вечернем секторе диффузной авроральной зоны // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 50. № 1. С. 44–50. 2010.
- Баишев Д.Г., Юмото К., Соловьёв С.И., Молочушкин Н.Е., Баркова Е.С. Вариации геомагнитного поля во время появления крупномасштабных волн диффузного свечения в вечернем секторе в течение магнитной бури // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 37. № 6. С. 39–46. 1997.
- Baishev D.G., Barkova E.S., Fedorov A.A., Yumoto K. Optical observations of the eveningside undulations during solar cycle 23 // Proc. of the 8th Intern. Conf. “Problems of Geocosmos”. (St. Petersburg, September 20–24, 2010). Ed. by V.S. Semenov. SPb. P. 31–35. 2010.
- Baishev D.G., Barkova E.S., Solovyev S.I., Yumoto K., Engbreton M.J., Koustov A.V. Formation of large-scale, “giant” undulations at the equatorial boundary of diffuse aurora and Pc5 magnetic pulsations during the January 14, 1999 magnetic storm // Proc. of Fifth Intern. Conf. on Substorm. St. Petersburg, Russia. 16–20 May 2000. Netherlands, Noordwijk: ESA. P. 427–430. 2000.

- *Baishev D.G., Rich F.J.* Undulations observed by the DM-SP satellites during magnetic superstorms of November 2004 // Proc. of the Second Intern. Symp. “Solar Extreme Events”. Fundamental Science and Applied Aspects. Nor-Amberd, Armenia, 26–30 Sept. 2005. Yerevan: Alikhanyan Physics Institute. P. 100–103. 2006.
- *Foster J.C., Burke W.J.* SAPS: A new categorization for sub-auroral electric fields // Eos Trans. AGU. V. 83(36). P. 393–394. 10.1029/2002EO000289. 2002.
- *Foster J.C., Vo H.B.* Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream // J. Geophys. Res. V.107(A12). 1475. doi:10.1029/2002JA009409. 2002.
- *Henderson M.G., Donovan E.F., Foster J.C., Mann I.R., Immel T.J., Mende S.B., Sigwarth J.B.* Start-to-end global imaging of a sunward propagating, SAPS-associated giant undulation event // J. Geophys. Res. V. 115. doi:10.1029/2009JA014106. 2010.
- *Kelley M.C.* Intense sheared flow as the origin of large-scale undulations of the edge of the diffuse aurora // J. Geophys. Res. V. 91. P. 3225–3230. 1986.
- *Lui A.T.Y., Meng C.-I., Ismail S.* Large amplitude undulations on the equatorward boundary of the diffuse aurora // J. Geophys. Res. V. 87. P. 2385–2400. 1982.
- *Nishitani N., Hough G., Scourfield M.W.J.* Spatial and temporal characteristics of giant undulations // Geophys. Res. Lett. V. 21(24). P. 2673–2676. 1994.
- *Shiokawa K., Yumoto K., Tanaka Y. et al.* Auroral observations using automatic instruments: relations with multiple Pi2 magnetic pulsations // J. Geomag. Geoelectr. V. 48. P. 1407–1419. 1996.
- *Yamamoto T., Makita K., Meng C.-I.* A particle simulation of “giant” undulations on the evening diffuse auroral boundary // J. Geophys. Res. V. 98(A4). P. 5785–5800. 1993.
- *Yamamoto T., Ozaki M., Inoue S., Makita K., Meng C.-I.* Convective generation of “giant” undulations on the evening diffuse auroral boundary // J. Geophys. Res. V. 99(A10). P. 19499–19512. 1994.
- *Zhang Y., Paxton L.J., Morrison D., Lui A.T.Y., Kil H., Wolven B., Meng C.-I., Christensen A.B.* Undulations on the equatorward edge of the diffuse proton aurora: TIMED/GUVI observations // J. Geophys. Res. V. 110. A08211. doi:10.1029/2004JA010668. 2005.
- *Wang H., Ridley A.J., Lühr H., Liemohn M.W., Ma S.Y.* Statistical study of the subauroral polarization stream: Its dependence on the cross-polar cap potential and subauroral conductance // J. Geophys. Res. V. 113. A12311. doi:10.1029/2008JA013529. 2008.