

ДИНАМИКА МАГНИТОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫХ ТОКОВ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

М.А. Челпанов, Н.А. Золотухина

DYNAMICS OF MAGNETOSPHERE-IONOSPHERE CURRENTS DURING MIDLATITUDE IONOSPHERE DISTURBANCES

M.A. Chelpanov, N.A. Zolotukhina

Рассмотрены изменения индексов геомагнитной активности при положительных и отрицательных возмущениях F2-слоя ионосферы над Иркутском. Получено, что начинающиеся в секторе 23–09 MLT положительные ионосферные возмущения развиваются на фоне квазипериодических усилений авроральных электроджетов, а отрицательные – на фоне иррегулярных изменений их интенсивности. В среднем отрицательные ионосферные возмущения наблюдаются при меньших значениях D_{st} -индекса, чем положительные.

Variations of geomagnetic activity indices accompanied by positive and negative ionosphere F2 layer disturbances above Irkutsk are analyzed. It is revealed that starting within 23–09 MLT positive ionosphere disturbances occur on a background of quasi-periodic auroral electrojet enhancements; negative ionosphere disturbances, on a background of irregular changes in intensity of the electrojets. On average, negative midlatitude ionosphere disturbances occur at lower D_{st} values than positive disturbances.

Цель исследования

Состояние ионосферы описывают набором параметров, один из которых – критическая частота F2-слоя (f_oF2) – часто используется для изучения ее изменчивости. По разности между текущими и месячными медианными значениями f_oF2 выделяют положительные ($\Delta f_oF2 = f_oF2 - f_oF2_{med} > 0$) и отрицательные ($\Delta f_oF2 < 0$) ионосферные возмущения. Для краткости обозначим их Δf_oF2_+ и Δf_oF2_- соответственно. Значения Δf_oF2 зависят от многих факторов, таких, например, как предшествующая и текущая солнечная и геомагнитная активности, сезон, широта и долгота наблюдательного пункта, время начала ионосферного возмущения. Задача нашей работы – поиск связи между ионосферными возмущениями и геомагнитной активностью. Для ее решения используются 15-минутные данные цифрового дигизонда DPS-4, размещенного в Иркутске (52.5° N, 104.0° E), за апрель–июнь 2003 г. и индексы геомагнитной активности, взятые на сайте <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>.

Метод анализа

Многообразие процессов, развивающихся одновременно в атмосфере и магнитосфере, зачастую не позволяет установить первопричину ионосферных возмущений. Косвенную информацию о ней можно получить статистическими методами. Мы используем метод наложенных эпох, позволяющий выявить скрытые особенности изучаемых процессов [Bremer, 1988]. В этом методе ряды данных, соответствующие набору схожих событий, смещаются по временной шкале так, чтобы нулевой точке отсчета времени ($t=0$) соответствовала точка, обладающая общими для всех рядов свойствами. Затем значения рядов, совпадающие по времени, суммируются, и в результате проявляются устойчиво повторяющиеся тенденции, замаскированные в отдельных случаях другими эффектами. В нашей работе точкой $t=0$ будет начало ионосферного возмущения (см. ниже).

Анализируемые явления

На нижней панели рис. 1 показано, что в апреле–июне 2003 г. средние, максимальные и минималь-

ные суточные значения f_oF2 менялись в широких пределах: 4.3÷7.5, 5.1÷9.3 и 2.3÷5.6 МГц соответственно. Для анализа мы выбрали ионосферные возмущения, удовлетворяющие критерию $|\Delta f_oF2_{\pm}/f_oF2_{med}| > 0.1$ в течение 3 ч и более. Выбор критерия основан на результатах анализа возмущений F2-слоя ионосферы на разнесенных по широте европейских станциях [Kouris et al., 1998, 1999]. По этому критерию выделено 37 положительных ионосферных возмущений и 31 отрицательное длительностями от 3 до 26.5 ч. В 35 % случаев длительность возмущения равна 3÷5 ч.

Диаграммы распределения возмущений по MLT их начала представлены на рис. 2. Основываясь на диаграмме, показанной на рис. 2, а, мы разделили события Δf_oF2_+ на две группы: полуночно-утренние и предполуденно-вечерние возмущения с началами в 23–09 и 09–23 MLT соответственно. Для удобства сравнения на такие же группы по MLT разделены события Δf_oF2_- , хотя для них правильнее было бы деление на группы с началами в 06–12 и 20–05 MLT. Число событий в каждой из четырех групп указано в таблице.

Динамика кольцевого тока

На рис. 1 показано, что в апреле–июне 2003 г. D_{st} -индекс семнадцать раз понижался до $-100 \geq D_{st} \geq -50$ нТл (умеренные магнитные бури) и два раза до $D_{st} < -100$ нТл (большие магнитные бури). Усиления кольцевого тока могли быть вызваны высокоскоростными потоками из двадцати корональных дыр и десятью корональными выбросами [http://www.solen.info/solar/]. Ионосферные возмущения наблюдались при значениях D_{st} от -141 до 20 нТл.

Во время полуночно-утренних событий с началами в 23–09 MLT средние значения D_{st} -индекса для группы Δf_oF2_- на 15 нТл (в ~2 раза) меньше, чем для группы Δf_oF2_+ . В отличие от них, предполуденно-вечерние события Δf_oF2_+ с началами в 09–23 MLT наблюдаются при средних значениях D_{st} немного меньших (на ~4 нТл), чем события Δf_oF2_- (см. таблицу). Сдвиг между распределениями вероятности появления начинающихся в одни и те же часы событий Δf_oF2_+ и Δf_oF2_- по D_{st} отчетливо виден на рис. 3, а, б.

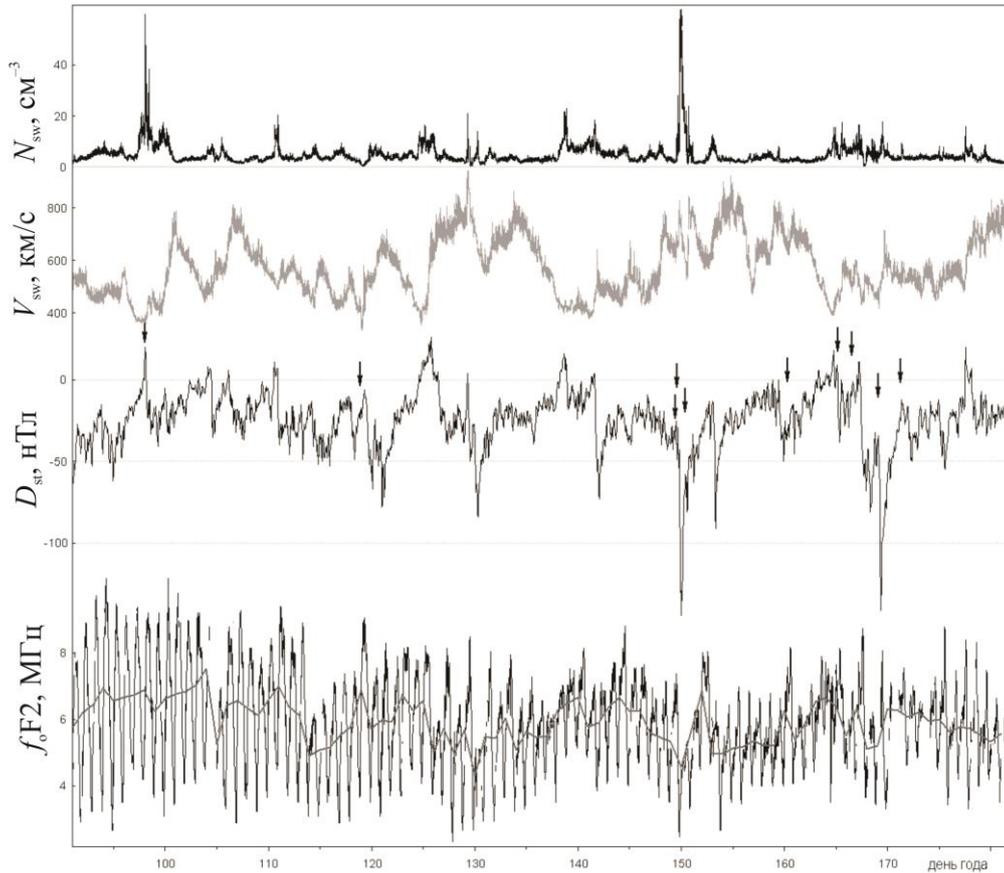


Рис. 1. Сверху вниз показаны: плотность и скорость солнечного ветра [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/], D_{st} -индекс, f_oF2 и ее среднесуточное значение (серая линия). Стрелками отмечены дни прихода выбросов корональной массы.

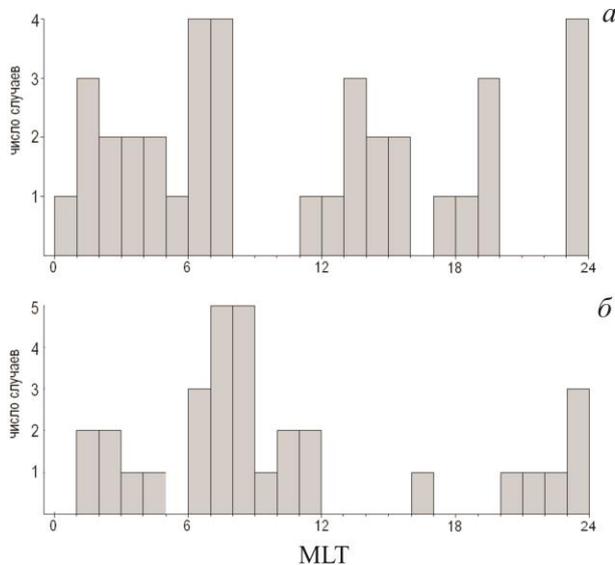


Рис. 2. Распределение положительных (а) и отрицательных (б) возмущений по MLT.

Тенденции изменения D_{st} -индекса в четырех группах событий изучались с помощью метода наложенных эпох. За точку нулевого отсчета времени ($t=0$) принимался час начала возмущения (час первого превышения переменной $|\Delta foF2_{\pm}/foF2_{med}|$ уровня 0.1). Суммировались ряды данных, полученных за сутки до и сутки после $t=0$. Полученные результаты представлены в виде графиков на рис. 4. Мы видим, что события $\Delta foF2_{+}$ возникают

Число событий в четырех группах ионосферных возмущений; средние значения ($D_{st\ mean}$) и среднеквадратичные отклонения (S_{Dst}) D_{st} -индекса в событиях каждой группы

MLT	число событий		$D_{st\ mean}$ и S_{Dst}	
	$\Delta foF2_{+}$	$\Delta foF2_{-}$	$\Delta foF2_{+}$	$\Delta foF2_{-}$
23–09	23	22	-15.1 ± 11.4	-30.3 ± 16.5
09–23	14	9	-30.7 ± 28.5	-26.4 ± 21.68

в полуночно-утренние часы при ослаблении, а в предполуденно-вечерние часы – при усилении кольцевого тока. В событиях $\Delta foF2_{-}$ наблюдается обратная динамика. Они появляются в полуночно-утренние часы при усилении и предполуденно-вечерние часы при ослаблении кольцевого тока. Отметим, что два предполуденно-вечерних события $\Delta foF2_{-}$, сопровождавшие большие магнитные бури, в анализ не включены.

Динамика авроральных токов

На рис. 5 показаны результаты применения метода наложенных эпох к рядам AE -индекса. Мы видим, что в трех группах (события $\Delta foF2_{+}$ и предполуденно-вечерние $\Delta foF2_{-}$) ионосферные возмущения наблюдаются на фоне бухтообразных изменений AE -индекса.

В группе полуночно-утренних событий $\Delta foF2_{+}$ (рис. 5, а) видны квазипериодические флуктуации AE -индекса, амплитуда которых возрастает до 150 нТл перед началом ионосферного возмущения. AE -индекс максимален в $t = -2$.

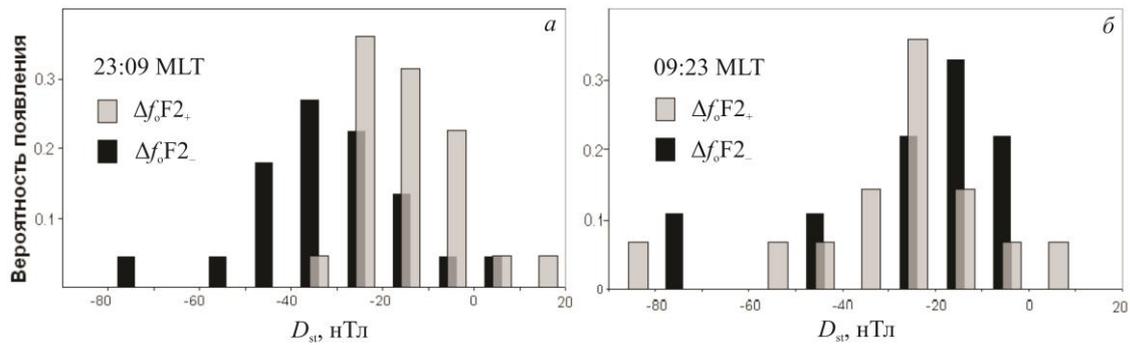


Рис. 3. Зависимость вероятности появления ионосферных возмущений, начинающихся в 23–09 MLT (а) и в 09–23 MLT (б), от средних для каждого события значений D_{st} -индекса для возмущений. Серые прямоугольники соответствуют событиям $\Delta foF2_+$, черные – $\Delta foF2_-$.

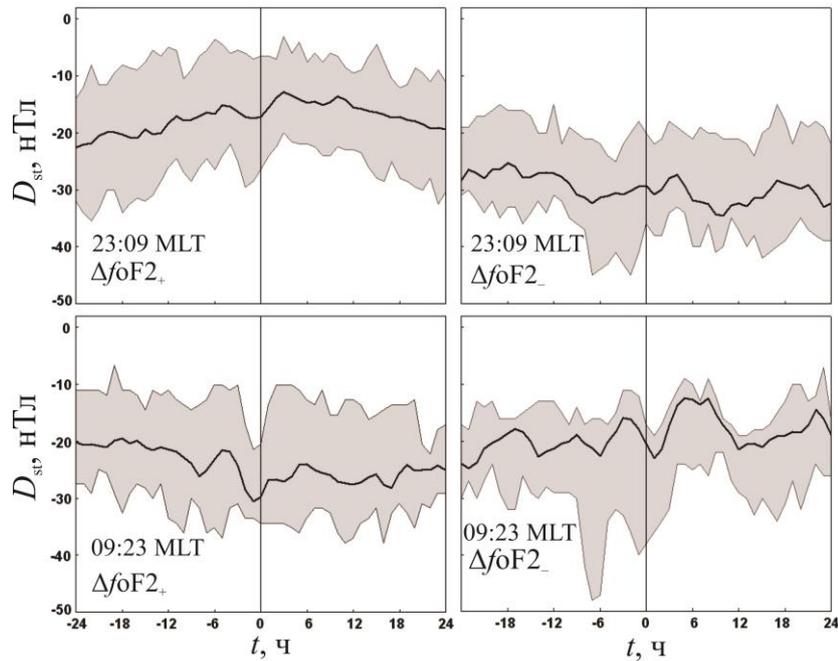


Рис. 4. Динамика изменений D_{st} -индекса в четырех группах событий, полученная методом наложенных эпох. Границы серых областей соответствуют квартилям.

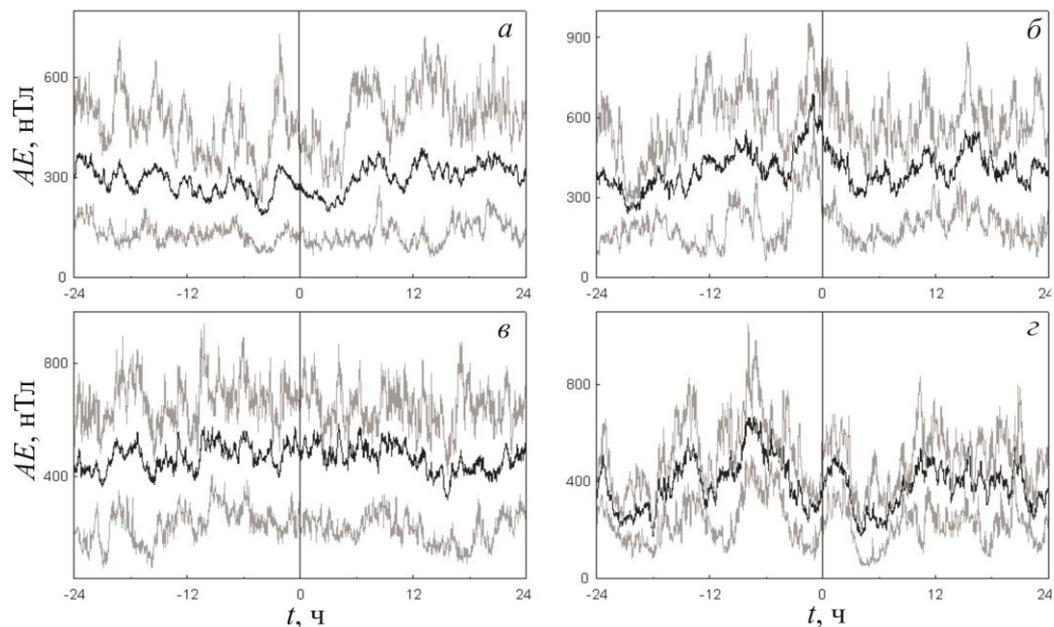


Рис. 5. Динамика AE -индекса: для полуночно-утренних (а, в) и предполуденно-вечерних (б, г) событий $\Delta foF2_+$ (вверху) и $\Delta foF2_-$ (внизу). Серые линии показывают изменения квартилей.

В группе предполуденно-вечерних $\Delta foF2_+$ (рис. 5, б) наблюдается бухтообразное увеличение AE -индекса с максимумом в $t=-1$. В обоих случаях возмущения $\Delta foF2_+$ развиваются на спаде активности авроральных электроджетов.

В отличие от них предполуденно-вечерние события $\Delta foF2_-$ начинаются одновременно с бухтообразным увеличением AE -индекса, следующим за более мощным усилением авроральных электроджетов в интервале $t=-10 \div -3$ ч.

Полуночно-утренние события $\Delta foF2_-$ развиваются на фоне иррегулярных изменений AE -индекса, не имеющих ярко выраженных пиков. В среднем значения AE -индекса в этой группе событий на 230 нТл выше, чем в группе полуночно-утренних событий $\Delta foF2_+$.

Выводы

Сравнительный анализ условий возникновения ионосферных возмущений различного типа, выполненный нами с помощью метода наложенных эпох, показывает следующее:

- События $\Delta foF2_-$ с началами в 23–09 MLT развиваются при значениях D_{st} -индекса ниже, а с началами в 09–23 MLT – при значениях D_{st} выше, чем $\Delta foF2_+$ с началами в этих же секторах MLT.

- В секторе 23–09 MLT наблюдается тенденция развития событий $\Delta foF2_+$ на фоне увеличения, а $\Delta foF2_-$ – на фоне уменьшения D_{st} -индекса. В секторе 09–23 MLT наблюдаются обратные тенденции.

- В секторе 23–09 MLT положительным ионосферным возмущениям ($\Delta foF2_+$) предшествуют квазипериодические, а отрицательным ($\Delta foF2_-$) – иррегулярные изменения AE -индекса. В среднем значения AE -индекса в полуночно-утренних событиях $\Delta foF2_+$ на 230 нТл меньше, чем в полуночно-утренних событиях $\Delta foF2_-$.

- В секторе 09–23 MLT положительные ионосферные возмущения наблюдаются на спаде, а отрицательные – в начале бухтообразного увеличения AE -индекса. В среднем в предполуденно-вечернем

секторе увеличение AE , сопровождающееся событиями $\Delta foF2_+$, на 100 нТл больше, чем в предполуденно-вечерних событиях $\Delta foF2_-$.

Таким образом, рост геомагнитной активности сопровождается в полуночно-утреннем секторе переходом от положительных к отрицательным, а в предполуденно-вечернем секторе – от отрицательных к положительным ионосферным возмущениям. Частично эти выводы соответствуют результатам исследования ионосферных бурь, опубликованным в работе [Жеребцов, Пирог, 2008]. В ней показано, что в Восточной Азии отрицательные ионосферные возмущения возникают в утреннем секторе в главную фазу, а положительные – в послеполуденном секторе в восстановительную фазу магнитной бури. В отличие от результатов цитированной работы, наши выводы относятся не только к геомагнитным бурям, а к любым возмущениям кольцевого тока и авроральных электроджетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-05-00908.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Жеребцов Г.А., Пирог О.М. Вариации структуры ионосферной плазмы в Восточной Азии // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. I–3, Ч. 1. М.: Янус-К, 2008. 510 с.

Bremer J. The influence of the IMF structure on the ionospheric F-region // J. Atm. Ter. Phys. 1988. V. 50, N 9. P. 831–838.

Kouris S.S., Fotiadis D.N., Xenos T.D. On the day-to-day variation of $foF2$ and $M(3000)F2$ // Adv. Space Res. 1998. V. 22, N 6. P. 873–876.

Kouris S.S., Fotiadis D.N., Zolesi B. Specifications of the F-region variations for quiet and disturbed conditions // Phys. Chem. Earth. 1999. V. 24, N 4. P. 321–327.

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>.

<http://www.solen.info/solar/>.

<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия