

УДК 550.383

ОСОБЕННОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НАД АЛМА-АТОЙ

© 2011 г. А. Ф. Яковец, В. В. Водяников, А. Б. Андреев, Г. И. Гордиенко, Ю. Г. Литвинов

*Институт ионосферы, АО “Национальный Центр космических исследований и технологий”, Алматы
e-mail: artyak40@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.03.2010 г.

После доработки 30.01.2011 г.

По данным измерения параметров ночной ионосферы над Алма-Атой за 2000–2007 гг. изучена сезонная зависимость вероятности появления крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений, а также зависимость среднегодовых значений вероятности их появления от фазы солнечной активности. Проведено сравнение особенностей поведения вероятностей с магнитной активностью.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение отклика атмосферы и ионосферы на магнитные бури и суббури является ключевым моментом для понимания физических механизмов взаимодействия магнитосферы-ионосферы-термосферы. Во время магнитосферных суббурь происходит кратковременное усиление аврорального электроджета, приводящее к локальному нагреву атмосферы. Процесс быстрого расширения и последующего сжатия атмосферы генерирует крупномасштабные атмосферные гравитационные волны (КМ АГВ), которые распространяются к экватору и, взаимодействуя с ионосферной плазмой, создают на своем пути крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (КМ ПИВ) [Millward et al., 1993]. В ряде работ показано, что распространение КМ ПИВ носит глобальный характер. В работе [Шашунькина и др., 1998] на основе анализа большого объема данных вертикального зондирования ионосферы построена планетарная эмпирическая модель реакции критической частоты и высоты ночной области F на прохождение КМ АГВ, сгенерированных магнитосферными суббуриями. Установлена связь между интенсивностью суббури и вероятностью наблюдения КМ ПИВ.

В работе [Карпачев и Деминова, 2004] исследован отклик ионосферы на большую магнитную бурю по данным глобальной сети станций вертикального зондирования и спутника “Космос-900”. Показано, что отклик, представляющий КМ ПИВ с квазипериодом ~ 3 –4 ч, наблюдается по всему земному шару, при этом амплитуды КМ ПИВ в ночном секторе наблюдения в несколько раз превышают амплитуды, наблюдавшиеся на освещенной половине Земли. Планетарный характер распростране-

ния крупномасштабных КМ ПИВ исследовался также в работе [Hajkowicz, 1992] для периода высокой солнечной активности и в работе [Hajkowicz and Zimkowski, 2001] для периода низкой активности, где показано, что вероятность наблюдения КМ ПИВ в Австрало-Азиатском долготном секторе заметно превышает вероятность для Европейского и Американского секторов. Этот долготный эффект объяснен на основе механизма ионного торможения АГВ, принимающего максимальные значения в освещенное время суток, и суточной зависимости авроральной активности с максимумом в 13–19 UT. Ионное торможение и зависимость уровня авроральной активности, а, следовательно, и интенсивности генерации КМ ПИВ, от мирового времени определяет то, что наиболее благоприятные условия для наблюдения КМ ПИВ создаются в Австрало-Азиатском долготном секторе, на ночные часы которого падает максимум авроральной активности. В работе [Tsugawa et al., 2004] на основе анализа данных GPS-приемников, расположенных в Японии, установлена связь между величиной Kp -индекса магнитной активности и вероятностью наблюдения КМ ПИВ. Показано, что существует заметная вероятность (28% от полного числа) наблюдения КМ ПИВ и при спокойных магнитных условиях ($Kp \leq 3$). В работе [Ding et al., 2008] на основе анализа данных GPS-приемников, расположенных в Северной Америке, подтверждена связь между величиной Kp -индекса магнитной активности и вероятностью наблюдения КМ ПИВ. В работе [Бурмака и др., 2006] на основе анализа данных, полученных на харьковском радаре некогерентного рассеяния, исследована суточная и высотная зависимости амплитуды ПИВ.

В большей части работ, посвященных исследованию статистики КМ ПИВ, анализируются результаты наблюдений на интервалах, составляющих малую часть солнечного цикла. Поэтому изучение статистических закономерностей вероятности наблюдения КМ ПИВ на интервале, включающем все фазы солнечной активности, представляет значительный интерес. Настоящая работа посвящена статистическому анализу вероятности появления КМ ПИВ над Алма-Атой, расположенной в долготном секторе, благоприятном для их наблюдения, в 2000–2007 гг., приходящихся на вторую половину 23-го цикла солнечной активности.

2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И КРИТЕРИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ КМ ПИВ

Ночные зондирования ионосферы, как наиболее благоприятные для регистрации КМ ПИВ, проводились на установленном в Институте ионосферы ионозонде “Парус”, сопряженном с компьютером, который предназначен для сбора, хранения и обработки ионограмм в цифровом виде. Зондирование осуществлялось в пятиминутном режиме. Длина сеанса измерения в зависимости от сезона составляла ~8–12 ч, при этом середина сеанса примерно приходилась на местную полночь. Критические частоты обыкновенной и необыкновенной компонент (f_oF , $x F$) и действующие высоты отражения ($h'(t)$) радиосигнала на ряде фиксированных рабочих частот непосредственно считывались с ионограмм полуавтоматическим методом. Графики временных рядов указанных параметров образовывали первичный материал, визуальный просмотр которого позволял идентифицировать КМ ПИВ. При идентификации использовались известные критерии, сформулированные в работе [Hunsucker, 1982]. К этим критериям относятся: а) высокая когерентность вариаций f_oF , $x F(t)$ и $h'(t)$ на высотах, охватывающих нижнюю часть области F ; б) вариации $h'(t)$ на меньших высотах запаздывают по фазе относительно вариаций на больших высотах; в) диапазон периодов вариаций соответствует ~30–180 мин. Заметим, что верхняя граница диапазона, по-видимому, не жестко определена 180-ю минутами. Согласно современным представлениям, она находится вблизи ~360 мин [Williams, 1996].

Все сеансы измерения (2000–2007 гг.) были разделены на две группы. Первая группа включала сеансы, во время которых наблюдались квазипериодические вариации ионосферных параметров, и они удовлетворяли сформулированным выше критериям. Полагалось, что в эти ночи наблюдались КМ ПИВ.

Для иллюстрации поведения ионосферных параметров, относимых к первой группе, на рис. 1 представлены вариации критических частот (а) и действующих высот отражения (б) на ряде зондирующих частот (значения частот указаны на рисунке),

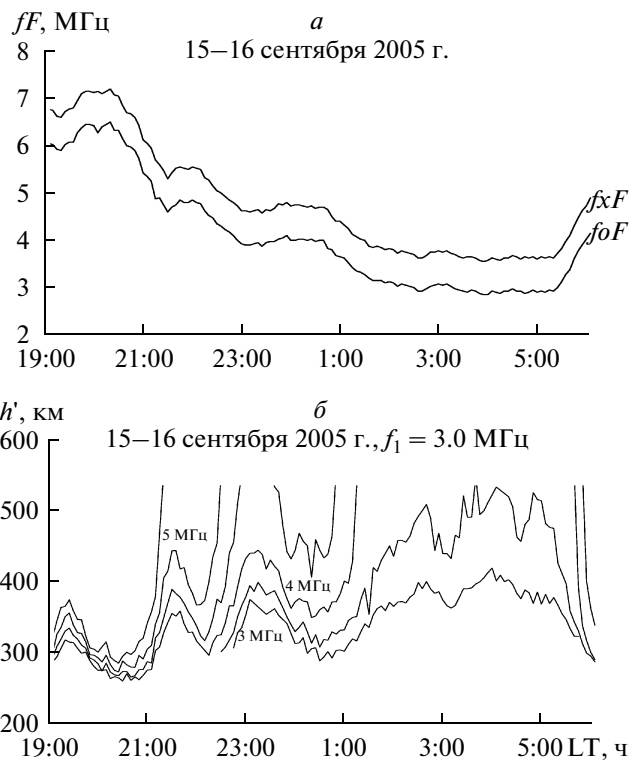


Рис. 1. Поведение критических частот (а) и действующих высот отражения (б) на ряде зондирующих частот при прохождении атмосферных гравитационных волн.

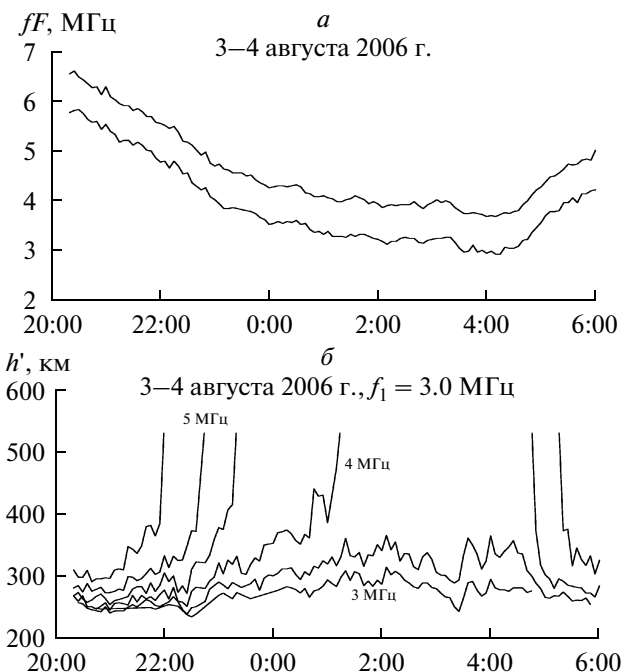


Рис. 2. Квазистохастические вариации критических частот (а) и действующих высот отражения (б) в ночь, когда отсутствовали КМ ПИВ.

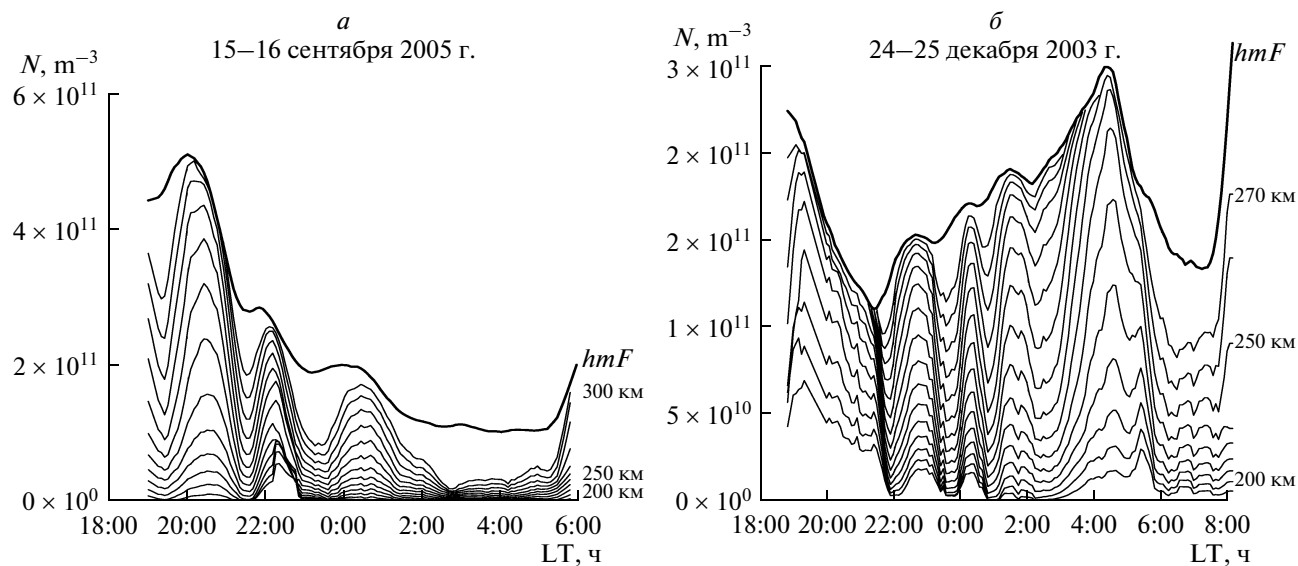


Рис. 3. Поведение электронной плотности ионосферы на серии фиксированных высот с расстоянием между соседними высотами 10 км (тонкие линии) и в максимуме области F (жирная линия) при прохождении КМ АГВ на фоне медленного уменьшения плотности (а) и во время ночного повышения ионизации в области F (б).

полученные ночью в 2005 г. с 19:00 LT 15 сентября по 6:00 LT 16 сентября. Очевидно, что генерация КМ АГВ, вызвавшей наблюдаемые вариации ионосферных параметров, была связана с большой магнитной бурей, имевшей место 15 сентября. Вторая группа сеансов измерений характеризовалась случайными вариациями ионосферных параметров. Пример такого типа вариаций представлен на рис. 2, где изображено поведение f_oF , $x F(t)$ и $h'(t)$ в ночные часы 3–4 августа 2006 г. Такие вариации были отнесены к квазистохастическим.

Дальнейшая обработка первичных данных включала получение из ионограмм высотных профилей электронной плотности ($N(h)$ -профилей) методом Титериджа [Titheridge, 1985] и получение из профилей вариаций ряда параметров F -области. Эта обработка, требующая значительных затрат времени, не применялась ко всему массиву данных зондирования, на базе которого выполнены настоящие исследования, насчитывающему около ста шестидесяти восьми тысяч ионограмм. Однако результаты такой обработки интересно рассмотреть как для иллюстрации двух основных типов медленных изменений электронной концентрации F -области в течение ночи, на фоне которых проявляются КМ ПИВ, так и для представления высотной зависимости амплитуды КМ ПИВ. На рисунке 3а представлены сглаженные вариации электронной плотности ($N(t)$) для ночи 15–16 сентября 2005 г. на серии высот с расстоянием между соседними высотами 10 км. Нижняя кривая соответствует высоте основания слоя ($h = 190$ км). Верхняя (жирная) кривая соответствует вариациям $NmF(t)$ в максимуме слоя hmF . Чтобы устранить высокочастотные составля-

ющие как ионосферного происхождения, так и вызванные шумом, возникающим в процессе обработки, осуществлялась низкочастотная фильтрация рядов с применением скользящего окна с длиной $T = 30$ мин. Этот пример характеризует прохождение волны на фоне монотонного уменьшения электронной плотности, продолжающегося в течение ночи. Такое поведение фоновой электронной плотности характерно для летнего времени и равноденственных периодов, примыкающих к лету. Другое поведение фоновой электронной плотности, называемое ночным повышением ионизации F -области показано на рис. 3б. Оно в основном наблюдалось зимой и равноденственные периоды, прилегающие к зимним месяцам, что соответствует статистике сезонной зависимости эффекта ночных повышений ионизации F -области [Павлов и др., 2009]. Вариации плотности, представленные на рис. 3, демонстрируют еще одну особенность, характерную для большинства сеансов наблюдения, в которые наблюдались КМ ПИВ. Особенность заключается в том, что КМ ПИВ в вариациях NmF проявляются значительно слабее, чем в вариациях $Ne(t)$ на фиксированных высотах, расположенных ниже высоты максимума слоя. Причины такой высотной зависимости реакции ионосферы на прохождение КМ АГВ рассмотрены в работе [Яковец и др., 2008]. Сравнительно малая чувствительность NmF к прохождению КМ ПИВ являлась причиной того, что их идентификация проводилась в основном по характеру вариаций $h'(t)$, при этом f_oF , $x F(t)$ играли вспомогательную роль. Обычно КМ ПИВ представляли пакет, состоящий из двух–трех квазипериодических вариаций. С меньшей вероятностью

Статистика ночей наблюдений и ночей с волнами за 2000–2007 гг.

Месяц	Год									
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	total	%
Янв.		10/6	10/4	16/6	13/7	16/9	19/9	15/8	99/49	49
Февр.		9/5	11/6	1/1	13/7	10/3	7/1	16/3	67/26	39
Март.	9/6	8/6	11/7	13/9	20/9	18/11	11/8	19/11	109/67	62
Апр.	3/2	11/6	10/5	16/13	15/3	15/4	15/7	16/6	101/45	45
Май.	3/0	10/5	8/2	17/14	17/2	9/1	13/2	6/1	83/26	32
Июнь	11/4	9/6	10/0	14/9	16/4	8/2	15/4	8/1	91/29	32
Июль	8/4	11/6		18/7	18/10	14/7	15/2	11/1	95/57	39
Авг.	9/5	8/3	10/3	11/10	14/6	16/7	15/6	6/2	89/42	47
Сент.	8/6	9/3	12/8	14/11	20/4	15/8	13/11	15/4	106/55	52
Окт.	11/8	–	14/14	18/12	18/10	7/6	15/8	5/1	88/59	67
Нояб.	8/4	12/4	16/7	23/13	16/5	20/16	16/15	15/7	126/72	56
Дек.	11/8	13/7	14/6	17/8	14/5	19/6	13/12	11/2	112/54	45
total	81/47	110/57	126/61	178/113	194/72	167/79	167/83	143/47	1166/581	
%	58	52	48	64	40	47	49	33		50

наблюдались КМ ПИВ, содержащие один период колебаний. В таких случаях возникала задача различения КМ ПИВ и эффекта кратковременных ночных повышений электронной плотности F -области, длительность которых попадает в диапазон периодов КМ ПИВ [Лоис и др., 1990]. В этих случаях выделение КМ ПИВ проводилась по форме вариаций параметров. Если ночные повышения ионизации представляли положительный импульс электронной плотности, наложенный на ее фоновый суточных ход, то КМ ПИВ представляла более сложную форму. Согласно теоретическим [Деминова и др., 1982] и модельным [Millward et al., 1993] расчетам, волна, сгенерированная изолированной магнитосферной суббурей, представляет одиночную волну с единственным периодом. При ее приходе к месту наблюдения за ионосферой колебания высоты F -области начинаются с положительной полуволны, тогда как колебания NmF и $Ne(t)$ на фиксированных высотах начинаются с отрицательной полуволны.

Эти расчеты подтверждаются результатами анализа глобального отклика ионосферы на магнитную бурю [Карпачев и Деминова, 2004]. Эти отличия реакции ионосферы позволяют проводить разделение обсуждаемых эффектов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего было получено и обработано сто шестьдесят восемь тысяч ионограмм, что позволило сделать надежные статистические оценки вероятностей появления КМ ПИВ над Алма-Атой в разные сезоны при различной величине солнечной активности. Статистика ночей, когда проводились наблюдения, и ночей, в течение которых присутствовали волно-

вые возмущения приведена в таблице. Таблица представляет матрицу год-месяц, при этом каждый элемент дает количество ночей наблюдения и активность ночей, характеризующихся волновой активностью. Из таблицы видно, что за анализируемый период было проведено 1166 сеансов наблюдений, из которых 581 ночь характеризовалась волновой активностью. На рисунке 4 приведена вероятность появления волновых возмущений в зависимости от сезона и года наблюдения за период 2000–2007 гг. Для оценки статистической значимости пиков гистограммы, приведенной на рис. 4, в качестве нулевой гипотезы принималось предположение о том, что вероятность появления волновых возмущений является случайной величиной с биномиальным распределением. Математическое ожидание принималось равным среднему значению для генеральной выборки $x = 0.50$. Минимальное и максимальное критические значения k/n для $n \approx 100$ (k – число наблюдаемых ПИВ, n – количество наблюдений в месяц) при уровне значимости 0.95 составляют 0.40 и 0.60 соответственно [Джонсон и Лион, 1980]. Из таблицы видно, что отклонение экспериментальных значений от математического ожидания превышает критические значения. Таким образом, нулевая гипотеза отвергается, полученные в сезонном ходе и ходе солнечной активности пики можно считать статистически значимыми.

Рассмотрим характерные особенности распределений, представленных на рис. 4. Прежде всего, следует отметить высокую среднюю вероятность появления КМ ПИВ, составляющую ~50%. Совершенно четко прослеживается сезонная зависимость с максимумами, приходящимися на равноденственные месяцы. Зависимость среднегодовых зна-

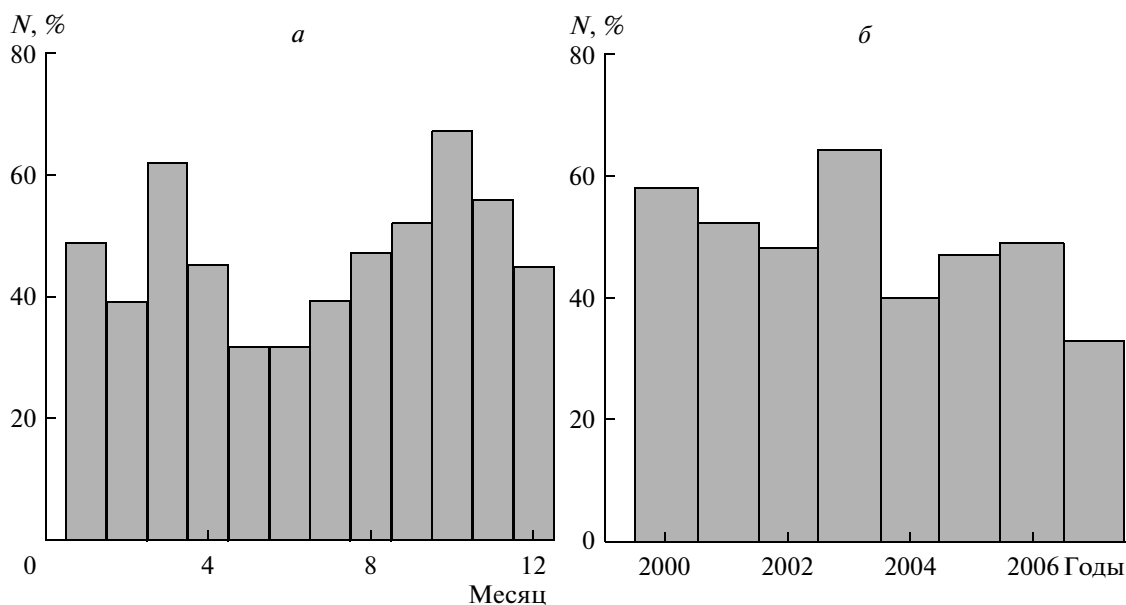


Рис. 4. Вероятность появления волновых возмущений в зависимости от сезона и года наблюдения за период 2000–2007 гг., выраженная в процентах к общему числу сеансов наблюдений.

чений обнаруживает медленное падение вероятности появления от значения $\sim 58\%$ в год максимума активности (2000 г.) до величины $\sim 33\%$ в год минимума активности (2007 г.). На фоне падения выделяется пик на нисходящей ветви солнечного цикла (2003 г.) с вероятностью появления КМ ПИВ $\sim 63\%$. Чтобы интерпретировать характерные особенности распределений, они сравнивались с распределениями геомагнитной активности за те же периоды времени. Основанием для сравнения статистических характеристик вероятностей появления КМ ПИВ с характеристиками геомагнитного поля явились физические механизмы генерации крупномасштабных КМ ПИВ.

Для оценки геомагнитной активности мы использовали планетарный Kp -индекс, значения которого получали на сайте Киотского мирового центра геомагнитных данных swdwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/, при этом массив Kp -индексов формировался следующим образом. Для суток, на которые приходилось начало сеанса наблюдения, во время которого были зарегистрированы КМ ПИВ, выбиралось максимальное значение Kp -индекса, которое присваивалось данному сеансу наблюдения. Учитывая время наблюдения ионосферы ($\sim 18:00$ – $6:00$ LT), время максимума авроральной активности (~ 13 – 19 UT) и пятичасовой сдвиг местного и мирового времени, получаем, что трехчасовой интервал с максимальным Kp обычно попадал на начало или первую половину сеанса наблюдения. Принимая во внимание примерно двухчасовую задержку реакции ионосферы над Алма-Атой на авроральные возмущения, можно заключить, что сеансы наблюдения перекрывали по времени отклик

ионосферы на максимальную магнитную активность за данные сутки. Из всего массива отобранных Kp -индексов были сформированы четыре группы согласно критериям ($Kp \geq 3$, $Kp \geq 4$, $Kp \geq 5$, $Kp \geq 6$). Отношение количества сеансов с $Kp \geq 3, 4, 5, 6$ к общему количеству отобранных сеансов давало относительную вероятность той или иной магнитной активности. Для выбранных групп Kp были построены их сезонные зависимости и зависимости от солнечной активности, которые отражают уже известные долговременные закономерности вариаций геомагнитной активности [Russell and Mc Pherron, 1973; Lyatsky et al., 2001; Gonzalez et al., 1990] и обнаруживают сходство с характером полученных нами распределений вероятности появления КМ ПИВ. При достаточно высокой вероятности ($\sim 58\%$) появления геомагнитных возмущений в году, включая весь спектр возмущений, начиная от слабых возмущений до очень больших магнитных бурь, равноденственные максимумы становятся более выраженными для групп $Kp \geq 4$. Вероятность появления геомагнитных возмущений в зависимости от фазы солнечного цикла указывает на постепенное падение вероятности от года максимума к году минимума солнечной активности и выброс на ниспадающей ветви солнечного цикла (2003 г.).

Полугодовые вариации магнитной активности, представляющие два максимума около равноденственных месяцев известны давно. Для их объяснения было предложено несколько возможных механизмов [Russell and Mc Pherron, 1973]. Аксиальная модель в качестве причины полугодовой компоненты вариаций магнитной активности рассматривает наклон солнечной оси вращения, равный 7.2° отно-

сительно плоскости эклиптики. Земля, двигаясь по эклиптике, достигает наивысших, северных и южных гелиографических широт (для которых скорость солнечного ветра максимальна) 6 сентября и 5 марта. Поэтому наблюдения с Земли должны давать полугодовую вариацию скорости солнечного ветра с максимумами, расположенными вблизи этих дат. Равноденственная модель основана на допущении, что взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой наиболее эффективно, когда ось геомагнитного диполя перпендикулярна линии Солнце—Земля. Модель Рассела—Мак Феррона основана на допущении, что геомагнитная активность максимальна, когда межпланетное магнитное поле имеет максимальное значение южной компоненты в солнечно-магнитосферной координатной системе, что имеет место вблизи равноденствий. Присутствие значительной южной компоненты в межпланетном магнитном поле является условием, необходимым для эффективного пересоединения межпланетного и земного магнитных полей и проникновения, таким образом, плазмы солнечного ветра в магнитосферу.

Новый механизм “солнечной освещенности” был предложен в работе [Lyatsky et al., 2001], в которой рассматривалось воздействие ионосферной проводимости в сопряженных авроральных зонах на геомагнитную активность. Модель предсказывает увеличение геомагнитной активности, когда обе авроральные зоны находятся в темноте, что случается в равноденствие, и это делает ее похожей на равноденственную модель.

Хорошо известным свойством рядов индексов магнитной активности в цикле солнечной активности является наличие двух максимумов [Gonzalez et al., 1990], когда один из них располагается вблизи максимума солнечной активности, а другой на ниспадающей ветви активности. Считается, что первый пик вызван выбросами корональных масс (СМЕ) связанных с уровнем солнечной активности, в то время, как второй пик вызван геомагнитными возмущениями благодаря областям коротационного взаимодействия (CIR) между быстрыми потоками солнечного ветра из корональных дыр и низкоскоростными потоками солнечного ветра. Второй пик запаздывает на 2—4 года и находится на ниспадающей ветви активности в связи с активностью корональных дыр. Известно, что высокоскоростные потоки CIR эмитируются из корональных дыр, областей в солнечной короне с открытым магнитным полем. Корональные дыры продвигаются к нижним широтам во время ниспадающей ветви солнечного цикла, когда их действие на солнечный ветер вблизи Земли становится более важным [Gonzalez et al., 1996].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обработки значительного массива данных наблюдений ночной среднеширотной ионосферы с использованием критерия идентификации крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (КМ ПИВ) исследована статистика их появлений в 23-м цикле солнечной активности. Показано, что: а) сезонная зависимость вероятности появления КМ ПИВ имеет два максимума, приходящихся на равноденственные месяцы; б) зависимость среднегодовых значений вероятности появления КМ ПИВ обнаруживает медленное падение вероятности их появления от максимума к минимуму солнечной активности, на фоне которого выделяется пик примерно в середине нисходящей ветви солнечного цикла; в) особенности, присущие сезонной и циклической зависимостям КМ ПИВ, обнаруживают сходство с сезонными и циклическими вариациями геомагнитной активности, что свидетельствует о том, что одним из механизмов генерации крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений могут являться процессы, связанные с геомагнитными возмущениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Волновые процессы в ионосфере в спокойных и возмущенных условиях. 1. Результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 2. С. 193—208. 2006.
- Деминова Г.Ф., Деминов М.Г., Ерухимов Л.М., Савина О.Н., Юдович Л.А. Об уединенной внутренней гравитационной волне в области F ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 22. № 2. С. 211—215. 1982.
- Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. М.: Мир, 610 с. 1980.
- Карпачев А.Т., Деминова Г.Ф. Планетарная картина эффектов крупномасштабных ВГВ в ионосфере во время бури 22 марта 1979 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 44. № 6. С. 799—812. 2004.
- Лоис Л., Перес Х., Лацо Б., Яковски Н., Ландрок Р. Ночные повышения ионизации в области F над Кубой: связь с солнечной активностью // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 30. № 1. С. 98—106. 1990.
- Павлов А.В., Павлова Н.М., Макаренко С.Ф., Шубин В.Н. Статистическое исследование аномальных ночных максимумов в суточном изменении $NmF2$ в области появления северного гребня экваториальной аномалии // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 2. С. 234—241. 2009.
- Шашунькина В.М., Деминова Г.Ф., Гончарова Е.Е. Моделирование глобального эффекта ВГВ в ночной ионосфере // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 38. № 5. С. 56—71. 1998.
- Яковец А.Ф., Водяников В.В., Гордиенко Г.И., Ашкалиев Я.Ф., Литвинов Ю.Г., Акасов С.Б. Отклик ночной среднеширотной ионосферы на прохождение

- атмосферной гравитационной волны // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 4. С. 511–517. 2008.
- Ding F., Wan W., Liu L., Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Perevalova N.P. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during major magnetic storms over the years 2003–2005 // J. Geophys. Res. V. 113. A00A01, doi: 10.1029/2008JA013037. 2008.
- Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C., Tsurutani B.T. Dual-peak cycle distribution of intense geomagnetic storms // Planet. Space Sci. V. 38. № 2. P. 181–187. 1990.
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., McIntosh P., Gonzalez A.L.C. Coronal-holes-active region-current sheet association with intense interplanetary and geomagnetic phenomena // Geophys. Res. Lett. V. 23. № 19. P. 2577–2580. 1996.
- Hajkowicz L.A. Universal time effect in the occurrences of large-scale ionospheric disturbances // Planet. Space Sci. V. 40. № 8. P. 1093–1099. 1992.
- Hajkowicz L.A., Zimkowski B. Monitoring aurorally-generated large scale traveling ionospheric disturbances (TIDs) over a sunspot cycle (1980–85) // ANARE Reports. № 146. P. 247–258. 2001.
- Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review // Rev. Geophys. V. 20. P. 293–315. 1982.
- Lyatsky W., Newell P.T., Hamza A.M. Solar illumination as cause of the equinoctial preference for geomagnetic activity // Geophys. Res. Lett. V. 28. № 12. P. 2353–2356. 2001.
- Millward G.H., Moffet R.J., Quegam S., Fuller-Rowell T.J. Effect of an atmospheric gravity wave on the midlatitude ionospheric F layer // J. Geophys. Res. V. 98. № All. P. 19173–19179. 1993.
- Russell C.T., Mc Pherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 78. № 1. P. 92–103. 1973.
- Titheridge J.E. Ionogram analysis with the generalised program Polan. National Geophys. Data Center. Boulder. CO USA. P. 189. 1985.
- Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan // J. Geophys. Res. V. 109. A06302. doi: 10.1029/2003JA010302. 2004.
- Williams P.J.S. Tides, atmospheric gravity waves and traveling disturbances in the ionosphere / Modern ionospheric science. Eds. H. Kohl, R. Ruster, K. Shlegel. Katlenburg-Lindau: EGS. P. 136–180. 1996.