

С.Н. Мукашева^{1*}, О.И. Соколова²

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

²Институт ионосферы Национального центра космических исследований и технологий, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: snmukasheva@gmail.com

ИОНОСФЕРНЫЕ БУРИ НАД КАЗАХСТАНОМ ПО ДАННЫМ ОБ ИНТЕГРАЛЬНОМ ЭЛЕКТРОННОМ СОДЕРЖАНИИ

В данной работе приводятся результаты статистического анализа ионосферных возмущений в интегральном электронном содержании, N_F , за период регистрации эффекта Фарадея в пункте Алматы [43,2°N; 76,9°E] при приеме сигналов с ИСЗ «ETS-II» (Engineering Test Satellite Type-II), находящегося на геостационарной орбите [0°N; 130°E], радиомаяк которого работал на частоте 136,112 МГц. Анализ классификационных характеристик каждого конкретного события показал, что возмущения в интегральном электронном содержании могут происходить как с положительным (35 случаев из 83-х), так и с отрицательным знаком (37 случаев из 83-х), а также со сменой фаз (со сменой знака) в процессе протекания возмущения. По времени начала ионосферные возмущения имеют тенденцию чаще случаться в вечернее и ночное время, с большей вероятностью в 17 LT–22 LT. В течение года возмущения N_F с наибольшей частотой случаются в такие месяцы как ноябрь, декабрь, январь, февраль и март. Обнаруживается уменьшение количества ионосферных возмущений по данным об интегральном электронном содержании ионосферы в период высокой солнечной активности. «Пропадание» бурь в интегральном электронном содержании происходит примерно при $F10.7 > 180$, что, возможно, связано с эффектом «насыщения» в ионосфере.

Ключевые слова: интегральное электронное содержание, ионосферное возмущение, геомагнитная буря.

S.N. Mukasheva^{1*}, O.I. Sokolova²

¹Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

²Institute of Ionosphere of the National Center for Space Research and Technology, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: snmukasheva@gmail.com

Ionospheric Storms over Kazakhstan Based on Integrated Electronic Content Data

This paper presents the results of statistical analysis of ionospheric disturbances in the integral electronic content, N_F , during the period of registration of the Faraday effect at the point of Almaty [43,2°N; 76,9°E] when receiving signals from the ETS-II satellite (Engineering Test Satellite Type-II), located in geostationary orbit [0°N; 130°E], the radio beacon of which operated at a frequency of 136,112 MHz. The analysis of the classification characteristics of each specific event showed that perturbations in the integral electronic content can occur both with a positive (35 cases out of 83) and with a negative sign in (37 cases out of 83), as well as with a change of phases (with a change of sign) in the course of the perturbation. According to the start time, ionospheric disturbances tend to occur more often in the evening and at night, with a greater probability at 17 LT–22 LT. During the year, N_F disturbances occur most frequently in the months of November, December, January, February, and March. A decrease in the number of ionospheric disturbances is detected based on the data on the integral electron content of the ionosphere during the period of high solar activity. The «disappearance» of storms in the integral electron content occurs approximately at $F10.7 > 180$, which is probably due to the «saturation» effect in the ionosphere.

Key words: integral electron content, ionospheric disturbance, geomagnetic storm.

С.Н. Мукашева^{1*}, О.И. Соколова²

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

²Ионосфера институты Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: snmukasheva@gmail.com

Интегралды электрон құрылымы жәйлі мәліметтер бойынша Қазақстан аумағындағы ионосфералық дауылдар

Бұл ұсынылған жұмыста [0 °N; 130 °E] геостационарлық орбитада орналасқан «ETS - II» (Engineering Test Satellite Type - II) жердің жасанды серігінен алынған сигналдарын қабылдау кезінде Фарадей эффектін тіркеу периодында Алматы пунктінде [43,2 °N; 76,9 °E], радиомаягі 136,112 МГц жиілікте жұмыс істеген, интегралды электрондық мазмұндағы, N_f ионосфералық ауытқулардың статистикалық талдау нәтижелері келтірілген. Әрбір нақты оқиғаның жіктеу сипаттамаларын талдау интегралды электрондық мазмұндағы бұзылулардың оң (83 жағдайдан 35-і) және теріс белгісімен (83 жағдайдан 37-і), сондай-ақ ионосфералық ауытқу процесінде фазалардың өзгеруімен (белгінің өзгеруімен) болатындығын көрсетті. Басталу уақытына қарай 17 LT – 22 LT ықтималдығы жоғарырақпен ионосфералық ауытқулар кешке және түнде жиі кездесетінің тенденциясы байқалады. Жыл ішінде NF-тің ең жоғары жиіліктегі бұзылулары қараша, желтоқсан, қаңтар, ақпан және наурыз айларында болады. Жоғары күн белсенділігі кезеңінде ионосфераның интегралды электронды құрамы туралы мәліметтер бойынша ионосфералық бұзылулар санының азаюы анықталды. Интегралды электронды мазмұндағы дауылдардың «жоғалуы» шамамен F10.7 > 180 кезінде орын алады, бұл ионосферадағы «қанықтыру» әсерімен байланысты болуы мүмкін.

Түйін сөздер: интегралды электрондық мазмұн, ионосфералық ауытқу, геомагниттік дауыл.

Введение

Ионосферные бури – это возмущения в ионосфере, во время которых происходит как сильное уменьшение, так и сильное увеличение электронной концентрации. Длительность ионосферной бури может колебаться от нескольких часов до нескольких суток (здесь не будут рассматриваться короткопериодные, менее одного часа, изменения в параметрах ионосферы, которые обычно связывают с перемещающимися ионосферными возмущениями). Ионосферные бури являются следствием активных процессов на Солнце и откликом ионосферы на события в системе Солнце – солнечный ветер, магнитосфера и ионосфера Земли [1-9]. Они имеют глобальный характер и захватывают всю ионосферу от высоких широт до экваториальных [10-11]. Указанные особенности ионосферных бурь делают их изучение очень важными с точки зрения большого круга практических задач, связанных с распространением коротковолновых (КВ) и ультракоротковолновых радиоволн (УКВ) [12-13]. Быстрые изменения ионосферных токовых систем во время экстремальных солнечных событий, такие как вспышки, сопровождающиеся выбросом мощного магнитного облака (coronal mass ejections, CMEs), вызывают возмущение магнитного поля

Земли и образуют флуктуирующие токи в ионосфере и магнитосфере [14]. Одним из негативных воздействий экстремальных солнечных событий на технологические системы является появление в проводящих наземных системах (линиях электропередач, трубопроводах) наведенных токов [15-16]. Расчеты наведенных токов проводятся с использованием моделей ионосферных токов и структуры проводимости Земли [17]. Ведутся работы по моделированию процесса одновременного влияния силы магнитного поля и силы трения на окружающую среду [18]. Учитывая сложность вопросов, и наиболее важную роль ионосферы в обеспечении коротковолновой радиосвязи, радиолокации и пеленгации, в последние годы наибольшее внимание уделяют совершенствованию прогноза возмущенной ионосферы с целью определения вероятности появления возмущения, времени его начала, интенсивности, продолжительности и развития возмущения в планетарном масштабе [19-22].

Ионосферные бури были впервые обнаружены по данным вертикального зондирования ионосферы. Большая часть представлений о морфологии ионосферных бурь, исследования по выяснению физических процессов, ответственных за протекание ионосферных бурь также базируются на этих данных. При этом ионосферу считают возмущенной, если

$$|\delta f_0 F2| = \left| \left((f_0 F2_{\text{тек}} - f_0 F2_{\text{мед}}) / f_0 F2_{\text{мед}} \right) \times 100 \right| > 20\%,$$

где $f_0 F2_{\text{тек}}$ – текущее значение критических частот слоя F2 ионосферы, $f_0 F2$, $f_0 F2_{\text{мед}}$ – медианное, посчитанное за спокойные дни, значение $f_0 F2$. При этом говорят, что имеется отрицательное ионосферное возмущение, если $\delta f_0 F2 < 0$, и положительное, если $f_0 F2 > 0$.

Метод

Физика ионосферных бурь

Отрицательная фаза (по материалам работ [12, 23-25]).

С самого начала изучения ионосферных бурь отрицательные ионосферные возмущения, стали связывать с изменением на высотах области F2 нейтрального состава атмосферы, точнее – с уменьшением отношения $[O]/[N_2]$, которое в условиях фотохимического равновесия пропорционально концентрации электронов. Что является причиной указанного изменения состава и где находится источник этих изменений? Во время магнитосферных возмущений (суббурь) имеется источник разогрева на высотах E-области в авроральном овале, – джоулев нагрев, за счет диссипации энергии крупномасштабных токовых систем, причем по экспериментальным данным 60 % этой энергии идет на нагрев нейтрального газа. Разогрев атмосферного газа на высотах 100-120 км приводит к вертикальному (вверх) выносу газа с соответствующим увеличением температуры и изменением его состава. В результате $[O]/[N_2]$ на высотах области F2 уменьшается ($[O]$ – падает или остается постоянным, а $[N_2]$ растет по сравнению с невозмущенными условиями), приводя к уменьшению равновесной концентрации электронов. Указанный разогрев приводит к градиенту давлений, что вызывает буревую циркуляцию. Наиболее важная для нашего рассмотрения меридиональная циркуляция при этом будет направлена к экватору (непосредственно или через полюс) и в общем случае не совпадает с атмосферной циркуляцией в спокойных условиях. Летом меридиональная составляющая ветра направлена к экватору, а зимой от экватора. В таких условиях буревая циркуляция (всегда – к экватору) летом добавляется к уже существующему невозмущенному ветру, а

зимой работает против такового, поэтому летом отрицательная фаза должна быть развита сильнее и опускаться до более низких широт, чем зимой. Однако расчеты показали, что роль указанного механизма в сезонных различиях изменения $[O]/[N_2]$ во время бури относительно мала. Наибольший вклад в этот эффект вносит сезонное различие в широтном распределении $[O]$. В летнем полушарии $[O]$ растет от полюса к экватору ($d \ln[O]/d\varphi < 0$) и перенос за счет буревой циркуляции приводит к уменьшению $[O]$ по мере развития бури. В зимнем полушарии на широтах $0^\circ-50^\circ$ ($d \ln[O]/d\varphi$) имеет обратный знак, поэтому в ходе бури происходит рост $[O]$. Таким образом, сезонную разницу в глобальной морфологии отрицательных возмущений связана с сезонно – широтным различием в глобальном распределении $[O]$.

Итак, джоулев нагрев в авроральном овале приводит к передаче момента количества движения, и эффект ветра передается на средние широты, где вызывает рост $f_0 F2$. Одновременно начинается (из-за джоулева нагрева) изменение состава термосферы на средних широтах, которое сначала “отстает” от чисто ветрового эффекта, дающего из-за дрейфа области F2 вверх положительную фазу бури на начальном этапе возмущения, а потом за счет все усиливающегося уменьшения отношения $[O]/[N_2]$ приводит к падению $[e]$, т.е. к появлению отрицательной фазы. Уменьшение с уменьшением широты амплитуды отрицательной фазы объясняют эффектом дивергенции и усилением к низким широтам роли термосферных ветров.

Положительная фаза ионосферной бури. В работах [12, 25] были сформулированы основные требования, которым должен отвечать механизм образования положительной фазы ионосферной бури для того, чтобы описать наблюдаемые морфологические особенности ее появления. Наиболее важным из этих требований является следующее: такой механизм должен объяснять часто встречающееся появление положительной фазы (иногда достаточно сильной) до начала магнитного возмущения, регистрируемого с помощью различных индексов (K_p , AE , D_{st}). Это требование в первую очередь заставило высказать утверждение, что механизм образования положительной фазы не может быть связан с основным каналом передачи энергии солнечного ветра (через хвост магнитосферы, высыпание авроральных частиц,

развитие кольцевого тока, джоулев разогрев и т.д.) в ионосферу и термосферу, который приводит к возникновению отрицательной фазы, и что необходим другой канал проникновения энергии солнечного ветра в ионосферу, который может опережать (по эффектам в термосфере и ионосфере) первый канал, связанный с джоулевым разогревом, и может быть достаточно независим от первого, чтобы объяснить существование обособленных положительных возмущений, не сопровождающихся развитием ионосферной бури, т.е. сменой положительной фазы на отрицательную. В качестве такого канала в этих работах был предложен канал высыпания мягких частиц в районе дневного каспа, который замыкается непосредственно на дневные граничные слои и может быстро отреагировать на любое (даже не приводящие к развитию цепочки процессов, заканчивающихся образованием кольцевого тока и джоулевым разогревом термосферы) изменение солнечного ветра или межпланетного магнитного поля. (Под дневным каспом понимается область, где происходит высыпание электронов с энергией $E < 200$ эВ. Эта область простирается вдоль геомагнитной параллели на (2–3) ч, иногда (4–5) ч в каждую сторону от полуденного геомагнитного меридиана, и имеет размеры вдоль этого меридиана от 2° до 5° . Для высыпания в области каспа характерны большие потоки электронов малых энергий (50–200) эВ и резкое уменьшение потоков более энергичных частиц ($E \geq 1$ кэВ), наблюдаемых ближе к экватору и к полюсу. Спектры электронов в области каспа говорят о том, что эти электроны имеют два основных источника: частицы переходного слоя, куда, ускоряясь, попадает через ударную волну плазма солнечного ветра, и частицы больших энергий, попадающие из так называемого граничного слоя. Из рассматриваемых в обзорах возможных механизмов образования ионосферных бурь: 1) джоулев нагрев нижней ионосферы, связанная с ним циркуляция воздушных масс и соответствующие изменения нейтрального состава, 2) электромагнитный дрейф плазмы, 3) обмен плазмой между ионосферой и плазмосферой – ни один не стал общепринятым, поскольку не в состоянии объяснить все наблюдаемые морфологические, пространственные и временные особенности ионосферных бурь. Как показано в работах [26–27] возмущения ионосферы возникают не только с приходом

солнечных протонов вспышки, но и при вариациях галактических космических лучей (ГКЛ). Из модели возмущений электромагнитной и корпускулярной радиации при солнечных вспышках имеем временную последовательность: 1) Вспышка рентгеновского излучения, 2) вспышка солнечных космических лучей (СКЛ), 3) приход субрелятивистских солнечных протонов, 4) приход ударной волны на переднем фронте плазменной неоднородности, вышедшей из Солнца при вспышке, 5) Форбуш понижение интенсивности ГКЛ: в максимуме Форбуш-эффекта могут наблюдаться: 6) высыпание заряженных частиц из радиационных поясов, 7) изменение нижнего порога жесткости геомагнитного обрезания ГКЛ и 8) приход быстрых протонов плазменной неоднородности к Земле при совпадении их траектории. Эффекты ударной волны проявляются на дневной стороне Земли, высыпание частиц и изменение порога геомагнитного обрезания – при значительных (более 100 нТл) возмущениях H – составляющей вектора магнитного поля Земли. Субрелятивистские протоны и протоны плазменной неоднородности относятся к низкоэнергичной, а ГКЛ, ударная волна, вспышки СКЛ к высокоэнергичным компонентам корпускулярных излучений. В случае доказательств возможности передачи возмущений космических лучей в среднеширотную область F ионосферы мы получим обоснование возникновения как положительных, так и отрицательных ВИБ.

Эффекты ионосферных бурь в интегральном электронном содержании

Поиски методов прогноза развития ионосферного возмущения ведутся в разных направлениях, в том числе с использованием данных об интегральном электронном содержании, полученных при регистрации эффекта Фарадея сигналов, принимаемых от радиомаяков геостационарных ИСЗ. УКВ сигналы, принимаемые от геостационарных ИСЗ, дают уникальную возможность для непрерывного контроля как короткопериодных, так и долгопериодных вариаций ионосферы. Этот метод наиболее подходящ для наблюдения ионосферных бурь, потому что резкое искажение $N(h)$ – профилей и увеличение поглощения в D -области, амплитудные и фазовые мерцания не влияют на качество измерений интегрального электронного содержания методом фарадеевского вращения, в то

время как они часто ухудшают качество ионозондных измерений [28]. Исследования ионосферных бурь методом радиомаяка начали проводиться сразу после запусков первых ИСЗ. Для Северной Америки модель возмущенной ионосферы, согласно [28], выглядит следующим образом: если буря начинается утром, то наблюдается увеличение интегрального электронного содержания после полудня этого дня, затем следует понижение вблизи захода и значение его остается ниже обычного в последующие несколько дней. Вариации электронной концентрации в максимуме слоя F2 во время бурь в высоких широтах характеризуются начальным коротким возрастанием, за которым следует сильное уменьшение электронной концентрации; амплитуда уменьшения наибольшая летом. В экваториальной области во время возмущений увеличение электронной концентрации происходит после короткого начального понижения. Ситуация на низких широтах следующая: сильные магнитные бури здесь обуславливают уменьшение электронной концентрации как днем, так и ночью, причем поведение ионосферы во время бурь летом существенно отличается от вариации в другие сезоны [28]. В работе [29] по результатам измерения интегрального электронного содержания на широте 40°N (Алматы – геостационарный ИСЗ «SIRIO»), показано, что положительное или отрицательное возмущение часто опережает магнитное. Зимой магнитным бурям, начинающимся в предполуночном секторе, предшествуют ночные возрастания электронной концентрации в максимуме слоя F2, но в то же время эти ночные всплески отсутствуют в интегральном электронном содержании. Во время самой магнитной бури на фазе образования кольцевого тока происходит рост, а на

фазе ее распада происходит возвращение электронной концентрации к нормальному значению.

Ионосферные бури над Казахстаном по данным регистрации эффекта Фарадея от геостационарного ИСЗ «ETS-II»

В данной работе приводятся результаты статистического анализа ионосферных возмущений с сентября 1985 г. по декабрь 1989 г. в интегральном электронном содержании (ИЭС), N_F , за период регистрации эффекта Фарадея в пункте Алматы [43,2°N; 76,9°E] при приеме сигналов с ИСЗ «ETS-II» (Engineering Test Satellite Type-II), находящегося на геостационарной орбите [0°N; 130°E], радиомаяк которого работал на частоте 136,112 МГц.

Степень возмущенности ионосферы рассматривается в терминах отклонений текущих значений ИЭС от фоновых (медианных) значений ИЭС (N_{Fmed}) и оценивается в процентах:

$$\delta N_F(\%) = \left(\frac{N_F - N_{Fmed}}{N_{Fmed}} \right) \times 100$$

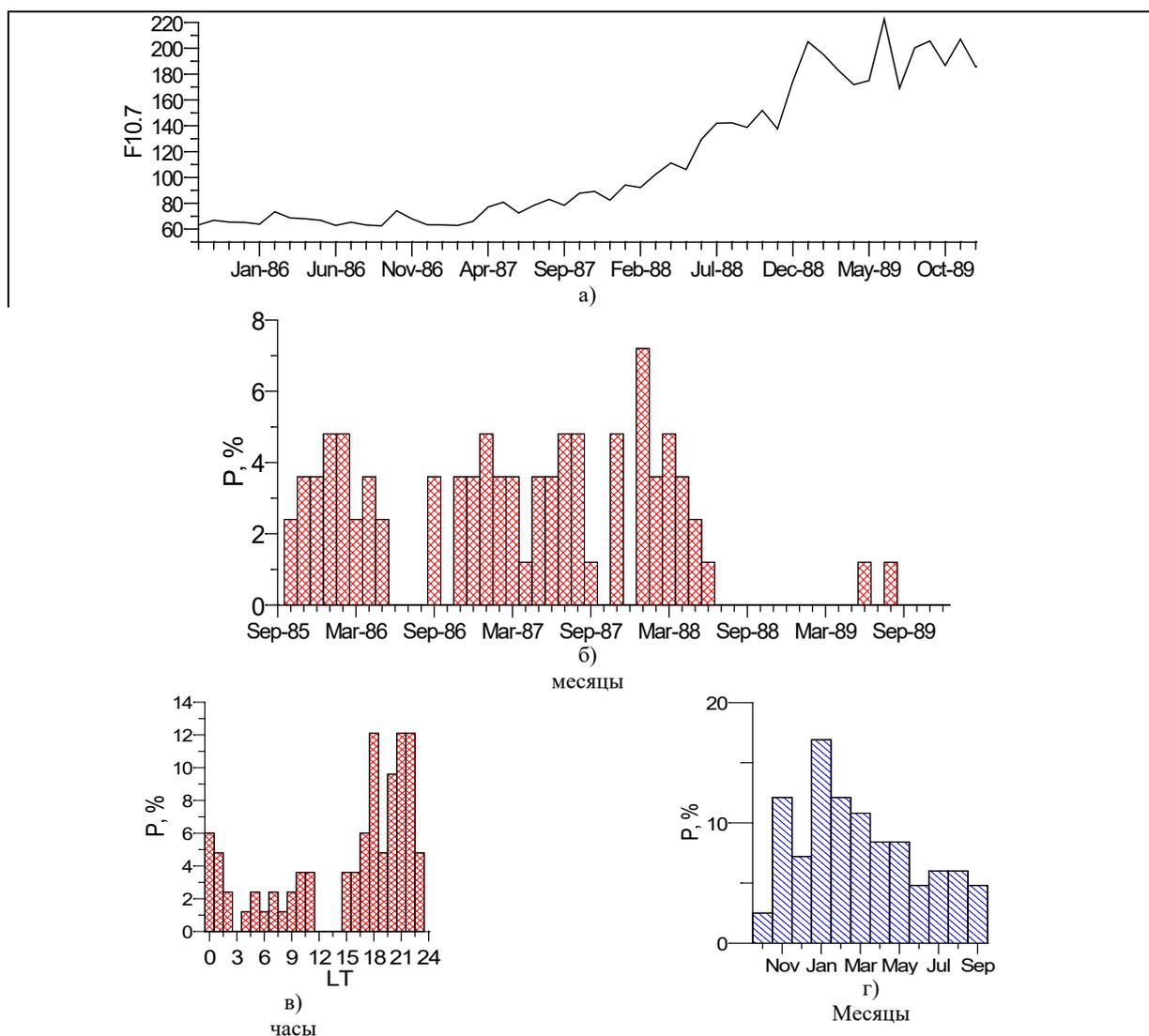
При этом медианные значения N_{Fmed} рассчитываются в результате низко-частотной фильтрации исходных данных N_F (интервал дискретизации – 1 сутки), представляющих собой процедуру обработки исходных данных методом скользящего среднего с длиной усреднения $L=13$ суток. Классификация степени возмущенности ионосферы проведена по правилам, используемым в оценке состояния ионосферы по данным о критических частотах слоя F2 (таблица 1), принимая, что ионосферу можно рассматривать возмущенной, если $|\delta N_F|$ превышает 20 % в течении времени длительностью более шести часов.

Таблица 1 – Категории ионосферных бурь (определяется значениями $\delta foF2$ и продолжительностью бури)

Характеристика ионосферной бури	Ионосферные бури	
	продолжительность	максимальное $\delta foF2$, %
Малая	меньше суток	$20 < \delta foF2 < 30$
Умеренная	(1 – 2) суток	$30 \leq \delta foF2 < 40$
Большая	более суток	$40 \leq \delta foF2 < 50$
Очень большая	более 2 суток	$ \delta foF2 \geq 50$
<i>Примечание:</i> $\delta foF2$ – максимальное отклонение (положительное или отрицательное) критической частоты слоя F2 от месячной скользящей медианы в процентах ($\delta foF2$, %).		

В результате соответствующей обработки массива данных интегрального электронного содержания за весь период с 10.09.1985 г. по 31.12.1989 г. и интерпретации полученных результатов выявлено 83 события, характеристики которых удовлетворяют требованиям классификации, приведенной в таблице 1. Анализ классификационных характеристик каждого конкретного события показал, что

возмущения в интегральном электронном содержании могут происходить как с положительным (35 случаев из 83-х), так и с отрицательным знаком (37 случаев из 83-х), а также со сменой фаз (со сменой знака) в процессе протекания возмущения. Условия появления ионосферных бурь по данным об интегральном электронном содержании показаны на рисунке 1.



Вариации потока радиоизлучения Солнца F10.7 за период с сентября 1985 г. по декабрь 1989 г. (а); вероятность появления ионосферных бурь по данным ИЭС за тот же период (б); вероятность появления ионосферных бурь относительно времени суток (в); вероятность появления ионосферных бурь в течение года (г).

Рисунок 1 – Условия появления ионосферных бурь (по данным об ИЭС) над Казахстанским регионом

По времени начала возмущения имеют тенденцию чаще случаться в вечернее и ночное время, с большой вероятностью в 17–22 часов LT, смотри рисунок 1в, степень возмущенности интегрального электронного содержания, как правило, по абсолютной величине превышает 50 % относительно фонового уровня N_F . В течение года возмущения N_F с наибольшей частотой случаются в такие месяцы как ноябрь, декабрь, январь, февраль и март (смотри рисунок 1г). Но особое замечание мы делаем о том, что от года к году распределение возмущенностей ИЭС выглядит таким образом, что с ростом солнечной активности (рисунок 1а, 1б) частота появления возмущений сначала увеличивается, затем возмущения в N_F , как бы не регистрируются вовсе, в отличие от ситуации в геомагнитном поле (1986 г. – 9 геомагнитных бурь, 1987 г. – 5 геомагнитных бурь, 1988 г. – 11 геомагнитных бурь, 1989 г. – 26 геомагнитных бурь). «Пропадание» бурь в ИЭС происходит примерно при $F10.7 > 180$.

Что касается критических частот слоя F2, то следует отметить, что имеются показания о наличии возмущений в ионосфере в этот период повышений SA, однако из-за специфики метода (радиозондирование на частотах $0,5 \div 15$ МГц) и физических факторов в ионосферной среде (образование экранизирующих слоев, поглощение сигналов, помехи и пр.) измерения $foF2$ или затруднительны, или не представляются возможными вообще в возмущенные периоды. Поэтому ряды данных по $foF2$ в такие периоды имеют большие разрывы и, практически, не подлежат статистической обработке.

Заключение

Следствием активных геоэффективных процессов на Солнце являются геомагнитные бури [14] и множеством ионосферных явлений: (1) внезапными ионосферными возмущениями, (2) поглощениями в полярной шапке, (3) авроральными поглощениями, (3) послебуревыми эффектом и (4) ионосферными бурями [12, 23–25]. Указанные основные виды ионосферных возмущений существенно влияют на радиосвязь и на работу различных радиотехнических систем на Земле и на спутниках. Если внезапные ионосферные возмущения, поглощения в полярной шапке, авроральные поглощения – явления характерные для высокоширотной ионосферы, и

они оказывают свое влияние на полярных радиотрассах, то ионосферные бури, как я отмечала в начале раздела 3, имеют глобальный характер и захватывают всю ионосферу от высоких широт до экваториальных. Геомагнитные возмущения и резкие изменения ионосферных токовых систем способствуют появлению в проводящих наземных системах (линиях электропередач, трубопроводах) геомагнитно индуцированных токов, ГИТ, или так называемых наведенных токов. В свою очередь изучение ионосферных бурь представляет собой большой практический интерес из-за их воздействия на радиосвязь, и точный прогноз их проявления, интенсивности, продолжительности является актуальной задачей. Однако такие прогнозы невозможны до тех пор, пока не будут поняты основные механизмы возникновения этих бурь. Исследования ионосферных бурь методом фарадеевского вращения начали проводиться сразу после запусков первых ИСЗ [28]. УКВ сигналы, принимаемые от геостационарных ИСЗ, дают уникальную возможность для непрерывного контроля как короткопериодных, так и долгопериодных вариаций ионосферы.

В настоящей работе в результате проведенного, по существу, статистического анализа вариации интегрального электронного содержания ионосферы с позиции исследования ионосферных бурь, можно утверждать, что:

- измерение интегрального электронного содержания является надежным инструментом для регистрации и изучения возмущенного состояния ионосферы;

- возмущения ИЭС могут происходить равновероятно как с понижением значений (отрицательные возмущения) так и с повышением значений ИЭС (положительные возмущения), а также могут носить сложный характер протекания со сменой знака возмущения, степень возмущенности интегрального электронного содержания, как правило, по абсолютной величине превышает 50 % относительно фонового уровня N_F ;

- по времени начала возмущения имеют тенденцию чаще случаться в вечернее и ночное время, с большей вероятностью в 17–22 часов LT;

- в течение года возмущения N_F с наибольшей частотой случаются в такие месяцы как ноябрь, декабрь, январь, февраль и март;

- обнаруживается уменьшение количества ионосферных возмущений по данным об интег-

ральном электронном содержании ионосферы в период высокой солнечной активности. «Пропадание» бурь в ИЭС происходит примерно при $F10.7 > 180$, что, возможно, связано с эффектом “насыщения” в ионосфере.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан грантового проекта AP09259554.

Литература

- 1 Kamide Y., Balan N. The importance of ground magnetic data in specifying the state of magnetosphere – ionosphere coupling: a personal view // *Geoscience Letters*. –2016. –Vol. 3, N 10.
- 2 Klimentenko M.V., Klimentenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomonov A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick’s Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // *J. Atmos. Solar-Terr Phys.*–2018.–Vol. 180. –P. 78-92.
- 3 Gulyaeva T.L., Gulyaev R.A. Chain of responses of geomagnetic and ionospheric storms to a bunch of central coronal hole and high speed stream of solar wind // *J. Atmos. Solar-Terr Phys.* –2020.–Vol. 208. –Article id. 105380.
- 4 Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick’s Day storm: A global multi-instrumental overview // *JGR Space Physics*. –2015. –Vol. 120. –P. 9023-9037.
- 5 Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J. D., Doornbos E., van den Ijssel J. Global Ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling // *JGR Space Physics*. –2017. –Vol. 122. –P. 11716-11742..
- 6 Astafyeva E., Zakharenkova I., Hozumi K., Alken P., Coisson P., Hairston M. R., Coley W. R. Study of the equatorial and low-latitude electrodynamic and ionospheric disturbances during the 22–23 June 2015 geomagnetic storm using ground-based and spaceborne techniques // *JGR Space Physics*. –2018. –Vol. 123. –P. 2424–2440.
- 7 Liu Y., Fu L., Wang J., Zhang C. Studying Ionosphere Responses to a Geomagnetic Storm in June 2015 with Multi-Constellation Observations // *Remote Sensing*. –2018. –Vol. 10. –P. 666–686.
- 8 Crowley G., Azeem I. Extreme Events in Geospace / Book Chapter 23 - Extreme Ionospheric Storms and Their Effects on GPS Systems. Elsevier, 2018. – P. 555-586,
- 9 Liu Y., Fu L., Wang J., Zhang C. Studying Ionosphere Responses to a Geomagnetic Storm in June 2015 with Multi-Constellation Observations // *Remote Sensing*. –2018. –Vol. 10. –P. 666–686.
- 10 Черниговская М. А., Шпынев Б. Г., Ясюкевич А. С., Хабитуев Д. С. Ионосферная долготная изменчивость в северном полушарии во время магнитных бурь по данным ионозондов и GPS/ГЛОНАСС // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. –2020. –Т. 17, № 4. –С. 269-281.
- 11 Yang G., Jiang C., Lan T., Huang W., Zhao Z. Ionosonde observations of daytime spread F at middle latitudes during a geomagnetic storm // *J. Atmos. Solar-Terr Phys.* –2018. –Vol. 179.–P. 174–180.
- 12 Данилов А.Д., Морозова Л.Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (Обзор) // *Геоматизм и аэрономия*. –1985. –Т. 25, № 5. –С. 705-721.
- 13 Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Kurbatov G. A., Yasyukevich Yu. V., Morozov Yu. V. Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites // *GPS Solution*. –2016. –Vol. 20. –P. 877-884.
- 14 Мирошниченко Л.И. Физика Солнца и солнечно-земных связей: учебное пособие // под ред. М. И. Панасюка. –М.: Университетская книга, 2011. –174 с.
- 15 Gannon J. L., Swidinsky A., Xu Zh. Geomagnetically Induced Currents from the Sun to the Power Grid // *Geophysical Monograph Series: John Wiley & Sons*. –2019. –Vol. 246.–256 p.
- 16 David T.O. Oyedokun, Pierre J.Cilliers Classical and Recent Aspects of Power System Optimization: Chapter 16 - Geomagnetically Induced Currents: A Threat to Modern Power Systems.–Academic Press.–2018.– P. 421-462.
- 17 Viljanen A., Amm O., and Pirijola R.. Modeling geomagnetically induced currents during different ionospheric situations // *J Geophys. Res.*–1999.–Vol. 104.–P. 28059-28071.
- 18 Джумагулова К.Н., Рамазанов Т.С., Машеева Р.У., Мырзалы М., Шаленов Е.О., Атаканов Н., Джумагулов М.Н. Влияние внешнего магнитного поля и силы трения на динамические свойства системы заряженных частиц // *Вестник. Серия Физическая*. –2021, №1 (76).–С. 32-41.
- 19 Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // *Space Weather*. –2017.–Vol.15, Issue2.– P. 418-429.
- 20 Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., & Huang, X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions// *Space Weather*.– 2017.–P. 418–429.
- 21 Stanislawski I., Gulyaeva T. L., Grynyshyna-Poliuga O., Pustovalova L. V. Ionospheric Weather During Five Extreme Geomagnetic Superstorms Since IGY Deduced With the Instantaneous Global Maps GIM-foF2 // *Space Weather*. –2018.–Vol.16, Issue12.–P. 2068-2078.
- 22 Andreev A. B., Somsikov V. M., Mukasheva S. N., Kaputyn V. I., Nurgaliev K. A. Nonequilibrium Effects in Atmospheric Perturbations Caused by Solar Radiation Flux // *Geomagnetism and Aeronomy*.–2018.–Vol. 58, N 1.–P. 106–112.

- 23 Danilov, A.D., Konstantinova, A.V. Ionospheric Precursors of Geomagnetic Storms. 1. A Review of the Problem // *Geomagnetism and Aeronomy*. –2019.–Vol.59.–P. 554-566.
- 24 Danilov, A.D., Konstantinova, A.V. Trends in hmF2 and the 24th solar activity cycle // *Advances in Space Research*.–2020. –Vol. 66(2).–P.292-298.
- 25 Данилов А.Д., Морозова Л.Д., Мирмович Э.Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // *Геомagnetизм и аэрономия*. –1985. –Т. 25, № 5. –С. 768-772.
- 26 Козин И.Д., Федулina И.Н. Динамика ионосферы. –Алма-Ата, 1991. –Т. 3. –С. 177-191.
- 27 Козин И.Д., Сайфутдинов М.А., Туркеева Б.А. Ионосферные исследования. –1989. –№ 44. –С. 124-126.
- 28 Davies K. Recent progress in satellite radio beacon studies // *Space Science Reviews*. –1980. –N 25. – P. 357-430.
- 29 Мукашева С.Н., Докучаева А.В. Эффекты ионосферных бурь в интегральном электронном содержании // *Геомagnetизм и Аэрономия*. –1990. –Т.30, № 3. –С. 435-439.

References

- 1 Y. Kamide and N. Balan, *Geoscience Letters*, 3, 10 (2016).
- 2 M.V. Klimenko, et.al., *J. Atmos. Solar-Terr Phys.*, 180, 78-92 (2018).
- 3 T.L. Gulyaeva and R.A. Gulyaev, *J. Atmos. Solar-Terr Phys.*, 208, 105380 (2020).
- 4 E. Astafyeva, I. Zakharenkova, and M. Förster, *JGR Space Physics*, 120, 9023-9037 (2015).
- 5 E. Astafyeva, et.al., *J. JGR Space Physics*, 122, 11716-11742 (2017).
- 6 E. Astafyeva, et.al., *JGR Space Physics*, 123, 2424-2440 (2018).
- 7 Y. Liu, et.al., *Remote Sensing*, 10, 666-686 (2018).
- 8 G. Crowley and I. Azeem , *Extreme Events in Geospace*, (Book Chapter 23 - Extreme Ionospheric Storms and Their Effects on GPS Systems, Elsevier, 2018), 555-586.
- 9 Y. Liu, et.al., *Remote Sensing*, 10, 666-686 (2018).
- 10 M.A. Chernigovskaya, et.al., *Modern problems of remote sensing of the Earth from Space*, 17, 4, 269-281 (2020). (in Russ).
- 11 G. Yang, et.al., *J. Atmos. Solar-Terr Phys.*, 179, 174–180 (2018).
- 12 A.D. Danilov and L.D. Morozova, *Geomagnetism and Aeronomy*, 25, 5, 705-721 (1985). (in Russ).
- 13 V.E. Kunitsyn, et.al., *GPS Solution*, 20, 877-884 (2016).
- 14 L.I. Miroshnichenko *Physics of the Sun and solar-terrestrial connections* (A textbook M.: University book, 2011), 174 p. (in Russ).
- 15 J.L. Gannon, A. Swidinsky, and Zh. Xu, *Geophysical Monograph Series* (John Wiley & Sons., 246, 2019), 256p.
- 16 T.O. David, Oyedokun and Pierre J. Cilliers, *Classical and Recent Aspects of Power System Optimization: Chapter 16 - Geomagnetically Induced Currents: A Threat to Modern Power Systems*.–Academic Press., 421-462 (2018).
- 17 A. Viljanen, O. Amm, and R.Pirijola, *J. Geophys. Res.*, 104, 28059-28071 (1999).
- 18 K.N. Dzhumagulova, et.al., *Rec.Contr.Phys.*, 1 (76), 32-41 (2021). (in Russ).
- 19 D. Bilitza, et.al., *Space Weather*, 15, 2, 418-429 (2017).
- 20 D. Bilitza, et.al., *Space Weather*, 418-429 (2017).
- 21 I. Stanislawski, et.al., *Space Weather*, 16, 12, 2068-2078 (2018).
- 22 A.B. Andreev, et.al., *Geomagnetism and Aeronomy*, 58, 1, 106-112 (2018).
- 23 A.D. Danilov, and A.V. Konstantinova, *Geomagnetism and Aeronomy*, 59, 554-566 (2019).
- 24 A.D. Danilov, and Konstantinova A.V., *Advances in Space Research*, 66(2), 292-298 (2020).
- 25 A.D. Danilov, L.D. Morozova and E.G. Mirmovich, *Geomagnetism and Aeronomy*, 25, 5, 768-772 (1985). (in Russ).
- 26 I.D. Kozin, and I.N. Fedulina, *Dynamics of the ionosphere* (Alma-Ata, 1991), 3, 177-191.
- 27 I.D. Kozin, M.A. Sayfutdinov, and B.A. Turkeeva, *Ionospheric studies*, 44, 124-126 (1989). (in Russ).
- 28 K. Davies, *Space Science Reviews*, 25, 357-430 (1980). (in Russ).
- 29 S.N. Mukasheva and A.V. Dokuchaeva, *Geomagnetism and Aeronomy*, 30, 3, 435-439 (1990). (in Russ).