

Вариации концентрации электронов в D-области ионосферы вблизи Харькова в период магнитной бури в январе 2005 г.

А. М. Гоков, А. И. Гритчин

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина
E-mail: Alexander.M.Gokov@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 22 октября 2007 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований методом частичных отражений вариаций концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время сильной магнитной бури в январе 2005 г. Рассмотрен отклик D-области во все времена суток, включая переходные периоды. Проведено сравнение с результатами, полученными в течение месяца до и после магнитной бури в невозмущенных условиях. Во время магнитной бури и в течение нескольких дней после нее выявлен с периодами $T \geq 30 \div 60$ мин квазипериодический рост концентрации электронов более, чем на $50 \div 100$ %, продолжавшийся в течение десятков минут. По экспериментальным данным выполнены оценки изменений скорости ионизации и энергетических характеристик потоков заряженных частиц.

Введение

Магнитные бури (МБ), которые являются следствием нестационарных процессов на Солнце, таких, как выбросы корональной массы (ВКМ) и солнечные вспышки, оказывают существенное влияние на состояние космической погоды в целом и динамику приземной ионосферной плазмы. Каждая МБ уникальна и сопровождается комплексом явлений в околоземной плазме, которые, кроме общих закономерностей, имеют особенности, вызывающие соответствующие характерные изменения ионосферных параметров, поскольку параметры МБ сильно зависят от энергии нестационарных процессов на Солнце и от предшествующего ей состояния в системе Земля – Космос в целом. В настоящее время сравнительно хорошо изучено проявление МБ в средней и верхней ионосфере (выше 100 км). Реакция среднеширотной D-области ионосферы (ниже 100 км) на МБ носит сложный и неоднозначный характер и изучена недостаточно (см., например, [1-13]). Обусловлено это, в первую

очередь, разными физико-химическими процессами, протекающими в этих областях ионосферы [14], а также эпизодичностью прямых измерений с помощью зондов на ракетах и трудностями при использовании косвенных дистанционных методов. Известные исследования отклика среднеширотной D-области ионосферы (а они, к сожалению, пока единичны), как правило, отражают некоторые характерные особенности поведения концентрации электронов в отдельные промежутки времени во время МБ и после нее. Этого недостаточно для изучения исследуемого вопроса. Требуется проведение длительных экспериментальных наблюдений в течение ряда дней до, во время и после МБ, чтобы проследить динамику изменений в ионосферной плазме наряду с изменениями геофизических параметров (или, как часто говорят в последние годы, параметров космической погоды). Это особенно важно для изучения явления высыпаний заряженных частиц в среднеширотной ионосфере.

Целью настоящей работы, в которой продолжены исследования, начатые нами в предыдущих работах [3-7, 15], является изложение результатов экспериментальных исследований вариаций концентрации электронов $N(z)$ в среднеширотной D-области ионосферы во время МБ в январе 2005 г. и сравнение их с результатами, полученными до и после МБ в невозмущенных условиях.

Техника и методики измерений и обработки данных

Зондирование нижней ионосферы проводилось на территории радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина вблизи г. Харькова (географические координаты: $49^{\circ}38'$ с. ш., $36^{\circ}20'$ в. д.; магнитное наклонение – $66^{\circ}36.8'$, магнитное склонение – $6^{\circ}19.6'$; возвышение над уровнем моря – 156 м) на аппаратуре [16, 17] с помощью радара частичных отражений (ЧО). В период проведения наблюдений технические параметры радара были следующими: импульсная мощность передатчика $P = 150$ кВт, рабочая частота $f = 2.31$ МГц, длительность импульса 25 мкс, частота повторения импульсов $F = 10$ Гц, коэффициент усиления антенны $G \approx 50$, исследуемый диапазон высот – $60 \div 126$ км. Измерения амплитуд ЧО сигналов и радиошумов выполнены в период сильной МБ в январе 2005 г. Наблюдения про-

водились циклами до, в период и после МБ. В табл. 1 приведены сведения о проведенных экспериментах (W – число солнечных пятен; $F10.7$ – поток радиоизлучения на длине волны 10.7 см; Ap и Kp – индексы геомагнитной активности). В отличие от известных в литературе и наших предыдущих экспериментальных исследований, которые, как правило, были эпизодическими и не охватывали больших периодов до и после МБ, в рассматриваемом исследовании мы провели наблюдения методом ЧО достаточно длительными циклами до, в период и после МБ. Во время эксперимента регистрировались высотно-временные зависимости амплитуд смеси $A_{so,x}(z,t)$ ЧО сигнала $A_{o,x}(z,t)$ и радиошума $A_{no,x}(t)$ (t – время, индексы “o” и “x” соответствуют обыкновенной и необыкновенной поляризациям) с 22 высотных уровней, начиная с 60 км через 3 км. Измерения $A_{so,x}(z,t)$ и $A_{no,x}(t)$ выполнялись непрерывными сеансами длительностью единицы–десятки часов. Для выделения амплитуд ЧО сигналов $A_{o,x}(z,t)$ записывались также амплитуды радиошума $A_{no,x}(t)$ (2 выборки в полосе частот 50 кГц) в моменты времени, предшествующие излучению зондирующего импульса. Оценки средних величин квадратов амплитуд ЧО сигнала $\langle A_{o,x}^2 \rangle$ и шумов $\langle A_{no,x}^2 \rangle$ осуществлялись по 600 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10 %. Вычислялись высотно-временные зависимо-

Таблица 1. Сведения об экспериментах

Дата	Время наблюдений, ЛТ	Ap (планетарный)	Kp	F10.7	W
12.01.2005	06:20–21:00	30	45355333	102	58
17.01.2005	09:45–23:55	63	54377753	138	107
18.01.2005	00:00–23:50	72	65756645	124	109
19.01.2005	00:10–24:00	62	66676434	133	66
20.01.2005	01:44–24:00	12	21124433	123	61
21.01.2005	00:19–24:00	61	31322886	114	69
22.01.2005	00:00–24:00	28	56333343	102	60
23.01.2005	00:00–12:10	17	44333432	96	40

сти $\langle A_{o,x}^2 \rangle(z,t)$ и $\langle A_{no,x}^2 \rangle(t)$. Для анализа дополнительно применялось их сглаживание методом скользящего среднего на интервалах 10÷30 мин со сдвигом 1÷5 мин. По полученным $\langle A_{o,x}^2 \rangle(z)$ на фиксированных высотах с шагом $\Delta z = 3$ км на интервале усреднения $\Delta t = 10$ мин вычислялось их отношение $R_{o,x}(z)$, используемое далее для получения профилей электронной концентрации $N(z)$ по методике дифференциального поглощения с применением алгоритма регуляризации [18] (применяется известная из теории метода ЧО

$$\text{связь } R = \frac{\langle A_x^2 \rangle}{\langle A_o^2 \rangle} = \frac{\Omega_+^2 + \nu^2}{\Omega_-^2 + \nu^2} \exp\{-4(K_x - K_o)\},$$

где $\Omega_{\pm} = \omega \pm \omega_L$, $\omega_L = 2\pi f_L$, $f_L = f_B \cos \alpha \approx 1.3$ МГц, f_B – гирочастота электронов, α – угол между вертикалью и вектором индукции геомагнитного поля, ν – частота соударений электронов

с нейтралами, $K_{x,o}$ – интегральный коэффициент поглощения ЧО сигнала, зависящий от концентрации электронов). Погрешность вычислений профилей $N(z)$ не превышала 30%. Уточнение профилей $N(z)$ проводилось по методике [19]: высотные профили $R_{o,x}(z)$ вычислялись на интервалах усреднения $\Delta t = 5, 10$ мин, после чего осуществлялось их высотное сглаживание по трем точкам. Полученные таким образом зависимости $\langle R(z) \rangle$ использовались для получения профилей $N(z)$.

Сведения о космической погоде

Сведения о космической погоде приведены на рис. 1. Рассматриваемый временной период можно условно разделить на три: с 10 по 16 января, с 17 по 22 января и с 22 по 25 января 2005 г. Кратко охарактеризуем их на основе

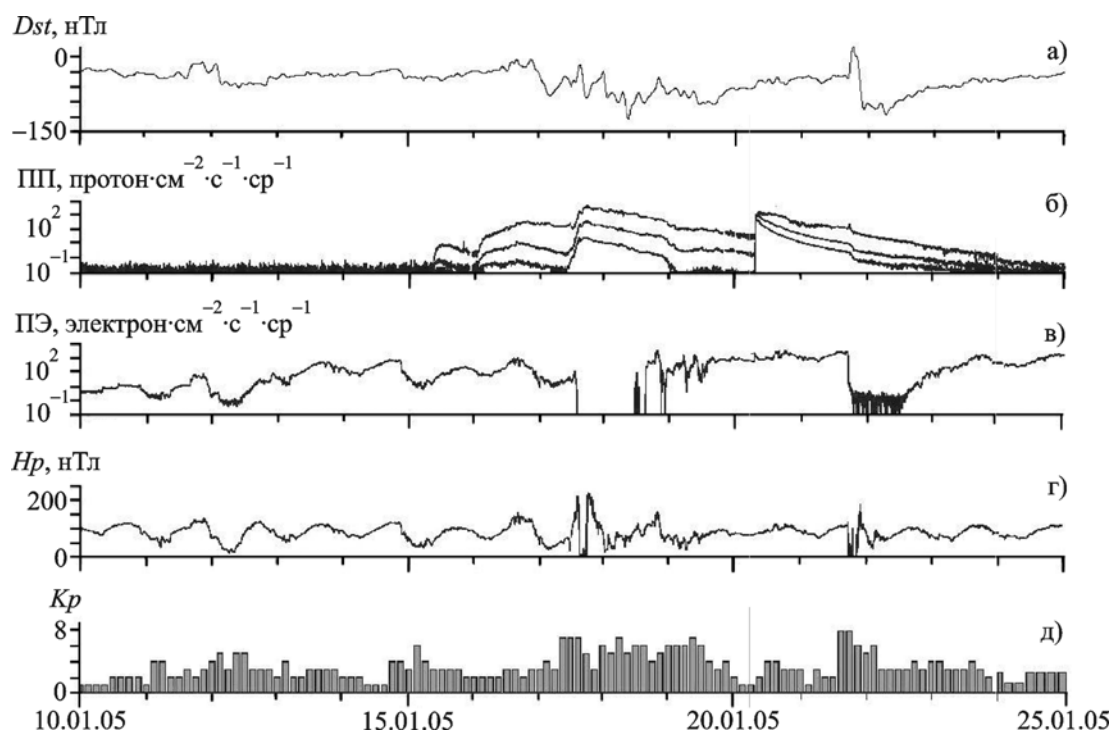


Рис. 1. Временные данные, характеризующие состояние космической погоды в январе 2005 г. в период магнитной бури: а) – изменения индекса геомагнитной активности Dst ; б) – усредненные за 5 мин потоки протонов с энергиями 10, 50 и 100 МэВ, измеренные на спутнике GOES-8 (W75); в) – потоки электронов с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12; г) – усредненные за 5 мин значения H_p – составляющей геомагнитного поля по измерениям на спутнике GOES-12; д) – значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p

геофизических данных, полученных в мировых центрах данных по сети Интернет (<http://www.sec.noaa.gov>). Сильной МБ 17–19 января предшествовали процессы на Солнце в области 720 (N13, $L = 179$). Эта область была самой большой и наиболее активной в видимой части Солнца начиная с 12 – 13 января. Для первого периода характерно следующее:

– Солнечная активность была низкой с постепенным увеличением до умеренной начиная с 14 января, 14 – 17 января в области Солнца 720 произошли 7 вспышек класса М и 3 вспышки – класса Х. Наиболее сильные из них наблюдались 15 января: 1) X1.2/1b в 00:22–00:43(max)–01:02 UT (интегральный поток составил $I = 0.12$ Дж/м²; вспышка породила сложные ВКМ типа полного гало); 2) M8.6/sf в 05:54 – 06:38 – 07:17 UT ($I = 0.29$ Дж/м²); 3) X2.6/3b в 22:25 – 23:02 – 23:31 UT со сложным ВКМ типа асимметричного полного гало ($I = 0.63$ Дж/м²); данные события не были геоэффективными и не вызвали значительных возмущений в фазе восстановления МБ.

– Геомагнитное поле изменялось от спокойного (10 – 11 января) до слабо возмущенного (15 – 16 января) с небольшими возмущенными периодами.

– Потоки протонов в этот период почти не регистрировались, а начиная с 15 января, после вспышки M8.6/sf, на 1÷2 порядка возросли потоки протонов с энергией ≥ 10 МэВ. После вспышки X2.6/3b на 1÷2 порядка возросли потоки протонов с энергиями ≥ 10 и ≥ 100 МэВ (максимальное значение потоков зарегистрировано 16 января в 18:40 UT и составило 365 протон·см⁻²·с⁻¹·ср⁻¹). Изменения потоков протонов иллюстрируются на рис. 1, б.

– Потоки электронов с энергиями ≥ 2 МэВ, измеренные на спутниках GEOS –8, 12, в течение 13 – 16 января возросли, и их значения были повышенными по сравнению с предыдущими днями.

Для второго периода характерно следующее:

– Солнечная активность изменялась от высокой (17 – 19 января) к умеренной и вновь к высокой (во второй половине суток 22 января). Область 720 видимой части Солнца была самой большой и наиболее активной. В этот

период в ней произошли 25 вспышек класса С, 8 вспышек – класса М и 3 вспышки – класса Х. Наиболее сильной и геоэффективной была протонная вспышка X3.8/sf 17 января в 09:52 UT. Она породила сложные ВКМ типа С3 направленного полного гало. Менее сильная, но геоэффективная вспышка X1.3/2n, произошла 19 января в 08:22 UT и породила комплекс сложных ВКМ типа С3 направленного полного гало. Эти два события вызвали возмущения в фазе восстановления и развития МБ. 20 января в области 720 реализовалась мощная протонная вспышка X7.1/2b, которая породила комплекс сложных ВКМ. После этого активность области 720 снижалась, заключительным аккордом ее стала малогеоэффективная вспышка M1.0, произошедшая 23 января. Примерно с 18:00 UT 21 января и до 06:00 UT 22 января после вспышки X7.1 реализовалась небольшая МБ (на рис. 1 видно, что в этот период наблюдались существенное уменьшение значений *Dst*-индекса и сильные вариации *H_p*-составляющей геомагнитного поля; *K_p*-индекс в течение 3÷6 часов возрастал до значений 6÷7.) Характерно, что во время этой МБ, как и в период первой МБ, (см. рис. 1, в) потоки высокоэнергичных электронов уменьшались более, чем на 2 порядка.

– Последовательная серия сильных вспышек рентгеновского излучения, порожденных областью 720 видимой части Солнца, вызвала серию протонных явлений – высыпаний протонов с энергиями ≥ 10 и ≥ 100 МэВ. Заметный рост потоков протонов с энергией ≥ 10 МэВ начался еще 15 января после вспышки M8.6, последующий рост потоков протонов продолжился 16 января после вспышки X2.6, и геоэффективность потоков протонов была выше, чем в предыдущий период: их пиковое значение составило 365 протон·см⁻²·с⁻¹·ср⁻¹, затем в течение 16 – 17 января величина потоков уменьшилась до 117 протон·см⁻²·с⁻¹·ср⁻¹. После этого во второй половине 17 января в результате вспышки X3.8 и ВКМ потоки протонов возросли более, чем на порядок. Наибольшего значения, 5040 протон·см⁻²·с⁻¹·ср⁻¹, потоки достигали 17 января в 17:50 UT, а затем в течение 18 – 19 января потоки уменьшились,

и 20 января они достигли минимальных значений, примерно на $1.5 \div 2$ порядка меньших максимального значения. В этот период (после вспышки X3.8) существенно возросли потоки протонов с энергией ≥ 100 МэВ, наибольших значений они достигли 17–18 января (потоки составляли $\sim 10 \div 28$ протон \cdot см $^{-2} \cdot$ с $^{-1} \cdot$ ср $^{-1}$), а к 19 января они уменьшились в несколько раз, примерно до фоновых значений. Наиболее сильные и энергичные высыпания протонов связаны со вспышкой X7.1, произошедшей 20 января.

Для третьего периода характерно следующее. Дни, начиная примерно с 06:00 UT 22 января, можно отнести к спокойным. Потоки протонов продолжали плавно уменьшаться и 23 января достигли фоновых невозмущенных значений. Потоки электронов после МБ, которая закончилась в первой четверти суток 22 января, плавно возросли примерно на 2 порядка к значениям, наблюдавшимся до МБ. Значения Kp -индекса после МБ уменьшились до $2 \div 3$. Значения Dst -индекса увеличились к невозмущенным фоновым значениям. Вариации H_p соответствовали невозмущенным условиям.

Экспериментальные результаты

Рассмотрим основные особенности высотно-временных вариаций концентрации электронов, характеристик ЧО сигналов и шумов, полученные в экспериментах в невозмущенных условиях и во время МБ в январе 2005 г. В эксперименте 12 января (этот день можно отнести к слабо возмущенным) высотно-временные вариации ЧО сигналов с высотных уровней $78 \div 87$ км, шумов и $N(z, t)$ (см. рис. 2) соответствовали типичным для невозмущенных условий в это время года. Четко выраженного суточного хода (зависимости от зенитного угла Солнца $N(z, \chi)$) не было, что, как показывает анализ многолетних данных наблюдений в регионе, бывает характерно для зимних условий.

17 января имела место МБ, которая сопровождалась сильной рентгеновской вспышкой X3.8 в 08:59 – 12:07 LT. В этот день по данным спутниковых наблюдений (<http://www.solar.sec.noaa.gov>) заметно возросли потоки выпающих протонов, а потоки высокоэнергичных электронов, наоборот, уменьшились и, как видно из рис. 1, наблюдались существенные

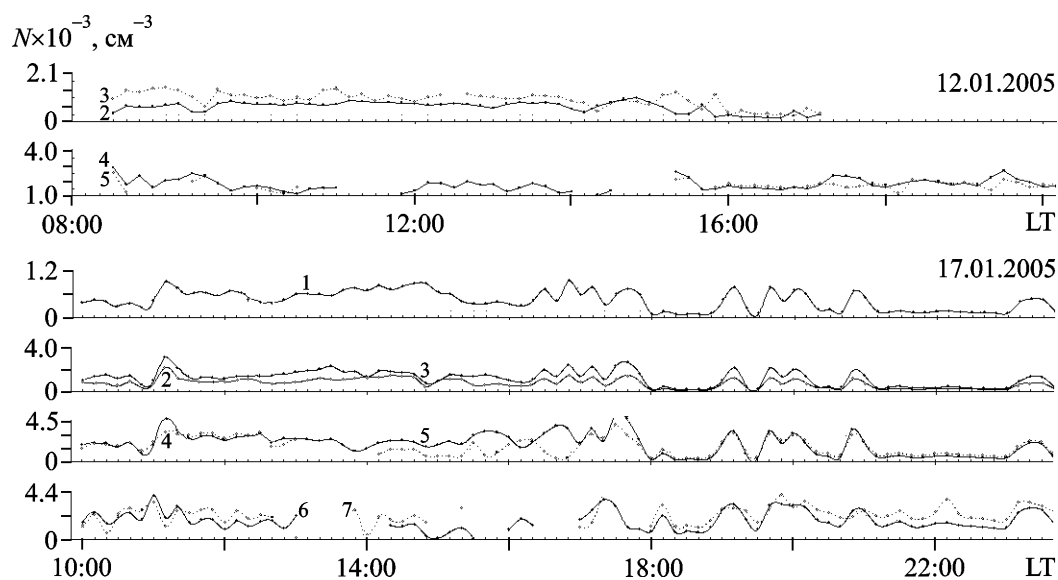


Рис. 2. Вариации концентрации электронов на фиксированных высотах в D-области ионосферы 12 и 17 января 2005 г. Номера у кривых соответствуют следующим высотным уровням: 1 – 75 км, 2 – 78 км, 3 – 81 км, 4 – 84 км, 5 – 87 км, 6 – 90 км, 7 – 93 км

вариации Dst -индекса и H_p -составляющей геомагнитного поля. ЧО-сигналы с отношением сигнал/шум $s = \langle A_{o,x}^2 \rangle / \langle A_{no,x}^2 \rangle \sim 1 \div 100$ наблюдались в течение большей части суток. В период рентгеновской вспышки X3.8 в течение примерно 70 мин интенсивность ЧО сигналов уменьшилась, а интенсивность шумов и их дисперсия возросли в несколько раз. Отношение s уменьшилось в десятки раз по сравнению с предыдущим периодом. После этого интенсивность шумов понизилась до значений в невозмущенных условиях, а отношение s увеличилось в десятки раз. Концентрация электронов на высотах $z = 75 \div 93$ км, как видно из рис. 2, заметно возросла. Прослеживается отчетливый всплеск $N(z,t)$ в течение примерно 30 мин. После резкого увеличения последовало примерно такое же уменьшение значений $N(z,t)$ в течение 30 \div 40 мин. Затем начался плавный рост значений $N(z,t)$ с отчетливо выраженной зависимостью $N(z,\chi)$ от зенитного угла Солнца. Примерно за 70 мин до захода Солнца (время прохождения вечернего солнечного терминатора (ВСТ) на высоте 85 км соответствовало 17:25 LT) в D-области начались квазипериодические изменения $N(z,t)$ в течение примерно 90 мин с периодом $T \approx 30 \div 40$ мин. После 17:55 LT в течение примерно 50 \div 60 мин значения $N(z,t)$ уменьшились более, чем на порядок. Через 80 мин после прохождения ВСТ (около 18:45 LT) в течение примерно 140 мин в несколько раз возросли значения концентрации электронов в D-области. При этом значения $N(z,t)$ менялись с квазипериодом $T \approx 50$ мин. Как видно из приведенных на рис. 2 данных, в этот день в 23:00 – 23:35 LT наблюдался резкий рост значений $N(z,t)$ более, чем на 150%. Отметим, что в целом значения концентрации электронов в этот день в D-области были повышенными по сравнению со значениями в невозмущенный день 12 января.

18 и 19 января, как и 17, отчетливые ЧО сигналы регистрировались в течение большей части суток почти во всей D-области с $s > 2$ (часто было $s \gg 1$). 18 января, как видно из приведенных на рис. 3 данных, вариации $N(z,t)$ в целом схожи с изменениями $N(z,t)$ в предыдущий день, исключая особенности, ха-

рактерные для отклика D-области на рентгеновскую вспышку. Отметим предзаходные вариации $N(z,t)$ и вариации $N(z,t)$ меньшей величины в 20:00 – 20:40 LT и в 22:00 – 24:00 LT, которые, по-видимому, обусловлены высыпаниями высокоэнергичных частиц (электронов, протонов). 19 января в 10:03 – 10:40 LT имела место сравнительно сильная рентгеновская вспышка X1.3. Она отчетливо проявилась в вариациях характеристик ЧО сигналов, шумов и в изменениях $N(z,t)$, которые в целом подобны тем, что наблюдались во время вспышки 17 января. При этом, как видно из рис. 3, значения концентрации электронов повышенные по сравнению со значениями в невозмущенных условиях и отчетливо прослеживается дневной ход $N(z,t)$. Как и в предыдущие два дня, в период прохождения ВСТ наблюдались квазипериодические изменения $N(z,t)$ с периодом $T \approx 30$ мин, которые начались за 40 \div 50 мин до момента захода Солнца на этих высотах и продолжались в течение примерно 170 мин. Вариации концентрации электронов составляли сотни процентов. Так же как и 17–18 января, в ночное время (примерно после 22:00) периодически наблюдался рост значений концентрации электронов в 1.5 \div 4 раза длительностью около 120 мин и периодом $T \approx 30 \div 60$ мин. В ночное время с 00:00 до 04:00 LT во всей D-области значения концентрации электронов оставались повышенными по сравнению со значениями в невозмущенных условиях, что обусловлено, по-видимому, высыпаниями заряженных частиц из радиационных поясов. Для этого эксперимента характерно то, что быстрый рост $N(z,t)$ во всей D-области ионосферы начался через 20 \div 30 мин после момента прохождения утреннего солнечного терминатора (УСТ) на этих высотах. Отметим, что в невозмущенных условиях [20, 21] рост $N(z,t)$ обычно более плавный и начинается через десятки–сотни минут после прохождения УСТ.

День 20 января был слабо возмущенным. В первой половине суток имел место резкий (примерно на порядок) рост значений потоков протонов с последующим плавным уменьшением, при этом значения потоков оставались на 2 \div 3 порядка выше, чем в невозмущенных условиях. Вариации концентрации электронов

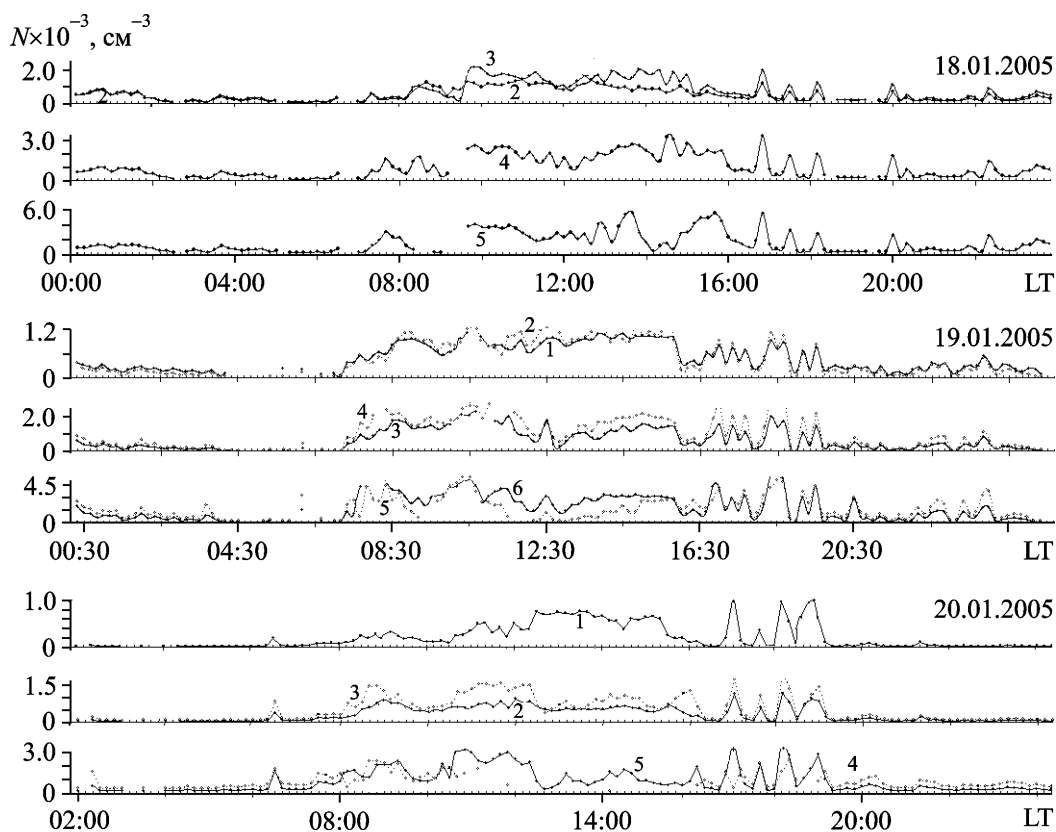


Рис. 3. То же, что и на рис. 2 для 18, 19 и 20 января 2005 г.

в D-области в этот день приведены на рис. 3. Ночные (утром) значения $N(z,t)$ в этот день были на уровне ошибок измерений. Заметный рост концентрации электронов начался через 20 ÷ 50 мин после прохождения УСТ. ЧО сигналы разной интенсивности ($s \sim 1 \div 100$) наблюдались в течение всего светлого времени суток, в темное время суток (с 00:00 и до момента прохождения УСТ, а так же после прохождения ВСТ) $s \sim 1 \div 2$. В период 08:36 – 09:26 LT имела место мощная рентгеновская вспышка X7.1, сопровождавшаяся вспышкой класса 2b в оптическом диапазоне. Она отчетливо проявилась в вариациях характеристик ЧО сигналов, шумов и в изменениях $N(z,t)$, которые в целом подобны тем, что наблюдались во время вспышек 17 и 19 января. В светлое время суток имел место типичный суточный ход величины $N(z,t)$. Примерно за 50 ÷ 60 мин до времени прохождения ВСТ начались существенные квазипериодические

изменения $N(z,t)$ (вариации значений концентрации электронов составляли сотни процентов) с периодом $T \approx 40 \div 50$ мин и длительностью 220 ÷ 240 мин, после чего значения концентрации электронов оставались почти на уровне ошибок метода ЧО.

День 21 января можно отнести к невозмущенным (см. рис. 1). Только в последней трети этих суток и в начале следующих имела место сравнительно короткая геомагнитная буря: значения Kp -индекса после 20:00 LT возросли до 7 ÷ 8 в 22:00 – 24:00 LT, а затем 22 января они уменьшились до 3 примерно к 08:00 LT. В период МБ отмечен всплеск значений Dst примерно на 30 нТл (до значений $Dst \approx 10$ нТл) и последующее резкое их уменьшение до $Dst \approx -100$ нТл. Потоки электронов во время МБ уменьшились более, чем на 2 порядка, с существенными флуктуациями. Значения H_p -компоненты геомагнитного поля в период МБ испытывали сильные флуктуа-

ции (примерно ± 100 нТл относительно невозмущенных значений). В течение светлого времени суток регистрировались отчетливые ЧО сигналы ($s \approx 1 \div 100$), в темное время суток $s \approx 1 \div 3$. Как видно из рис. 4, вариации концентрации электронов в этот день соответствовали типичному суточному ходу с отчетливо выраженной зависимостью $N(z, \chi)$. Во время этой МБ отчетливых особенностей в вариациях ЧО сигналов, шумов и концентрации электронов не было установлено.

22 и 23 января (эти дни можно отнести к спокойным), как видно из рис. 1, параметры, характеризующие космическую погоду, достигли фоновых невозмущенных значений и только потоки электронов после МБ, которая закончилась в первой четверти суток 22 января, плавно возросли примерно на 2 порядка к значениям, имевшим место до МБ. Как и в предыдущие сутки, в эти дни в течение светлого времени суток регистрировались отчетливые ЧО сигналы ($s \approx 1 \div 100$), в темное время суток $s \approx 1 \div 2$. Вариации $N(z, t)$, как видно из рис. 4, соответствовали типичному суточ-

ному ходу с отчетливо выраженной зависимостью $N(z, \chi)$. В период прохождения УСТ 21 – 23 января характерный рост $N(z, t)$ начался через 30 ÷ 40 мин. В период прохождения ВСТ в эти дни квазипериодические изменения $N(z, t)$ были выражены значительно меньше, чем в дни с геомагнитными возмущениями.

Обсуждение

Таким образом, во время рассмотренного периода наблюдений в высотно-временных вариациях концентрации электронов установлены следующие особенности:

1. В невозмущенные дни 21–23 января высотно-временные вариации $N(z, t)$ соответствовали типичным невозмущенным условиям с отчетливо выраженной зависимостью $N(z, \chi)$.
2. В невозмущенных условиях 12 января зависимость $N(z, \chi)$ четко не прослеживалась.
3. Во время трех сильных рентгеновских вспышек наблюдалось увеличение в несколь-

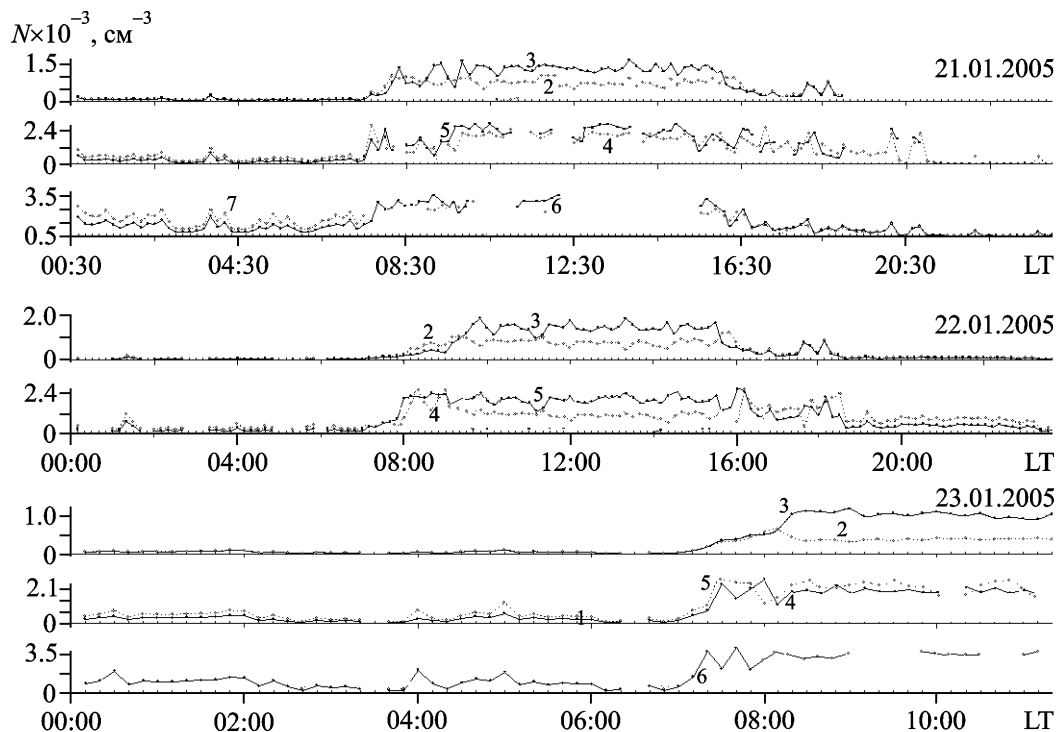


Рис. 4. То же, что и на рис. 2 для 21, 22 и 23 января 2005 г.

ко раз значений $N(z, t)$ в течение 30 ÷ 60 мин с последующим примерно таким же уменьшением концентрации электронов в течение 30 ÷ 40 мин после вспышки и плавным ростом значений $N(z, t)$ в последующие часы. В одном случае (17 января) в начале вспышки регистрировалось увеличение значений $N(z)$ более, чем на 100 %, с последующим резким уменьшением $N(z)$ в течение примерно 30 ÷ 40 мин и плавным ростом значений концентрации электронов после этого.

4. В дни во время геомагнитных возмущений также отчетливо прослеживалась зависимость $N(z, \chi)$. Значения $N(z)$ при этом заметно превышали соответствующие значения концентрации электронов в невозмущенные дни.

5. В возмущенные дни после прохождения УСТ характерный рост значений концентрации электронов начинался примерно на 10 ÷ 50 мин раньше, чем в невозмущенные дни.

6. В период прохождения ВСТ в возмущенные дни за 60 ÷ 40 мин до момента его прохождения наблюдались существенные квазипериодические изменения $N(z, t)$, которые заметно превышали подобные вариации, наблюдаемые в невозмущенные дни.

Одной из характерных для среднеширотной нижней ионосферы особенностей в рассматриваемых экспериментах оказалось то, что, как во время МБ, так и в течение нескольких дней после них, эпизодически регистрировались аномально высокие значения концентрации электронов в течение десятков минут. Такие явления не наблюдались нами в невозмущенных условиях. Увеличение N в период магнитной бури может быть вызвано ионизацией ионосферной плазмы в D-области потоками высыпавшихся из магнитосферы энергичных заряженных частиц. В пользу гипотезы о высыпании заряженных частиц в среднеширотную ионосферу говорит и тот факт, что ранее (см., например, [15]) во время магнитных бурь, в основном в ночные часы, мы неоднократно визуально наблюдали (например, в марте и апреле 2001 г., в октябре 2003 г., в апреле, июле и ноябре 2004 г., в августе 2005 г., а также в период проведения рассматриваемых в настоящей статье

экспериментов) характерное, типа “полярного сияния”, свечение атмосферы длительностью 20 ÷ 60 мин. Имеются фотоснимки этих явлений. Кроме того, известно, что во время МБ и в течение примерно 5 ÷ 14 дней после них высыпавшиеся из радиационных поясов энергичные электроны с энергией $\epsilon \geq 40$ кэВ являются источником дополнительной ионизации среднеширотной D-области ионосферы до широт $\sim 45 \div 60^\circ$ (см., например, [2-5, 7-13]). В этот период существенную роль в качестве источника ионизации в средних широтах играют также высокоэнергичные протоны. Явление корпускулярной ионизации среднеширотной D-области ионосферы подтверждено экспериментально (см., например, [2-13, 22, 23]). Электроны и протоны могут играть заметную роль в ионизации нижней ионосферы на высотах 50 ÷ 100 км ночью и в периоды возмущений различной природы естественного (солнечные вспышки, магнитные бури, грозы, солнечный терминатор, сильные землетрясения и т. д.) и искусственного происхождения (мощные взрывы, старты ракет, работа мощных нагревных стендов в радиочастотном диапазоне, излучение высоковольтных линий электропередач и т. д.).

Для оценки параметров потоков заряженных частиц в рассматриваемых экспериментах удобно воспользоваться методикой [24]. По величине электронной концентрации в невозмущенных N_0 и возмущенных N условиях оцениваются скорости ионизации $q_0 = \alpha_0 N_0^2$, $q = \alpha N^2$, где α_0 и α – соответствующие коэффициенты рекомбинации. Далее по методике [24] оценки параметров потока частиц сводятся к вычислению величины $\Delta q = q - q_0$, затем плотности потока мощности частиц Π , потока частиц p , мощности и энергии частиц P и E . Если пренебречь распределением высыпавшихся частиц по энергиям, которое при наземных наблюдениях неизвестно, то $\Pi \approx 2\epsilon_i \Delta z \Delta q$, где $\epsilon_i \approx 35$ эВ – энергия, затрачиваемая на один акт ионизации; Δz – диапазон высот, где эффективно поглощается поток частиц данной энергии ϵ . В расчетах положим, что $\Delta z = 10$ км. С другой стороны, параметр Π связан с потоком частиц: $\Pi = \epsilon p$. Имея Π , можно оценить мощность и энергию частиц, высыпавшихся

на площади S : $P = \Pi S$, $E = P \Delta T$, где ΔT – длительность высыпаний.

При расчетах предполагалось, что $S = 10^{14}$ м², $\Delta t = (1.2 \div 2.4) \cdot 10^3$ с, энергия высыпающихся высокоэнергичных электронов $\varepsilon = 40$ эВ. Расчеты показали (см. пример расчетов в табл. 2), что величина плотности потоков электронов в рассмотренных экспериментах во время МБ составляла $p \approx 4 \cdot 10^7 \div 10^8$ м⁻² · с⁻¹. В целом результаты расчетов хорошо согласуются с известными данными о потоках электронов и протонов, полученными экспериментально или оцененными во время возмущений различной природы (см., например, [2-13, 22, 23, 25, 26]).

Во время рассмотренных рентгеновских вспышек класса X в течение 30 ÷ 60 мин был установлен рост концентрации электронов на высотах 75 ÷ 90 км. Наиболее вероятно, что такой рост $N(z, t)$ связан с резким увеличением потока рентгеновского излучения Солнца во время вспышки. Используя экспериментальные данные о временном изменении электронной концентрации, оценим изменение скорости образования электронов на этих высотах. Пренебрегая нагревом атмосферы, при $\alpha \approx \alpha_0$ имеем $N/N_0 = \sqrt{q/q_0}$. В этом случае, например для эксперимента 17 января 2005 г. на высоте 75 км $N_0 \approx 300$ см⁻³, $N \approx 900$ см⁻³, $q/q_0 \approx 9$, а на высоте 81 км $N_0 \approx 1200$ см⁻³, $N \approx 3000$ см⁻³, $q/q_0 \approx 6.25$. Для эксперимента 19 января 2005 г. на высоте 78 км $N_0 \approx 600$ см⁻³, $N \approx 1400$ см⁻³, $q/q_0 \approx 5.44$. Для эксперимента 20 января 2005 г. на высоте 78 км $N_0 \approx 250$ см⁻³, $N \approx 740$ см⁻³, $q/q_0 \approx 8.76$,

на высоте 81 км $N_0 \approx 580$ см⁻³, $N \approx 1500$ см⁻³, $q/q_0 \approx 6.7$, а на высоте 87 км $N_0 \approx 1000$ см⁻³, $N \approx 2000$ см⁻³, $q/q_0 \approx 4$.

Выше было отмечено, что как в утренние, так и в вечерние часы, прохождения УСТ и ВСТ, в целом, сопровождались квазипериодическими вариациями $N(z, t)$ почти во всех экспериментах. Величина изменений концентрации – сотни процентов (в возмущенных условиях она, как правило, в единицы раз больше, чем в невозмущенных). Характерно, что значения q/q_0 при этом достаточно большие. Например, в период ВСТ для эксперимента 17 января 2005 г. на высоте 75 км $N_0 \approx 120$ см⁻³, $N \approx 800$ см⁻³, $q/q_0 \approx 44$, а на высоте 84 км $N_0 \approx 800$ см⁻³, $N \approx 3100$ см⁻³, $q/q_0 \approx 15$; для эксперимента 19 января 2005 г. на высоте 84 км $N_0 \approx 500$ см⁻³, $N \approx 2200$ см⁻³, $q/q_0 \approx 19.4$, а на высоте 87 км $N_0 \approx 600$ см⁻³, $N \approx 3400$ см⁻³, $q/q_0 \approx 32$; для эксперимента 20 января 2005 г. на высоте 81 км $N_0 \approx 300$ см⁻³, $N \approx 1500$ см⁻³, $q/q_0 \approx 25$, а на высоте 87 км $N_0 \approx 500$ см⁻³, $N \approx 2800$ см⁻³, $q/q_0 \approx 31.4$. Причина таких изменений концентрации электронов пока не ясна, что обусловлено малой изученностью и большой сложностью процессов в этой области ионосферной плазмы. Естественно, что они связаны с изменением термодинамического режима. Но при этом совершенно не изучена роль волновых процессов и высыпаний высокоэнергичных частиц. Поэтому этот вопрос требует дополнительного изучения, и в первую очередь, теоретического.

Таблица 2. Параметры потоков электронов

Дата	z , км	Δq , м ⁻³ · с ⁻¹	p , м ⁻² · с ⁻¹	P , МВт	E , ГДж
17.01.2005	75	$39 \cdot 10^6$	$5.2 \cdot 10^7$	5.1	45
18.01.2005	81	$27 \cdot 10^6$	$4.0 \cdot 10^7$	2.9	181
19.01.2005	75	$41 \cdot 10^6$	$6.0 \cdot 10^7$	17	26
19.01.2005	84	$34 \cdot 10^6$	$5.9 \cdot 10^7$	16	25
20.01.2005	78	$28 \cdot 10^6$	$5.1 \cdot 10^7$	5.8	14
21.01.2005	81	$17 \cdot 10^6$	$3.7 \cdot 10^7$	3.8	12

Заключение

1. На основе экспериментальных данных, полученных с использованием метода частичных отражений, подтверждено, что в среднеширотной D-области ионосферы могут наблюдаться квазипериодические вариации $N(z, t)$ до порядка величины в течение нескольких часов с $T \approx 40 \div 45$ мин в период МБ и в течение нескольких суток после нее.

2. Такие вариации $N(z, t)$ можно объяснить увеличением потоков высыпающихся заряженных частиц (протонов и электронов). Оценки потоков показали, что плотность потоков высыпающихся частиц в проведенных экспериментах была $p \sim 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

3. В светлое время суток в некоторые дни во время МБ отчетливо прослеживалась зависимость $N(z, \chi)$. Значения $N(z)$ при этом в несколько раз превышали соответствующие значения концентрации электронов в невозмущенные дни. Ионизация в этот период времени, по-видимому, в значительной мере контролировалась потоками высыпающихся протонов и электронов, величины которых были достаточно большими. Оценки потоков, выполненные по методике [24] на основе экспериментальных данных, показали, что плотность потоков высыпающихся частиц была достаточно высокой и составляла $p \sim 10^7 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

4. Установлены некоторые характерные, отличные от наблюдавшихся в невозмущенных условиях, особенности в высотно-временных вариациях $N(z, t)$ в возмущенные дни после прохождения УСТ и ВСТ: утром характерный рост значений $N(z, t)$ начинался примерно на $10 \div 50$ мин раньше, чем в невозмущенные дни; вечером за $60 \div 40$ мин до момента прохождения ВСТ наблюдались существенные квазипериодические изменения $N(z, t)$ с $T \approx 30 \div 50$ мин. Длительность процесса составляла несколько часов, величина возмущений $N(z, t)$ – сотни процентов. В возмущенных условиях величина изменений, как правило, в единицы раз больше, чем в невозмущенных. В силу малой изученности и большой сложности процессов в этой области ионосферной плазмы причина таких изменений концентрации электронов пока

окончательно не ясна и требует дальнейшего изучения.

Авторы благодарят В. А. Подноса за помощь в организации проведения экспериментов, К. П. Гармаша за любезно предоставленную программу расчета концентрации электронов с применением метода регуляризации, О. Ф. Тырнова за обсуждение результатов исследований и полезные замечания.

Литература

1. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Гришкевич Л. В., Иванов В. А. Результаты измерений электронной концентрации в D-области ионосферы во время ионосферных возмущений // Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18, №8. – С. 1094-1097.
2. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Вяхирев В. Д., Гришкевич Л. В. Ночная ионизация D-области ионосферы умеренных широт в период магнитной бури // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1980. – Т. 20, №3. – С. 547-548.
3. Гоков А. М., Гритчин А. И. Характеристики некоторых возмущений в D-области ионосферы во время магнитных бурь и солнечных вспышек // Космические исследования. – 1996. – Т. 34, №6. – С. 585-589.
4. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на протонные события SPE // Космічна наука і технологія. Додаток. – 2003. – Т. 9, №2. – С. 86-90.
5. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Middle Latitude Ionospheric D-Region Responses to Solar Events as Investigated by Partial Reflection Technique // Telecommunications and Radio Engineering. – 2003. – Vol. 59, No. 3&4. – P. 114-134.
6. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Experimental investigations of the middle latitude ionospheric D-region reaction to geomagnetic sudden storm commencements // J. Atmos. Electr. – 2003. – Vol. 23, No 1. – P. 21-29.
7. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Вариации электронной концентрации в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т.11, №5/6. – С. 12-21.
8. Кнут Р., Вюрцбергер И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1976. – Т. 16, №4. – С. 666-673.
9. Кнут Р., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Высыпание энергичных частиц во время бурь

- образного возмущения среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – 1977. – Т. 17, №5. – С. 854-861.
10. Лаштовичка Я., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпускулярного происхождения // Геомагнетизм и аэрономия. – 1976. – Т. 16, №6. – С. 1018-1025.
11. Peter W. B., Chevalier M. W., Inan U. S. Perturbations of midlatitude subionospheric VLF signals associated with lower ionospheric disturbances during major geomagnetic storms // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111, No A03301. – P. 1-14.
12. Potemra T. A., Zmuda A. J. Precipitating Energetic Electrons as an Ionization Source in the Midlatitude Nighttime D Region // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75, No 34. – P. 7161-7166.
13. Belrose J. S., Thomas L. Ionization changes in the middle latitude D region associated with geomagnetic storms // J. Atmos. Terr. Phys. – 1968. – Vol. 30. – P. 1397-1413.
14. Danilov A. D., Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Int. J. Geomagn. Aeron. – 2001. – Vol. 2, No 3. – P. 209-224.
15. Gokov A. M., Tyrnov O. F. The Ionospheric D-Region over Kharkiv during the 14–24 April 2002 Magnetic Storm // Telecommunications and Radio Engineering. – 2005. – Vol. 63, No 1. – P. 63-74.
16. Гритчин А. И., Дорохов В. Л., Концевая Л. Г., Пивень Л. А., Сомов В. Г., Шемет А. С. Стационарный комплекс аппаратуры для исследования нижней ионосферы методом частичных отражений // Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника. – 1988. – № 318. – С. 21-24.
17. Tyrnov O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., Gritchin A. I., Dorohov V. L., Kontsevaya L. G., Kostrov L. S., Leus S. G., Martynenko S. I., Misyura V. A., Podnos V. A., Pokhilko S. N., Rozumenko V. T., Somov V. G., Tsybmal A. M., Chernogor L. F., Shemet A. S. The Radiophysical Observatory for Remote Sounding of the Ionosphere // Turkish Journal of Physics. – 1994. – Vol. 18, No 11. – P. 1260-1265.
18. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т. 36, №2. – С. 75-81.
19. Гоков А. М., Пивень Л. А., Федоренко Ю. П. К определению электронной концентрации D-области ионосферы по амплитудным измерениям частично отраженных сигналов // Радиотехника. – 1990. – Вып. 93. – С.108-111.
20. Гоков А. М., Гритчин А. И. Влияние солнечного терминатора на среднеширотную D-область ионосферы и характеристики частично отраженных КВ-сигналов и радиозумов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1994. – Т. 34, №2. – С. 169-172.
21. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Some Features of Lower Ionosphere Dynamics Caused by the Morning Solar Terminator // J. Atmos. Electr. – 2002. – Vol. 22, No 1. – P. 13-21.
22. Lauter E. A., Knuth R. Precipitation of high energy particles into the upper atmosphere at medium latitudes after magnetic storm // J. Atmos. Terr. Phys. – 1967. – Vol. 29. – P. 411-417.
23. Lastovicka J. Effects of Geomagnetic Storms in the Lower Ionosphere. Middle Atmosphere and Troposphere // J. Atmos. Terr. Phys. – 1996. – Vol. 58. – P. 831-843.
24. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux Parameters of Energetic Particles Affecting the Middle Latitude Lower Ionosphere // Radio Phys. Radio Astron. – 1998. – Vol. 3, No. 2. – P. 191-197.
25. Foster J. C., Cummer S., Inan U. S. Midlatitude particle and electric field effects at the onset of the November 1993 geomagnetic storm // J. Geophys. Res. – 1993. – Vol. 103, No 26. – P. 359-366.
26. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Экспериментальные исследования методом частичных отражений отклика среднеширотной D-области ионосферы на удаленные старты и полеты космических аппаратов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2006. – Т. 46, №5. – С. 690-697.

Варіації концентрації електронів в D-області іоносфери поблизу Харкова в період магнітної бурі в січні 2005 г.

О. М. Гоков, А. І. Грітчин

Наводяться результати експериментальних досліджень методом часткових відбиттів варіацій концентрації електронів в середньоширотній D-області іоносфери під час сильної магнітної бурі у січні 2005 р. Розглянуто відгук D-області впродовж усієї доби, включаючи перехідні періоди. Виконано порівняння із результатами, одержаними протягом місяця до та після магнітної бурі за незбурених умов. Під час магнітної бурі та впродовж кількох діб після неї виявлено з періодами $T \geq 30 \div 60$ хвилин квазіперіодичне зростання концентрації електронів понад $50 \div 100$ % протягом десятків хвилин. За експериментальними даними оцінено зміни швидкості іонізації та енергетичних характеристик потоків заряджених частинок.

Electron Density Variations in the Ionospheric D-region near Kharkiv during the Magnetic Storm of January 2005

A. M. Gokov and A. I. Gritchin

The electron density variations measured with the partial reflection radar in the ionospheric D-region at mid-latitudes during a strong magnetic storm in January 2005 are shown. The D-region response is considered for all day hours, transitional periods included. The results are compared with those obtained a month before and after the magnetic storm in the undisturbed periods. Quasi-periodic increases in the D-region electron density by more than 50 ÷ 100 % during the magnetic storm and a few days beyond are revealed to last for tens of minutes with periods of $T \geq 30 \div 60$ min. The experimental data allowed estimation of ionization rates and parameters of the energetic particle fluxes.