

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, Л. Я. Емельянов¹, С. А. Пазюра¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери НАН и МОН України, Харків
e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
e-mail: Leonid. F. Chernogor@univer.kharkov.ua

Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г.

1. Результаты наблюдений

Надійшла до редакції 05.02.07

Досліджується поведінка шару F2 та зовнішньої іоносфери над Харковом під час геокосмічної бури 7—10 листопада 2004 р., що стала результатом накладання двох послідовних дуже сильних магнітних збурень ($K_{pmax} = 8.7$). Спостереження проведено за допомогою радара некогерентного розсіяння. Зареєстровано значні ефекти негативного іоносферного збурення, зокрема зменшення електронної концентрації в максимумі шару F2 у шість–сім разів та повного електронного вмісту до висоти 1000 км удвічі, підйом шару F2 іоносфери на 300 км вночі та на 150—180 км вдень, незвичайне нічне нагрівання до 2000 та 3000 К для іонів та електронів відповідно, зменшення відносної концентрації іонів водню $N(H^+)/N_e$ до 3.5 разів за рахунок спустошення магнітної силової трубки, що проходить над Харковом. Під час головної фази бури знайдено ефекти, що зазвичай властиві високоширотній іоносфері, включаючи когерентні відбиття. Отримані результати могли свідчити про зміщення великомасштабних структур високоширотної іоносфери (аврорального овалу, головного іоносферного провалу, гарячої зони та ін.) до широти Харкова.

ВВЕДЕНИЕ

Расположение харьковского радара некогерентного рассеяния (параметр Мак-Илвейна $L \approx 1.9$) дает возможность исследовать эффекты, связанные с вариациями космической погоды глубоко во внутренней плазмосфере. Роль этих эффектов существенно увеличивается во время сильных геокосмических бурь. Возмущения охватывают не только высокие широты, они проникают также в средние широты, дестабилизируя технологическую деятельность человека и воздействуя на его здоровье. Многообразие и сложность процессов, развивающихся в периоды геокосмических бурь, делают каждую бурю уникальной, что затрудняет прогнозирование возмущенной

ионосферы. Анализ каждой новой бури дает дополнительную информацию для дальнейшего исследования и моделирования физических процессов в системе Солнце — Земля, а также для прогнозирования реакции ионосферы конкретного региона на возмущения на Солнце.

Единственный в среднеширотной Европе харьковский радар некогерентного рассеяния (НР) метрового диапазона на протяжении почти трех циклов солнечной активности (СА) проводит изучение ионосферы в зависимости от состояния космической погоды [4—7, 12, 13—16].

Целью работы является исследование особенностей поведения области F2 и внешней ионосферы во время сильнейшей геокосмической бури 7—10 ноября 2004 г. (максимальное значение

индекса $K_p = 8.7$). Буре 7—10 ноября 2004 г., называемой супербурей, экстрабурей, уникальной бурей посвящены многие работы [1, 8, 10, 11]. Эти наблюдения, выполненные другими методами и в других регионах земного шара, существенно дополняются нашими наблюдениями. Наши результаты дополняют результаты, полученные мировым научным сообществом.

Наблюдения бури проводились 8—13 ноября 2004 г. в соответствии с международной программой LTCS-C/NOFS (Lower Thermosphere Coupling Study-Communications / Navigation Outage Forecasting System).

СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

Радар некогерентного рассеяния. Исследования ионосферы в Харькове проводятся с помощью радара некогерентного рассеяния (НР), расположенного в обсерватории Института ионосферы (географические координаты: 49.6° с. ш., 36.3° в. д., геомагнитные координаты: 45.7° , 117.8°). Описание радара и режимов его работы дано в работах [5, 12]. 8—13 ноября 2004 г. радар работал в режиме излучения двухчастотного составного сигнала с двумя импульсами длительностью 660 и 130 мкс на частотах $f_1 \approx 158$ МГц и $f = f_1 \pm 100$ кГц. Такой режим обеспечивает высотное разрешение примерно 100 и 20 км в диапазонах высот 200—1000 и 100—400 км соответственно. Максимальная мощность двухканального передатчика радара достигает 3.6 МВт (средняя мощность — 100 кВт), поляризация — круговая. Коэффициент усиления крупнейшей в мире зенитной двухзеркальной 100-м параболической антенны — около 12700 (эффективная площадь близка к 3700 м^2 , ширина луча — 1°). Температура системы составляет 570—1320 К, шумовая температура входных цепей радиоприемного устройства достигает 120—240 К.

Ионозонд «Базис». Ионосферная станция служит для получения ионограмм вертикального зондирования (ВЗ) и измерения критической частоты f_0F2 слоя F2 ионосферы с целью калибровки профиля электронной концентрации, получаемого методом НР.

Магнитометр-флюксметр. Исследования временных вариаций горизонтальной составной

геомагнитного поля (составляющие H и D в направлениях север—юг и запад—восток соответственно) осуществляются при помощи несерийного высокочувствительного (0.5—1 пТл) магнитометра-флюксметра, размещенного в Магнитометрической обсерватории Харьковского национального университета (ХНУ) имени В. Н. Каразина (геомагнитные координаты: $45^\circ 20'$, $119^\circ 20'$) [3].

СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ. ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ

Процессы на Солнце. Буря представляла собой последовательное наложение двух сильнейших магнитных возмущений 7/8 и 9/10 ноября. Они были вызваны высокой активностью Солнца, связанной с быстрым развитием на его диске активной области 696. Бурная эволюция активной области 696 произвела за время ее прохождения по диску Солнца 13 рентгеновских вспышек балла M и две вспышки балла X (таблица). Геоэффективность вспышек в рассматриваемом интервале наблюдений была высокой. Среди них 3 ноября имели место четыре интенсивные вспышки балла M2.8, M1.6, M5.0, M1.0, 4 ноября — две вспышки M2.5 и M5.4, 5 ноября — две вспышки M4.0 и M1.2, 6 ноября — четыре вспышки M9.3, M5.9, M3.6, M1.4, 8 ноября — вспышка M2.3, 9 ноября — M8.9, а также очень интенсивные вспышки 7 ноября балла X2.0 и 10 ноября балла X2.5, последняя явилась самым значительным событием за время жизни активной области 696 на Солнце. Вспышки сопровождались выбросами корональной массы (СМЕ) типа полного или частичного гало различной сложности и конфигурации, магнитных облаков, интенсивными всплесками радиоизлучения, высокоскоростными потоками плазмы, вытекающими из корональных дыр, изменениями динамического давления солнечного ветра (СВ), деформацией переносимого им межпланетного магнитного поля. 9 ноября вспышка M8.9 сопровождалась СМЕ типа «полного гало» со скоростью 1800 км/с в картинной плоскости. Скорость движения солнечной плазмы во время самой интенсивной вспышки X2.5 10 ноября с выбросом СМЕ типа «асимметричного полного гало» достигла 2000 км/с. К 11 ноября активность

Данные о солнечной активности 1—13 ноября 2004 г.

Дата, ноябрь 2004 г.	$F_{10.7}$	Количество солнечных пятен	Площадь солнечных пятен, 10^{-6}	Рентгеновское излучение (фон)	Количество рентгеновских вспышек			Количество оптических вспышек				
					С	М	Х	S	1	2	3	4
1	136	144	1160	B3.3	2	1	0	1	1	0	0	0
2	133	110	1070	B5.1	7	0	0	2	0	0	0	0
3	136	123	1240	B5.4	11	4	0	6	3	0	0	0
4	136	135	1300	B4.5	6	2	0	2	1	0	0	0
5	141	83	1400	B4.9	10	2	0	6	1	0	0	0
6	129	106	1370	B4.3	6	4	0	2	3	1	0	0
7	130	94	980	B4.9	12	0	1	6	0	0	0	0
8	124	93	870	B4.9	5	1	0	10	2	0	0	0
9	127	90	980	B7.0	6	1	0	4	0	1	0	0
10	105	50	500	B5.2	8	0	1	1	0	0	2	0
11	95	70	550	B2.1	1	0	0	1	0	0	0	0
12	97	52	230	B1.3	0	0	0	0	0	0	0	0
13	96	50	220	B1.0	0	0	0	0	0	0	0	0

области 696 значительно уменьшилась, а 12 ноября область переместилась на обратную сторону солнечного диска. Подробное описание солнечной вспышечной и эруптивной активности в ноябре 2004 г., вызвавшей возмущения в межпланетной среде и в магнитосфере, дано в работе [8].

Космическая погода. Параметры, определяющие состояние космической погоды 7—13 ноября 2003 г., приведены на рис. 1. На спутнике ACE 7 ноября в 02^h00^m UT зарегистрирован приход первой из шести межпланетных ударных волн, образованных облаками CME, возникшими во время вспышек 3, 4 и 5 ноября. Прохождения следующих двух волн наблюдались в 10^h00^m UT и 17^h55^m UT. Они привели к сильнейшей первой магнитной буре 7—8 ноября с минимальным значением индекса $D_{st} = -373$ нТл, зарегистрированным 8 ноября в 07^h00^m UT. С приходом ударных волн связано внезапное начало (SC) трех отдельных бурь (суббурь). SC были зарегистрированы 7 ноября как всплески геомагнитного поля в Боулдере со значениями индукции 7 нТл в 02^h58^m UT, 35 нТл в 11^h13^m UT и около 41 нТл в 18^h31^m UT [<http://solar.sec.noaa.gov/weekly>], а также как положительные всплески индекса D_{st} (<http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp>) до значений +12 нТл около 04^h00^m UT, +51 нТл в 13^h00^m UT и +42 нТл в 20^h00^m UT. Эти события

свидетельствовали о сложном характере межпланетных возмущений, связанных с прохождением и наложением серии CME, произведенных в течение начального периода высокой активности области 696. В этот период зарегистрированы увеличения радиальной скорости V_{sw} солнечного ветра, в том числе 7 ноября от 310 до 700 км/с, температуры T и концентрации n_{sw} плазмы солнечного ветра, динамического давления p_{sw} , которое достигло 20 нПа при прохождении через спутник ACE третьей ударной волны в 17^h55^m UT, а также деформация межпланетного магнитного поля, сопровождаемая значительными флуктуациями, увеличением модуля B_t до 45 нТл и резким поворотом B_z -оставляющей на юг в 18^h30^m UT. Значение B_z достигло минимума -45 нТл 8 ноября в 02^h00^m UT и оставалось отрицательным до полудня. Сильное возмущение сменило спокойное магнитное поле: в полночь 6/7 ноября $K_p = 1.7$ [<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>], в следующую ночь $K_p = 8.0, 8.7, 8.7$ и 8.3 в течение четырех 3-ч интервалов соответственно. Фаза восстановления первой бури началась 8 ноября после 07^h00^m UT (см. кривую D_{st} на рис. 1). На ее плавное течение наложилось начало следующей бури 9/10 ноября. 9 ноября ударная волна была зарегистрирована на спутнике ACE в 09^h13^m UT, а

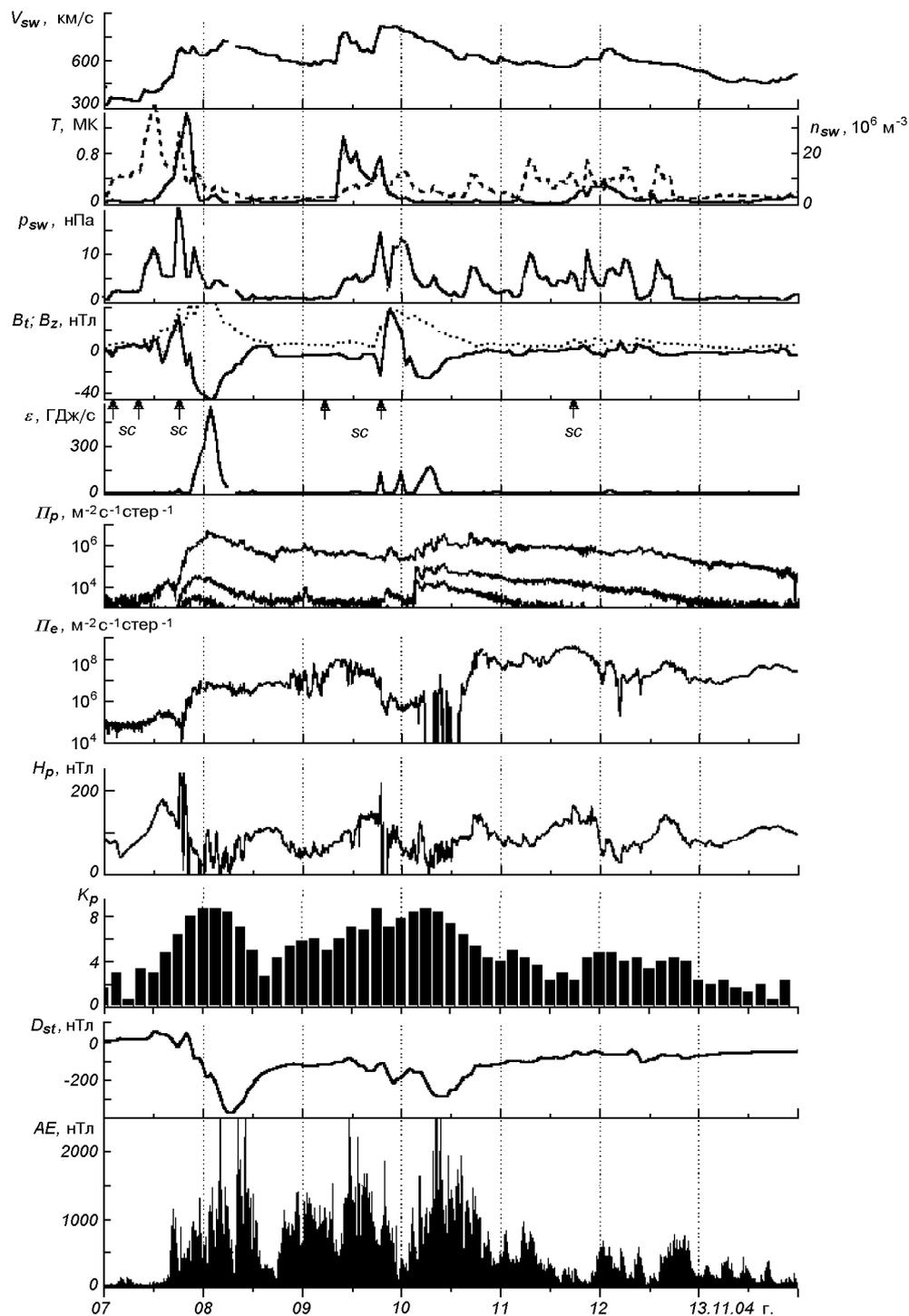


Рис. 1. Изменение параметров солнечного ветра (V_{sw} , T и n_{sw}), динамического давления p_{sw} , модуля B_t (точки) и B_z -составляющей (линия) ММП (данные КА ACE), энергии ϵ , плотности потоков протонов Π_p с энергиями более 10, 50 и 100 МэВ (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов Π_e с энергией более 2 МэВ (ИСЗ GOES-12), H_p -составляющей геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), индексов K_p (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>), D_{st} (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и AE (WDC Kyoto) в течение 7—13 ноября 2004 г. Стрелками отмечены начала суббурь (sc)

затем в 18^h18^m UT. Первая волна была слабой, хотя она вызвала увеличение V_{sw} от 600 до 750 км/с при незначительных изменениях модуля B_t - и B_z -составляющей межпланетного магнитного поля. Волна могла быть связана с наложением СМЕ, которые образовались 6 ноября во время двух вспышек М3.6 и М9.3 и распространялись с разными скоростями. Вторая ударная волна сопровождалась увеличением V_{sw} от 675 до 825 км/с и поворотом к югу B_z -составляющей, которая достигла значения -25 нТл 10 ноября около 06^h00^m UT и сохраняла южное направление примерно до 18^h00^m UT. В Боулдере 9 ноября в 18^h52^m UT зафиксирован новый всплеск геомагнитного поля до 46 нТл, вслед за которым спутники GOES-10 и GOES-12 пересекли магнитопаузу, что свидетельствовало о сжатии магнитосферы. Эти эффекты, вероятно, были связаны со вспышкой 7 ноября балла X2.0. Главная фаза второй бури протекала на фоне значительных флуктуаций параметров солнечного ветра, индекса D_{st} , значение которого достигло минимума (-289 нТл) 10 ноября в 10^h00^m — 11^h00^m UT. Активный период бури был продолжительным, значения $K_p \geq 6$ наблюдались с 12^h00^m UT 9 ноября до 18^h00^m UT 10 ноября. Фаза восстановления продолжалась по крайней мере до конца измерений. Наконец, 11 ноября в 17^h14^m UT в Боулдере зарегистрирован еще один скачок поля около 12 нТл. Ему предшествовало прохождение через спутник ACE слабой волны, связанной, вероятно, с СМЕ, образовавшимся 9 ноября во время вспышки М8.9. В этот день начался второй период вспышечной активности Солнца, вызванный образованием нового потока пятен в активной области 696. К этому периоду относится и самая интенсивная вспышка X2.5 (10 ноября). Однако эти события не привели к значительным магнитосферным и геомагнитным возмущениям. К 12 ноября параметры солнечного ветра начали восстанавливаться, B_z -составляющая повернула на север, достигнув величины $+5$ нТл, геомагнитное поле возвращалось к норме.

Вспышки сопровождалась выбросами энергичных частиц. Поток протонов с энергией $E_p > 10$ МэВ наблюдался с 19^h10^m UT 7 ноября до 16^h00^m UT 13 ноября. Плотность потока достигла максимума $4.6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ 8 ноября в 01^h15^m

UT. Усиление потока протонов с $E_p > 100$ МэВ зафиксировано в ночь 7/8 ноября. Эти события были связаны со вспышкой X2.0 7 ноября. 10 ноября наблюдалось новое вторжение высокоэнергичных протонов, выброс которых сопровождал вспышку X2.5 в 02^h13^m UT. При этом второй максимум плотности потока протонов с $E_p > 10$ МэВ был зафиксирован 10 ноября в 16^h55^m UT, а поток протонов с $E_p > 100$ МэВ наблюдался с 03^h20^m UT до 12^h50^m UT. Плотность потока электронов с энергиями $E_e > 2$ МэВ имела высокие значения. Наибольшие высыпания электронов наблюдались в ночь 8/9, 9/10 ноября и днем 10 ноября.

Колебания H_p во время магнитной бури были значительны (от 0 до 240 нТл) и коррелировали с вариациями динамического давления солнечного ветра p_{sw} (рис. 1). На фоне магнитных возмущений 7—10 ноября зарегистрирована последовательность интенсивных суббурь, при которых авроральный индекс AE достигал значения 1500—2500 нТл, тогда как перед началом бури 7 ноября $AE \approx 0$. Видно, что энергия, передаваемая солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени (энергетическая функция Акасофу ϵ), достигала высоких значений $\epsilon \approx 600$ и 150 ГДж/с во время первой и второй бурь соответственно. Заметим для сравнения, что во время двух сильных магнитных бурь 25 сентября 1998 г. и 29—30 мая 2003 г. ($K_{p \max} = 8.3$) поступления энергии в магнитосферу Земли были значительно меньшими ($\epsilon \approx 100$ и 75 ГДж/с).

Геомагнитная буря. На рис. 2 представлены временные вариации горизонтальных составных геомагнитного поля H и D , зарегистрированные магнитометром-флюксометром ХНУ с временным разрешением 0.5 с, а также вариации их средних квадратичных отклонений σ_H и σ_D с часовым усреднением. Как и следовало ожидать, наиболее сильные возмущения геомагнитного поля в районе г. Харькова наблюдались во время главной фазы магнитных бурь. При этом максимальные значения σ_H увеличились в четыре и семь, а σ_D — в 23 и 26 раз во время первой и второй бурь соответственно. Высокое временное разрешение магнитометра позволило уточнить моменты начала отдельных бурь, связанных с приходами серии облаков СМЕ. В районе г. Харько-

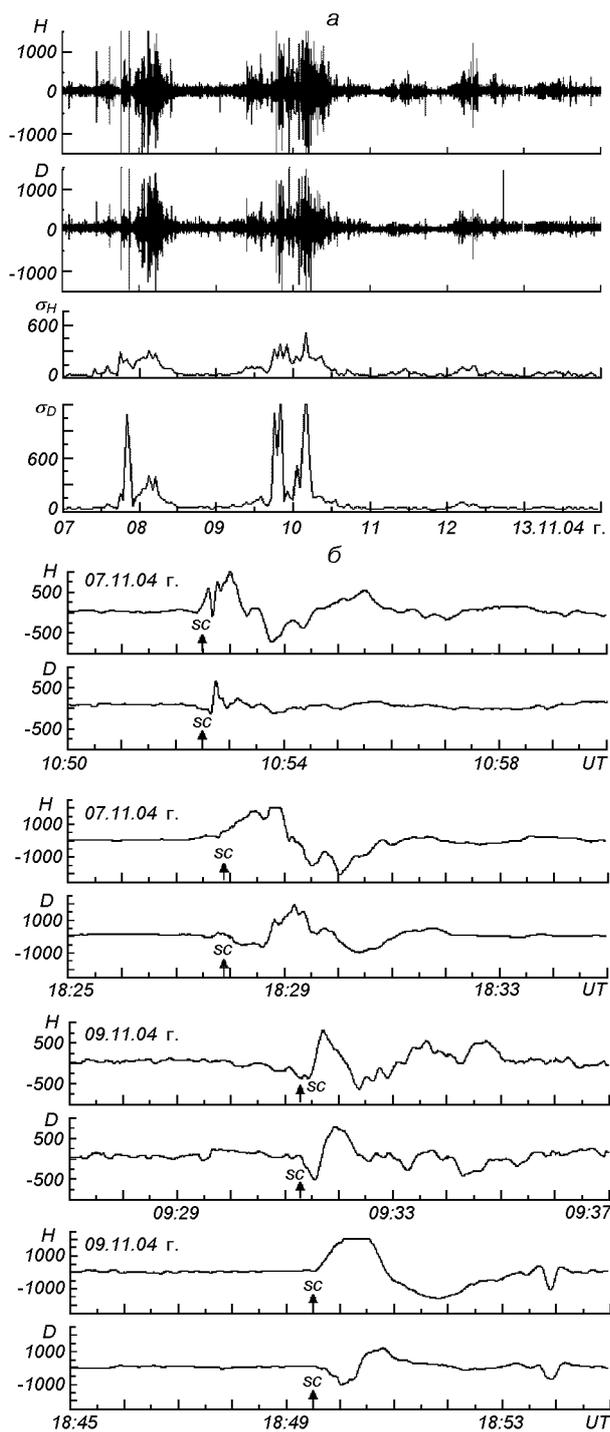


Рис. 2. Вариации H -, D -компонентов геомагнитного поля (в относительных единицах): a — измерения с временным разрешением 0.5 с и их стандартных отклонений σ_H , σ_D (с часовым усреднением); b — данные магнитометра-флюксметра (разрешение 0.5 с) для магнитных бурь 7 и 9 ноября 2004 г.

ва они были зарегистрированы, например, 7 ноября в $10^h52^m30^s$ и $18^h27^m50^s$ UT, а 9 ноября — в $09^h31^m25^s$ и $18^h49^m30^s$. Этим моментам SC предшествовали прохождения ударных волн, зарегистрированные на спутнике ACE 7 ноября в 10^h00^m и 17^h55^m , а 9 ноября в 09^h13^m и 18^h18^m . Учитывая расстояние от Земли до спутника, равное примерно 1.5 млн км, можно оценить скорости распространения возмущений СВ, которые составили около 470, 760 и 790 км/с 7 ноября в $10^h52^m30^s$, $18^h27^m50^s$ и 9 ноября в $18^h49^m30^s$ соответственно. Отличия полученных оценок скоростей V_{sw} от измеренных на спутнике не превышали 10 %.

ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ

Магнитные бури сопровождались отрицательным ионосферным возмущением, которое наблюдалось от начала и до конца измерений. Отклонение δf_0F2 критической частоты слоя F2 от значений в спокойный день достигло -60% в полуденные часы 8 и 10 ноября, когда геомагнитная активность была наиболее высокой. В качестве контрольных данных взяты усредненные значения f_0F2 за 28—30 октября 2004 г. ($A_p = 3, 3, 17$). Для радара НР в Харькове ($\lambda = 36.3^\circ$ E) местное время $LT \approx UT + 02^h25^m$. В утренние часы 9 ноября δf_0F2 уменьшилось и приблизилось к нулю вблизи полудня. В последующие сутки 11 и 12 ноября дневные значения δf_0F2 оставались отрицательными на уровне -30 и -20% , а ночью 8—12 ноября они составляли $-40, -45, -60, -40, -20\%$ соответственно.

Вариации концентрации электронов $NmF2$ в максимуме слоя F2. Интенсивность ионосферной бури сильно изменялась (рис. 3). Наибольшее уменьшение $NmF2$ по сравнению с контрольным днем составило семь раз вблизи полудня 8 ноября, сразу после главной фазы первой бури при $K_p = 7.0$, шесть раз — в дневные часы 10 ноября на фоне главной фазы второй бури при $K_p = 8.3-8.7$. Уменьшение $NmF2$ до шести раз отмечалось также в ночь 10—11 ноября во время фазы восстановления второй бури при значениях $K_p = 5.3-4.0$.

Наличие двух максимумов во временном ходе $NmF2$ для спокойных суток 28—30 октября сви-

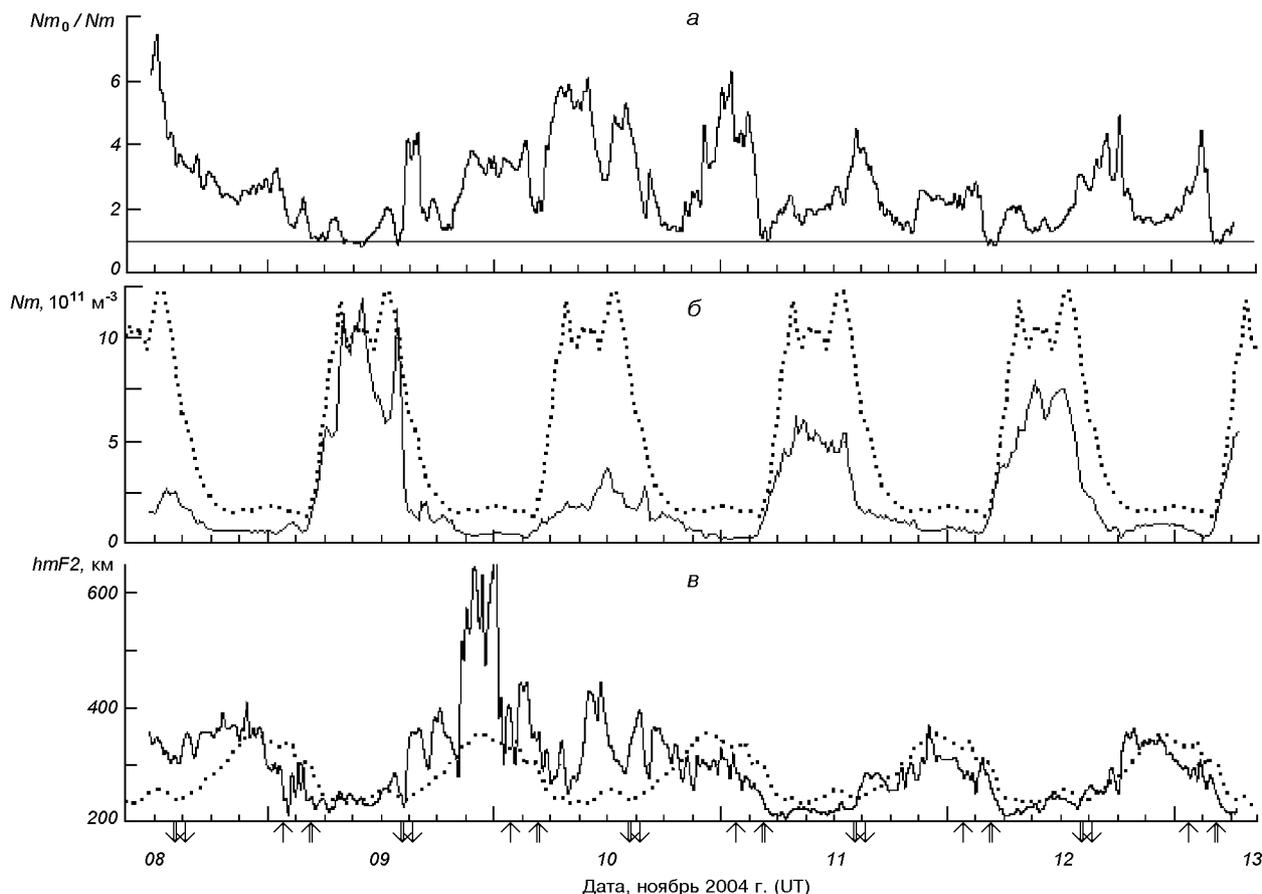


Рис. 3. Вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2: *a* — отношение концентраций в магнитоспокойный день 28—30 октября 2004 г. и возмущенные сутки 8—13 ноября 2004 г., *б, в* — значения концентрации $NmF2$ и высоты максимума $hmF2$ в контрольный день (пунктир) и возмущенные сутки (сплошная линия). Здесь и далее стрелки обозначают моменты восхода (вверх) и захода (вниз) Солнца на поверхности Земли в Харькове (двойная) и в магнитосопряженной точке (одинарная)

детельствует о неполном переходе к зимнему сезону. В то же время амплитуда суточных вариаций $NmF2$ составляла шесть раз и в большей степени соответствовала особенностям зимней ионосферы. Видно, что вечерний максимум $NmF2$ сопоставим с дневным, что характерно для спада СА.

На рис. 4 приведены вариации N_e на высотах 200—650 км. Видно, что с увеличением высоты вклад процессов диффузии в вертикальное распределение N_e в течение бури изменялся.

Вариации высоты $hmF2$ максимума слоя F2 в рассматриваемые дни показаны на рис. 3, б. В спокойные сутки высота изменялась при-

мерно от 230 днем до 350 км ночью. Во время бури наблюдался подъем слоя F2, который составил около 80 км днем 8 ноября, почти 300 км в ночь 9/10 ноября и 150—180 км в полдень 10 ноября.

Высотные распределения концентрации электронов в области F2 ионосферы. На рис. 5—7 приведены высотные профили N_e в последовательные моменты времени (через 15 мин) в течение главной фазы второй бури, а именно в ночь 9—10 ноября и днем 10 ноября ($K_p \geq 8$). Видно, что в течение продолжительного времени наблюдалась деформация профилей $N_e(h)$. Сопоставление их с данными ионозонда

показало, что при сильных деформациях профилей $N_e(h)$ на ионозонде были зарегистрированы ионограммы, характерные для высокоширотной ионосферы (рис. 6 и 7). Это проявилось, в частности, в увеличении диффузности отражен-

ного сигнала.

Когерентное эхо. Редким для средних широт эффектом явились зарегистрированные в период главной фазы второй бури когерентные отражения, примеры которых приведены на рис. 8. Сигналы наблюдались 9 ноября примерно с 16^h12^m UT до 21^h30^m UT и 10 ноября около 02^h30^m UT, а также с 09^h15^m UT до 11^h15^m UT в интервале дальностей около 650—1500 км. Мощность эхо-сигналов изменялась в широких пределах, временами она на два порядка превышала мощность НР-сигнала. Иногда на профиле $N_e(h)$ наблюдались два эхо-сигнала, например, на дальностях 750 и 1400 км.

Необычные профили $N_e(h)$ (полученные с накоплением 1 мин) были зарегистрированы вблизи полудня 10 ноября с 11^h02^m UT до 11^h14^m UT. Они имели два дополнительных максимума (отражения) на высотах около 700 км (см. рис. 7 и 8) и 1100 км (рис. 8), соизмеримые с основным максимумом. Отражения возникли внезапно, наблюдались около 15 мин и так же внезапно исчезли. Следует отметить, что в это же время на ионограмме ВЗ над Харьковом наблюдался диффузный след, который был виден также примерно 15 мин (рис. 7).

Вариации температуры электронов T_e и ионов T_i в контрольные сутки 29 октября 2004 г. и во время бури 8—13 ноября 2004 г. показаны на рис. 9. Видно, что в спокойных условиях на высотах 250—750 км значения T_e изменялись примерно от 700—1400 К ночью до 1400—2500 К около полудня, а T_i — от 700—1100 К до 1000—1800 К. Во время бури 8 и 10 ноября вблизи местного полудня при низких значениях $NmF2 \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ температура T_e увеличилась примерно до 1800—3200 К за счет

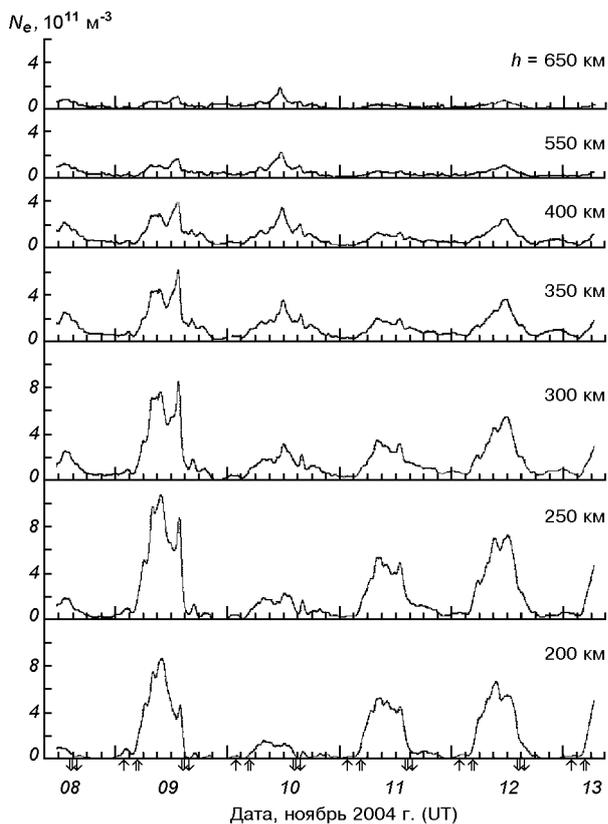


Рис. 4. Вариации электронной концентрации N_e на фиксированных высотах 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

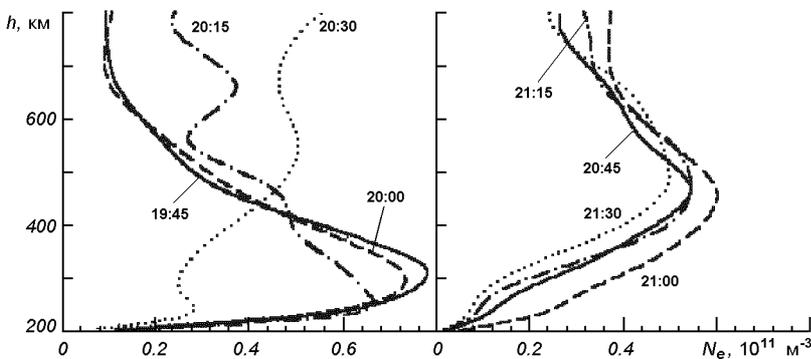


Рис. 5. Высотные профили N_e , полученные 9 ноября с 15 мин накоплением сигнала, в последовательные моменты времени UT в течение главной фазы второй магнитной бури

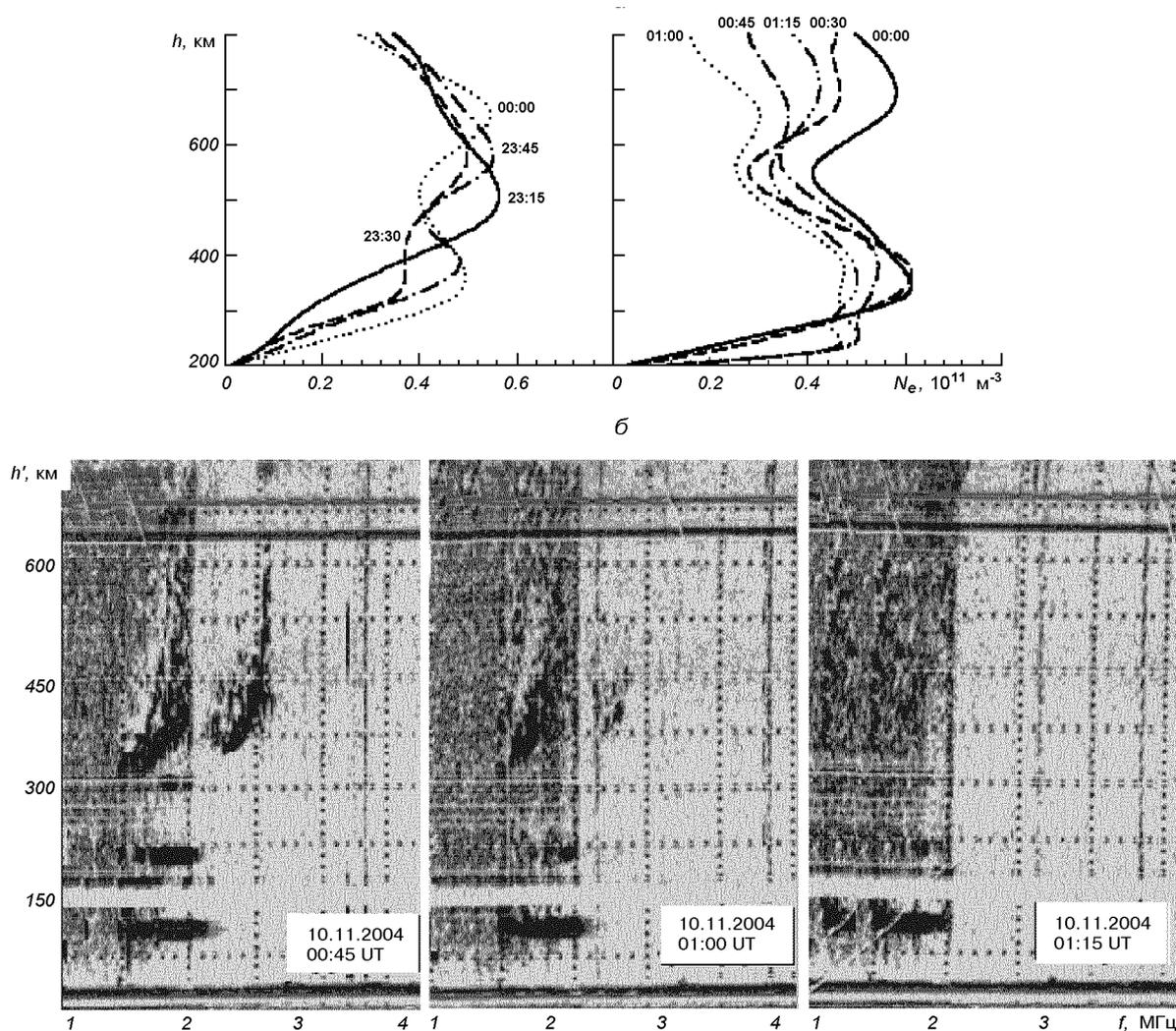


Рис. 6. Последовательные профили $N_e(h)$ (а) и ионограммы (б), полученные 9/10 ноября в течение главной фазы второй магнитной бури

уменьшения скорости охлаждения электронного газа в кулоновских соударениях с ионами, которая пропорциональна N_e^2 .

Необычный ночной нагрев плазмы на фоне низких значений N_e , когда температура T_e достигла дневных значений 1600—3000 К на высотах 250—750 км, отмечался ночью 8/9, 9/10, 10/11 и 11/12 ноября. Характер ночного нагрева электронов и его продолжительность в течение ночи изменялись. Температуры T_i в ночное время также увеличились до дневных значений около 1300—2000 К. Это происходило ночью

8/9, 9/10, 10/11, а также в период восхода Солнца 12 ноября. Необычный ночной нагрев плазмы в основном сопутствовал глубокой депрессии концентрации электронов на высотах области F2 (см. рис. 3, а и 9), что могло свидетельствовать об общей природе этих возмущений.

Полное электронное содержание. Рис. 10 иллюстрирует вариации полного электронного содержания (ПЭС) I в спокойные сутки 28—30 октября 2004 г. и во время бури. Значения ПЭС рассчитывались в интервале высот от 100

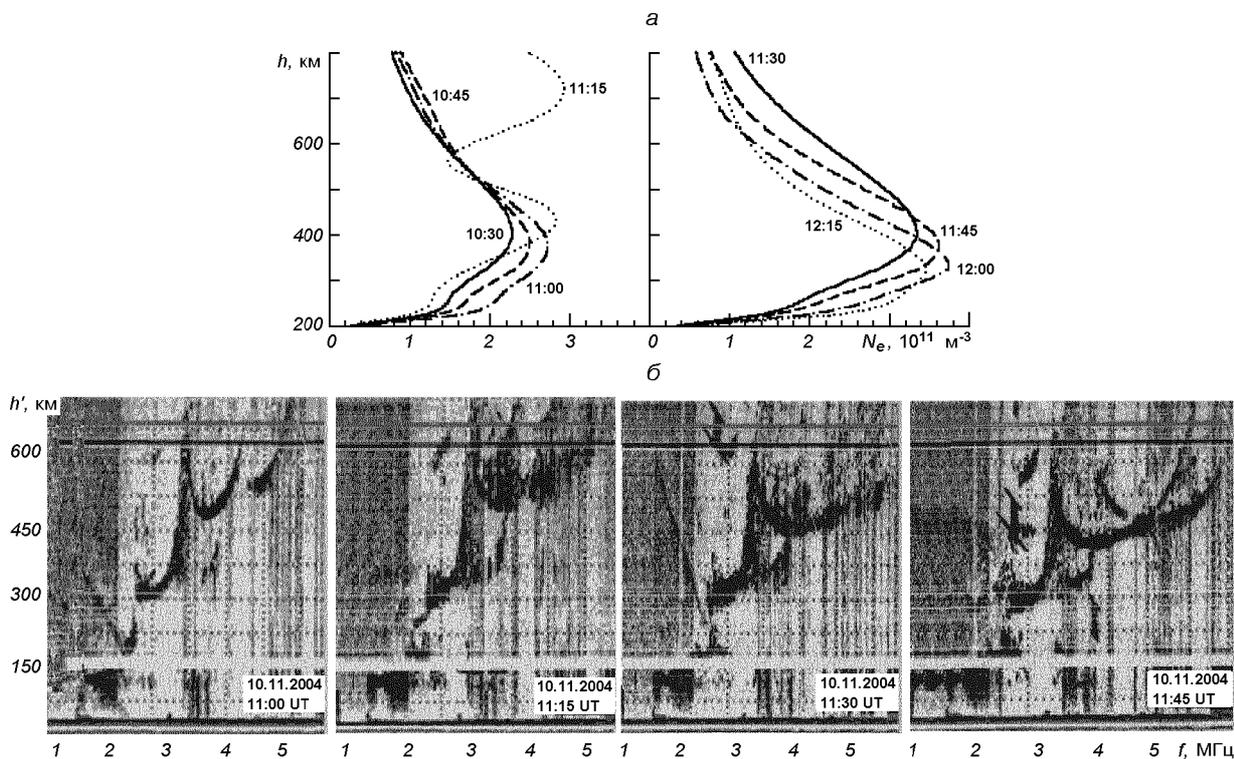


Рис. 7. То же для 10 ноября (при $K_p = 8.3$)

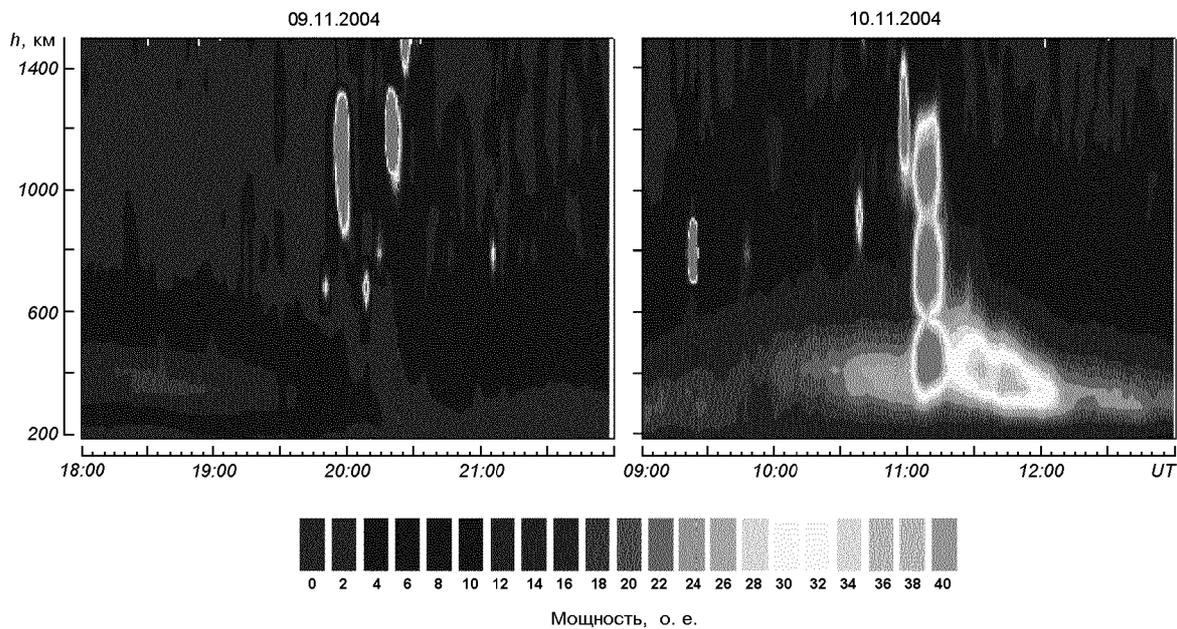


Рис. 8. Когерентные эхо во время магнитной бури 9/10 ноября 2004 г. Данные усреднены по высоте (дальности) с нарастающим шагом от 30 км на высоте 240 км до 160 км на высоте 1350 км. Усреднение по времени скользящее на интервале 3 мин с шагом 1 мин

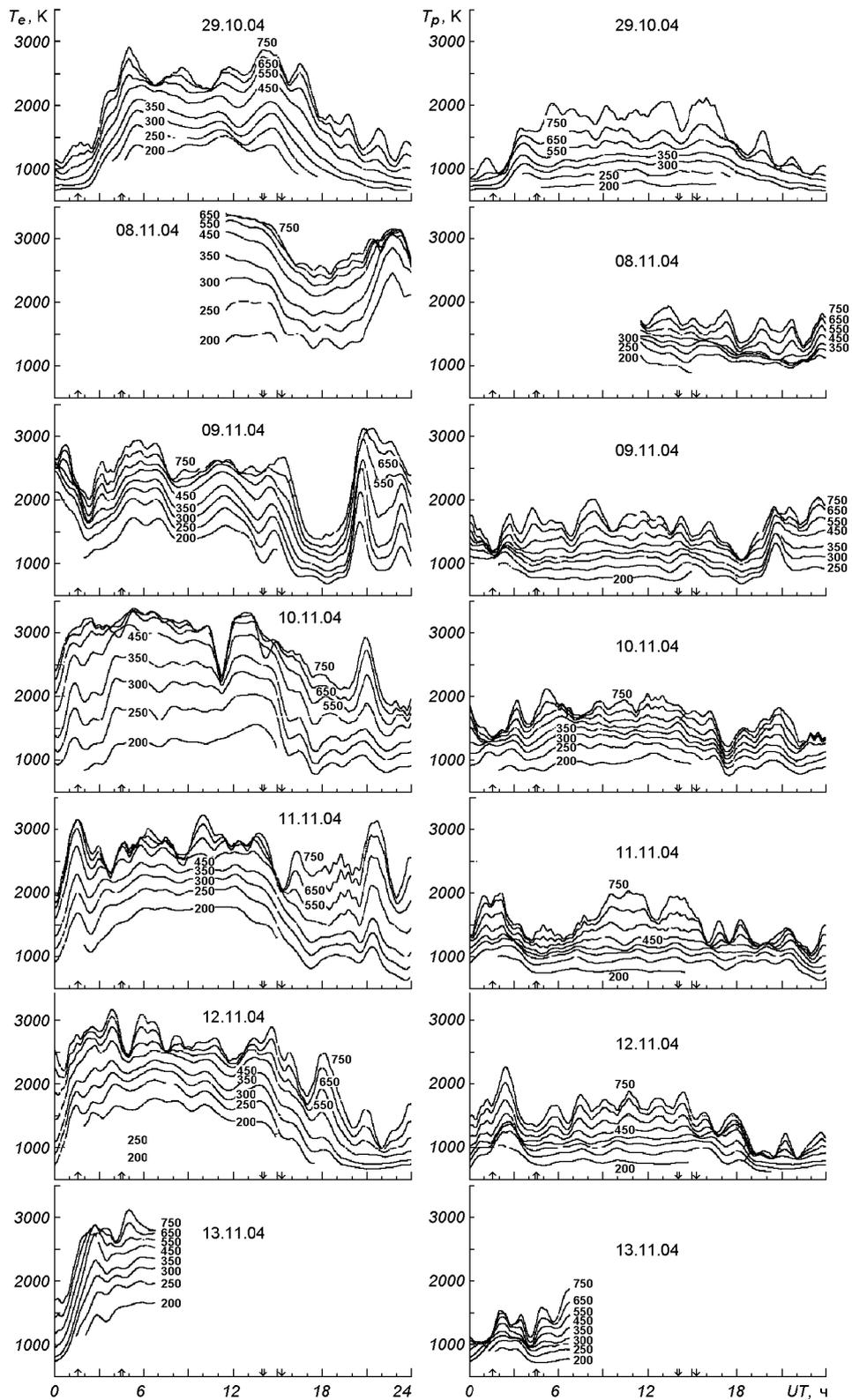


Рис. 9. Вариации температур электронов T_e и ионов T_i на разных высотах h (числа у кривых, км) в магнитоспокойный день 29 октября и возмущенные сутки 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

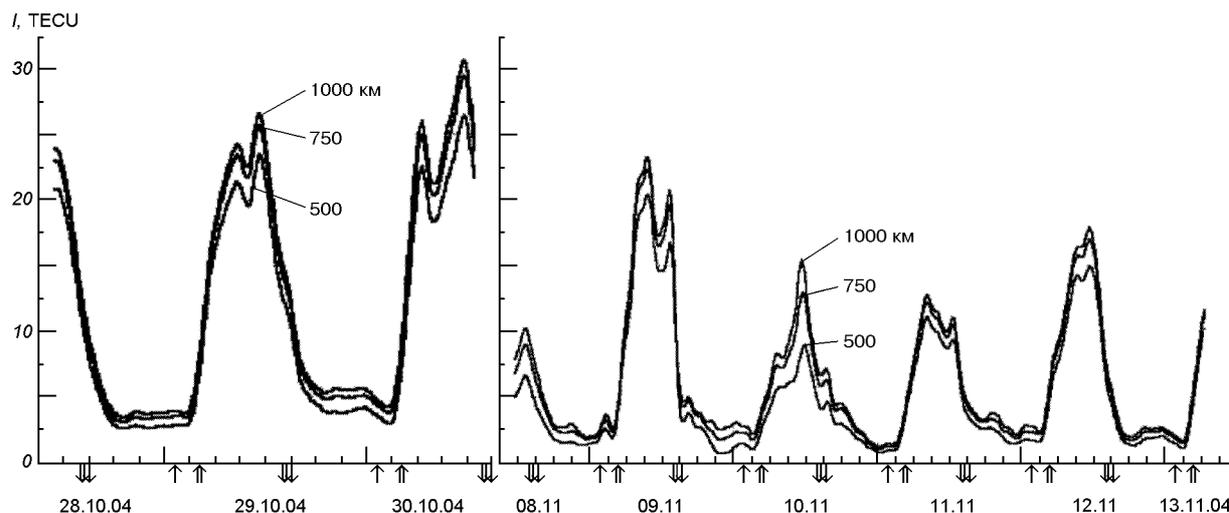


Рис. 10. Вариации полного электронного содержания до высот 500, 750 и 1000 км в спокойные сутки 28—30 октября и в возмущенный период 8—13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

до 500, 750 и 1000 км в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). В спокойных условиях значения ПЭС плавно нарастают с наступлением местного восхода Солнца, достигнув максимальных значений вблизи полудня $I \approx 24 \text{ TECU}$ (до высоты 1000 км). Далее ПЭС плавно уменьшалось к ночным значениям. Минимум $I \approx 3.5 \text{ TECU}$ наблюдался перед восходом Солнца. Значительные суточные вариации I (около семи раз) характерны для зимних условий. В возмущенный период на фоне депрессии $NmF2$ зарегистрировано уменьшение значений I по сравнению с данными 29 октября. Вблизи местного полудня они уменьшались в 2, 2, 1.7 и 1.2 раза соответственно 8, 10, 11 и 12 ноября, а вблизи полуночи — примерно в 2.5 раза. 9 ноября, во время фазы восстановления первой магнитной бури, дневное значение I превысило его значение в контрольный день.

Вариации ионного состава во внешней ионосфере. Поведение относительной концентрации ионов водорода $N(\text{H}^+)/N_e$ на фиксированных высотах для спокойных и возмущенных условий показаны на рис. 11, а. Видно, что в спокойные сутки поведение $N(\text{H}^+)/N_e$ было типичным для зимнего сезона средней СА. Величина $N(\text{H}^+)/N_e$ нарастала после захода Солнца, достигла наибольшего значения вблизи местной полуночи, и при восходе Солнца начала умень-

шаться. Например, на высоте 1100 км ее максимальное ночное значение составило 0.9. Особенности регулярных сезонно-суточных и солнечно-циклических вариаций $N(\text{H}^+)/N_e$ в ионосфере над Харьковом описаны нами в работах [2, 9, 12].

В возмущенные сутки поведение $N(\text{H}^+)/N_e$ имело сложный характер. Известно, что оно отражает особенности вариаций таких параметров верхней атмосферы, как концентрация ионов O^+ , атомов водорода H , температура нейтралов, а также поток ионов H^+ на верхней границе рассматриваемой области и критический поток H^+ . Кроме того, наблюдались уменьшения («провалы») значений $N(\text{H}^+)/N_e$ ночью 9, 10, 11 и 12 ноября, которые составляли 1.5—3.5 раза на высоте 1100 км. Они имели разную продолжительность во времени. Из рис. 3, а, 9 и 11 видно, что возмущения ионного состава наблюдались почти одновременно с возмущениями концентрации электронов и температуры плазмы. На рис. 11, б приведены временные вариации высоты h_t перехода от ионов O^+ к ионам H^+ , где $N(\text{O}^+) = N(\text{H}^+)$. В спокойных условиях h_t изменялась плавно, достигая днем 1200—1300 км, а ночью около 650 км. При высокой геомагнитной активности 8 и 10 ноября днем h_t увеличилась до 1500 км, т. е. примерно на 200 км. В слабо возмущенные сутки 9 и 12

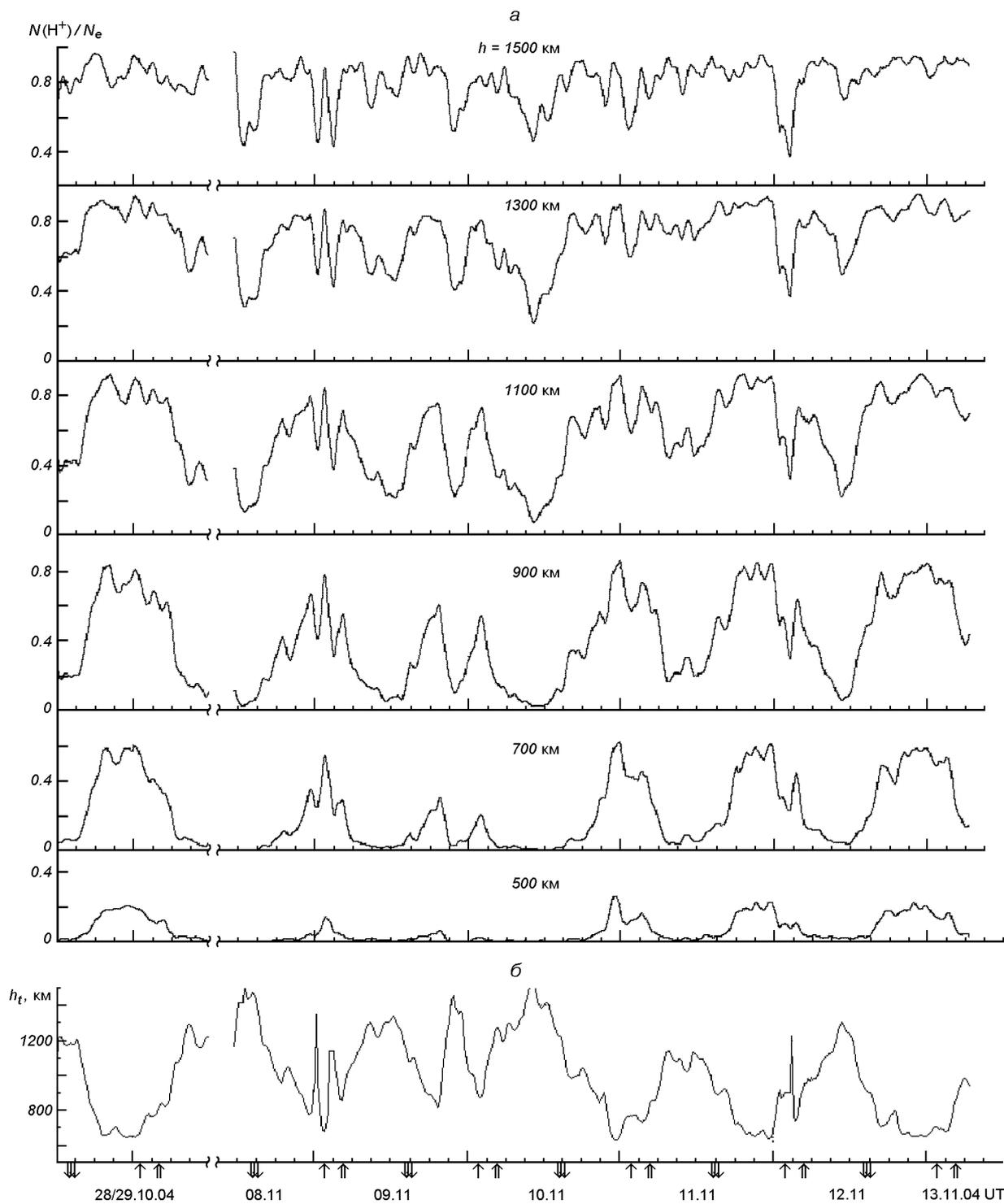


Рис. 11. Вариации в контрольные сутки 28–29 октября и в возмущенный период 8–13 ноября 2004 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин): *a* — относительная концентрация ионов водорода $N(H^+)/N_e$ на фиксированных высотах, *б* — высоты h_v , где $N(O^+) = N(H^+)$

ноября она приблизилась к значению в спокойный день (1300 км), а 11 ноября была на 100—200 км меньше. На плавные вариации высоты h_i накладывались ее быстрые увеличения, которые имели разную продолжительность и величину и соответствовали описанным выше «провалам» значений $N(H^+)/N_e$.

ВЫВОДЫ

Проведены ионосферные наблюдения во время сильнейшей магнитной бури, которая состояла из двух последовательных магнитных возмущений 7/8 и 9/10 ноября 2004 г. со значениями индексов: $A_p = 189$ и 181 , $D_{stmin} = -373$ и -289 нТл, $K_{pmax} = 8.7$ и 8.7 . Буря была связана с высокой вспышечной активностью Солнца, необычной для перехода к фазе минимума солнечного цикла.

1. Зарегистрированы эффекты сильного отрицательного ионосферного возмущения, в том числе уменьшение концентрации электронов $NmF2$ в максимуме слоя F2 до 6–7 раз во время главной фазы бури.

2. Во время бури наблюдался необычный ночной нагрев плазмы до дневных значений температур $T_i = 1300—2000$ К и $T_e = 1600—3000$ К на высотах 250—750 км.

3. Зарегистрировано увеличение высоты $hmF2$ максимума слоя F2 в активные периоды бури примерно на 300 км ночью и на 150—180 км в дневное время.

4. Сопоставление высотных профилей концентрации электронов, полученных из данных ИР, с ионограммами вертикального зондирования показало, что во время магнитной бури ионосфера средних широт приобретала свойства, характерные для высокоширотной ионосферы. К их числу относится, в частности, увеличение диффузности отраженного сигнала.

5. Во время главной фазы второй магнитной бури зарегистрированы среднширотные когерентные эхо-сигналы, обусловленные, по-видимому, генерацией двухпоточковой неустойчивости плазмы в области E ионосферы.

6. Зарегистрировано редкое для средних широт событие, когда днем наблюдались когерентные отражения на расстоянии 700—1100 км. При этом на ионограмме вертикального зонди-

рования над Харьковом зарегистрировано диффузное рассеяние. Когерентные отражения и диффузный след (на ионограмме) возникли внезапно и просуществовали около 15 мин.

7. Получено, что полное электронное содержание во время главной фазы бури уменьшилось по сравнению с контрольным днем в два раза вблизи полудня и в 2.5 раза около полудня.

8. Зарегистрированы уменьшения («провалы») значений относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ на фиксированных высотах во время главной фазы бури по сравнению с контрольным днем (в 1.5—3.5 раза). Возмущения ионного состава коррелировали во времени с возмущениями концентрации электронов и температуры плазмы.

1. Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Перевалова Н. П., Ратовский К. Г. Крупномасштабные возмущения аврального происхождения во время магнитных бурь 29—31 октября 2003 г. и 7—11 ноября 2004 г. по данным сети GPS и ионозондов // Геомагнетизм и аэронавигация.—2006.—46, № 5.—С. 627—636.
2. Боговский В. К., Григоренко Е. И., Таран В. И. Солнечно-циклические вариации концентрации ионов водорода во внешней ионосфере // Космічна наука і технологія. Додаток до журналу.—2003.—9, № 2.—С. 164—172.
3. Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // Радиопизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 163—180.
4. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэронавигация.—2003.—43, № 6.—С. 770—787.
5. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники.—2003.—№ 9.—С. 57—94.
6. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности ионосферной бури 20—23 марта 2003 г. // Геомагнетизм и аэронавигация.—2005.—45, № 6.—С. 789—802.
7. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Таран В. И. и др. Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30—31 мая 2003 года // Геомагнетизм и аэронавигация.—2005.—45, № 6.—С. 803—823.
8. Ермолаев Ю. И., Зеленый Л. М., Застенкер Г. Н. и др. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэронавигация.—2005.—45, № 6.—С. 723—765.

9. Кияшко Г. А., Григоренко Е. И. Особенности высотно-временного распределения ионов водорода над Харьковом // Вестник Харьков. ГПУ.—2000.—Вып. 103.—С. 45—47.
10. Козырева О. В., Клейменова И. Г., Корнилова Т. О. и др. Необычная пространственно-временная динамика геомагнитных возмущений в главную фазу сверхсильной магнитной бури 7—8 ноября 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия.—2006.—46, № 5.—С. 614—626.
11. Полев Н. М., Пирог О. М., Воейков С. В. и др. Ионосферные возмущения в восточно-азиатском регионе во время геоактивного периода в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия.—2006.—46, № 5.—С. 627—636.
12. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
13. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Ionosphere wave-like disturbances (WLD) following the September 23, 1998 Solar flare from Kharkiv incoherent scatter radar observations // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science: Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC); Maastricht the Netherlands, 17—24 August 2002. — Maastricht, 2002.—P. 2278.
14. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the September 25, 1998 magnetic storm from Kharkiv incoherent scatter radar data // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science: Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC), Maastricht the Netherlands, 17—24 August 2002. — Maastricht, 2002.—P. 2280.
15. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P., et al. Ionospheric perturbations caused by quasi-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm // EOS Trans. AGU. 81 N 48. Fall Meeting. F 947. — San Francisco, 2000.
16. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., Taran V. Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event Sep 25, 1998 // EOS Trans. AGU. 82 No. 20. Spring Meeting. S 291. San Francisco. USA. May 15. 2001.

IONOSPHERIC PROCESSES DURING THE 7—10 NOVEMBER 2004 EXTREME GEOSPACE STORM.
1. OBSERVATION RESULTS

Ye. I. Grigorenko, L.Ya. Emelyanov, S. A. Pazura, L. F. Chernogor

The study results of the F2 region and topside ionosphere behaviour during the 7—10 November 2004 geospace storm that arises from the imposition of two consistent extreme magnetic disturbances ($K_p \text{ max} = 8.7$) are presented. The observations were carried out with the Kharkiv incoherent scatter radar. Substantial effects of negative ionosphere disturbance were detected. Among them were the decrease in the F2 layer peak electron density by a factor of 6—7 and in the total electron content below 1000 km height by a factor of 2, uplifting in the ionosphere F2 layer height by about 300 km during the night and by 150—180 km in the daytime, unusual night heating of plasma with increase of ion and electron temperatures by up to 2000 and 3000 K, respectively; decrease of the fractional hydrogen ion density $N(\text{H}^+)/N_e$ by a factor of 3.5 due to the emptying of the magnetic flux tube over Kharkiv. During the main storm phase the effects that are usually peculiar to the high latitude ionosphere including coherent echoes were revealed. The results obtained can point to the shift of large-scale structures of the high latitude ionosphere (auroral oval, main ionospheric trough, hot zone etc.) to the latitudes that are closed to the Kharkiv radar latitude.