

УДК 550.388.2

## ОДНОВРЕМЕННЫЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНОСФЕРНОГО ОТКЛИКА ВО ВРЕМЯ БОЛЬШОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 6 АПРЕЛЯ 2000 г.

© 2002 г. Э. Л. Афраймович<sup>1</sup>, Я. Ф. Ашкалиев<sup>2</sup>, В. М. Аушев<sup>2</sup>, А. Б. Белецкий<sup>1</sup>,  
В. В. Водяников<sup>2</sup>, Л. А. Леонович<sup>1</sup>, О. С. Лесюта<sup>1</sup>, А. В. Михалев<sup>1</sup>, А. Ф. Яковец<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup> Институт ионосферы МОН, Алматы (Казахстан); e-mail: afra@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 20.12.2000 г.

Приводятся результаты измерений основных параметров крупномасштабных перемещающихся возмущений среднеширотной ионосферы в максимальную фазу большой магнитной бури 6 апреля 2000. Изменения полного электронного содержания (ПЭС) получены по данным станций глобальной сети *GPS* в России и в Средней Азии. Одновременные с ПЭС измерения интенсивности свечения верхней атмосферы в линиях атомарного кислорода 557.7 и 630 нм, а также в спектральных диапазонах 360–410 и 720–830 нм проводились с помощью оптического комплекса *FENIX* в obs. ИСЗФ СО РАН (51.9°N, 103.0°E) вблизи Иркутска. Вариации интенсивности эмиссии молекулярного кислорода O<sub>2</sub> 866.5 нм получены с помощью комплекса *MORTI* Института ионосферы МОН РК вблизи Алматы (43.2°N, 77.0°E); там же с помощью стандартного ионозонда были измерены вариации критической частоты и высоты слоя *F2*. Анализ данных показал, что образовавшаяся в результате аврорального возмущения крупномасштабная волна уединенного типа с длительностью порядка 1 ч и шириной фронта не менее 5000 км распространялась в экваториальном направлении на расстояние не менее 1000 км со средней скоростью ~200 м/с. Возмущение ПЭС, отображающее в основном уменьшение концентрации электронов в окрестности максимума слоя *F2*, хорошо коррелирует с возрастанием интенсивности эмиссий в оптическом диапазоне со сдвигом по времени, отличным для различных высот в ионосфере.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

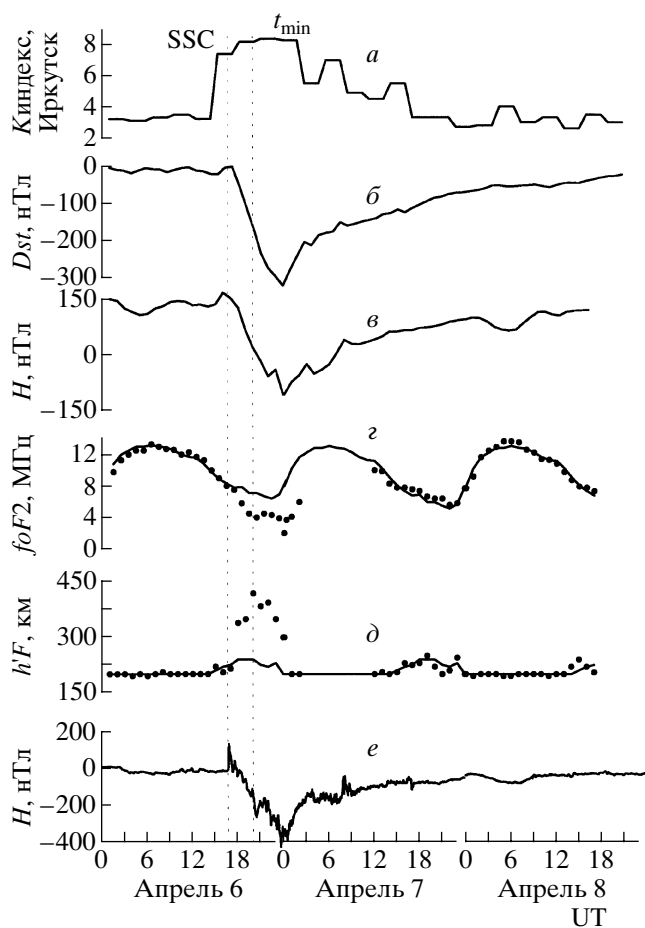
Во время сильных геомагнитных бурь основные структурные элементы магнитосферы и ионосферы подвергаются существенным изменениям в их локализации и динамике. Особый интерес представляют геофизические проявления экстремально больших магнитных бурь, что обусловлено относительно малой вероятностью появления таких событий (не более 4 событий за один солнечный 11-летний цикл), и в силу этого отсутствием представительной статистики по всему комплексу взаимодействующих процессов в системе “магнитосфера–ионосфера”.

Одним из значительных проявлений магнитных бурь на средних широтах являются крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИБ) с характерными временными периодами 1–2 ч и длинами волн 1000–2000 км. Исследованиям крупномасштабных ПИБ посвящено много работ, в том числе ряд обстоятельных обзоров [1, 2]. Считается установленным, что такие ПИБ являются проявлением акустико-гравитационных волн (АГВ), области генерации которых находятся в авроральных зонах северного или южного полушария. Поэтому изучение

крупномасштабных ПИБ может дать важную информацию о процессах в этих зонах в спокойных и возмущенных условиях.

Афраймович и др. [3] впервые разработали метод определения характеристик крупномасштабных ПИБ, основанный на расчете пространственных и временных градиентов электронной концентрации по измерениям полного электронного содержания на трех разнесенных в пространстве станциях *GPS* (*GPS*-решетке). Метод был применен для определения параметров ПИБ во время большой магнитной бури 25 сентября 1998 г. Авторами было показано, что образовавшаяся в результате аврорального возмущения крупномасштабная волна уединенного типа с длительностью ~1 ч и шириной фронта не менее 3700 км распространялась в экваториальном направлении на расстояние не менее 2000–3000 км со средней скоростью ~300 м/с.

Глобальный отклик на магнитную бурю 1989 г. по данным сети ионозондов исследовался в работе [4]. Были отмечены низкоширотные сияния на большом пространстве в северном и южном полушариях. Длительные уменьшения ионизации на средних широтах – наиболее выраженный эф-



**Рис. 1.** Геомагнитная обстановка в Иркутске и Алматы 6–8 апреля 2000 г.  $K$ -индексы на ст. Иркутск (а);  $Dst$ -вариации (б); вариации  $H$ -компонента магнитного поля на станциях Алматы (в) и Иркутска (е); Вариации  $foF2$  (з) и  $h'F$  (д) в г. Алматы – жирные точки, их медианные значения – сплошные линии. Пунктирные вертикальные линии – моменты времени  $SSC$  и  $t_{min}$  – максимальное значение временной производной  $d/dt(Dst)$ .

фект бури. Зона возмущений протягивалась к экватору до геомагнитной широты менее  $10^\circ$  во время максимума главной фазы, вызывая временно подавление экваториальной аномалии.

Поведению эмиссий верхней атмосферы в средних широтах во время геомагнитных возмущений посвящено достаточно большое количество работ [5–7]. Наличие характерных особенностей в спектральных характеристиках эмиссий среднеширотной и низкоширотной верхней атмосферы во время сильных геомагнитных возмущений позволяет выделять такие события в класс “средне- и низкоширотных сияний” [8] отличающихся от “обычных” полярных сияний в высоких широтах. Эти отличия связывают, в частности, с появлением в спектрах свечения среднеширотной атмосферы эмиссий  $N_2^+$  в полосах первой отрицательной системы, [5, 9] существенное усиление

эмиссии атомарного кислорода 630.0 нм и преобладание эмиссий атомарных и ионных линий над молекулярными полосами.

В работе [8] предлагается классификация нескольких типов низкоширотных сияний в зависимости от вида возбуждающих частиц (электроны, ионы, нейтралы), преобладающих эмиссий, локализации и характерных временных масштабов. Утверждается, что во многих случаях на средних и низких широтах могут одновременно проявляться несколько рассматриваемых типов сияний, указывающих, в частности, на появление смеси энергичных электронов и тяжелых частиц. В периоды умеренных геомагнитных возмущений на средних широтах отмечаются колебания интенсивности эмиссии 630 нм длительностью от 0.5 до 2 ч [10, 11]. Особый интерес представляют среднеширотные сияния при очень больших магнитных бурях ( $Kp > 8-9$ ,  $Dst > 300$  нТл), статистика оптических инструментальных наблюдений для которых ограничена.

Целью настоящей работы является исследование отклика среднеширотной ионосферы на большую магнитную бурю 6 апреля 2000 г. по данным одновременных радиофизических и оптических измерений в России и Средней Азии. При этом основное внимание уделяется крупномасштабным ПИВ с характерным временным периодом  $\sim 1$  ч.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ 6–7 АПРЕЛЯ 2000 Г. И ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 представлены  $K$ -индексы для ст. “Иркутск” (а),  $Dst$ -вариации геомагнитного поля (б), вариации  $H$ -компонента магнитного поля на станциях г. Алматы (в) и “Иркутск” (е) во время большой магнитной бури 6–8 апреля 2000 г. Эта буря характеризуется выраженным внезапным началом  $SSC$  в 16.42 UT.  $K$ -индексы в максимуме бури достигали значений 8, сумма  $K$  за сутки составила 48. В 16.00 UT 6 апреля амплитуда  $Dst$  резко поднялась до 0, а затем начала быстро уменьшаться и в 24.00 UT опустилась до  $-319$  нТл. После этого началась фаза восстановления, которая продолжалась до 8 апреля. Пунктирными вертикальными прямыми на рис. 1 отмечены  $SSC$  и момент времени  $t_{min}$ , соответствующий максимальному значению производной  $dDst/dt$  (20.00 UT).

Геометрия эксперимента в географической системе координат представлена на рис. 2. Жирными точками и мелким шрифтом отмечены станции  $GPS$ . На верхней шкале нанесены соответствующие данному долготному интервалу значения местного времени LT для условного момента прихода крупномасштабного возмущения ПЭС на средние широты в 19.00 UT (см. раздел 3). Ромбиками и крупным шрифтом отмечено положение

оптических комплексов *MORTI* (вблизи Алматы и ст. *SELE*) и *FENIX* (вблизи Иркутска и станции *IRKT*). В Алматы установлен также стандартный ионозонд, данные которого используются в настоящей работе.

К сожалению, несмотря на большое количество станций мировой сети *GPS*, в интересующем нас регионе мы смогли использовать данные только 11 станций, координаты которых приведены в таблице. Для достоверного определения характеристик крупномасштабных ПИВ необходимо было детектировать их на расстояниях больших, чем ожидаемая длина волны (более 1000 км). Эти соображения также учитывались при выборе *GPS* станций.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПИВ ПО ДАННЫМ СЕТИ *GPS* И ИОНОЗОНДА В Г. АЛМАТЕ

Технология *GPS* предоставляет возможность детектирования волновых возмущений в ионосфере на основе фазовых измерений ПЭС  $I$  в нескольких разнесенных в пространстве двухчастотных приемниках *GPS*. Методы определения относительных изменений ПЭС из измерений приращений фазового пути трансионосферного радиосигнала *GPS*, обусловленных ионосферой, подробно описаны в целой серии публикаций [12, 13, 3]. Мы приведем лишь конечную формулу для фазовых измерений:

$$I_0 = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const} + nL], \quad (1)$$

где  $L_1 \lambda_1$  и  $L_2 \lambda_2$  – приращения фазового пути радиосигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере (м);  $L_1, L_2$  – число полных оборотов фазы, а  $\lambda_1, \lambda_2$  – длины волн (м) для частот  $f_1$  и  $f_2$ ; const – некоторый неизвестный начальный фазовый путь (м);  $nL$  – ошибка в определении фазового пути (м).

Ниже мы будем использовать общепринятую в литературе единицу ПЭС *TECU* (Total Electron Content Unit), равную  $10^{16} \text{ м}^{-2}$ .

В нашем эксперименте первичными данными для вычисления характеристик ПИВ являются ряды значений ПЭС в выбранных пунктах приема, а также соответствующие им ряды значений угла места  $\theta(t)$  и азимута  $\alpha(t)$  луча на ИСЗ, рассчитанные по разработанной нами программе *CONVTEC*, которая преобразует полученные по сети *INTERNET* стандартные для системы *GPS RINEX*-файлы. Для определения параметров ПИВ выбираются непрерывные ряды измерений  $I_0(t)$  длительностью не менее трех часов.

Общие сведения об эксперименте

№	Станция	$\varphi^\circ, \text{N}$	$\lambda^\circ, \text{E}$	$t_{\min}, \text{UT}$	$A_{\min}, \text{TECU}$
1	YAKZ	62.031	129.681	18.383	-4.55
2	ARTU	56.430	58.560	19.000	-4.94
3	KSTU	55.993	92.794	19.000	-3.78
4	ZWEN	55.699	36.759	19.025	-0.95
5	IRKT	52.219	104.316	19.683	-2.28
6	URUM	43.808	87.601	21.017	-0.81
7	SELE	43.179	77.017	20.958	-0.71
8	SHAS	42.621	75.315	20.925	-0.69
9	KUMT	41.863	78.190	20.992	-0.91
10	TRAB	40.995	39.775	20.750	-1.47
11	KIT3	39.135	66.885	21.042	-0.61
12	FENIX	52.9	103.0		
13	MORTI	43.05	76.97		

С целью исключения вариаций регулярной ионосферы, а также трендов, внесенных движением спутника, используется процедура удаления линейного тренда с предварительным сглаживанием исходного ряда с выбранным временным “окном” длительностью  $\sim 60$  мин. Ряды значений угла места  $\theta(t)$  и азимута  $\alpha(t)$  луча на ИСЗ использовались для определения координат подионосферных точек.

Исходные ряды ПЭС  $I_0(t)$  для одного и того же спутника PRN25 в интервале 18.00–22.00 UT для всех станций упомянутого в Таблице 1 набора были приведены к “вертикальному” значению по известной методике [14]

$$I = I_0 \cos \left[ \arcsin \left( \frac{R_z}{R_z + h_{\max}} \cos \theta \right) \right], \quad (2)$$

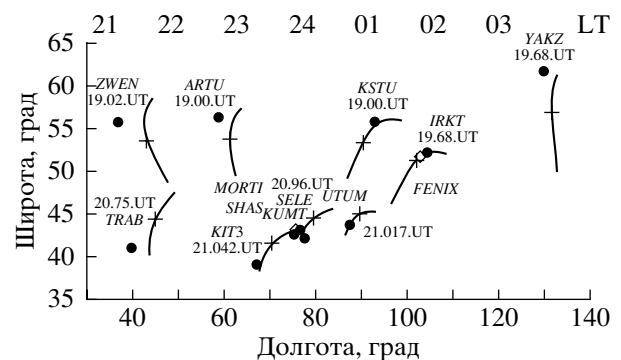
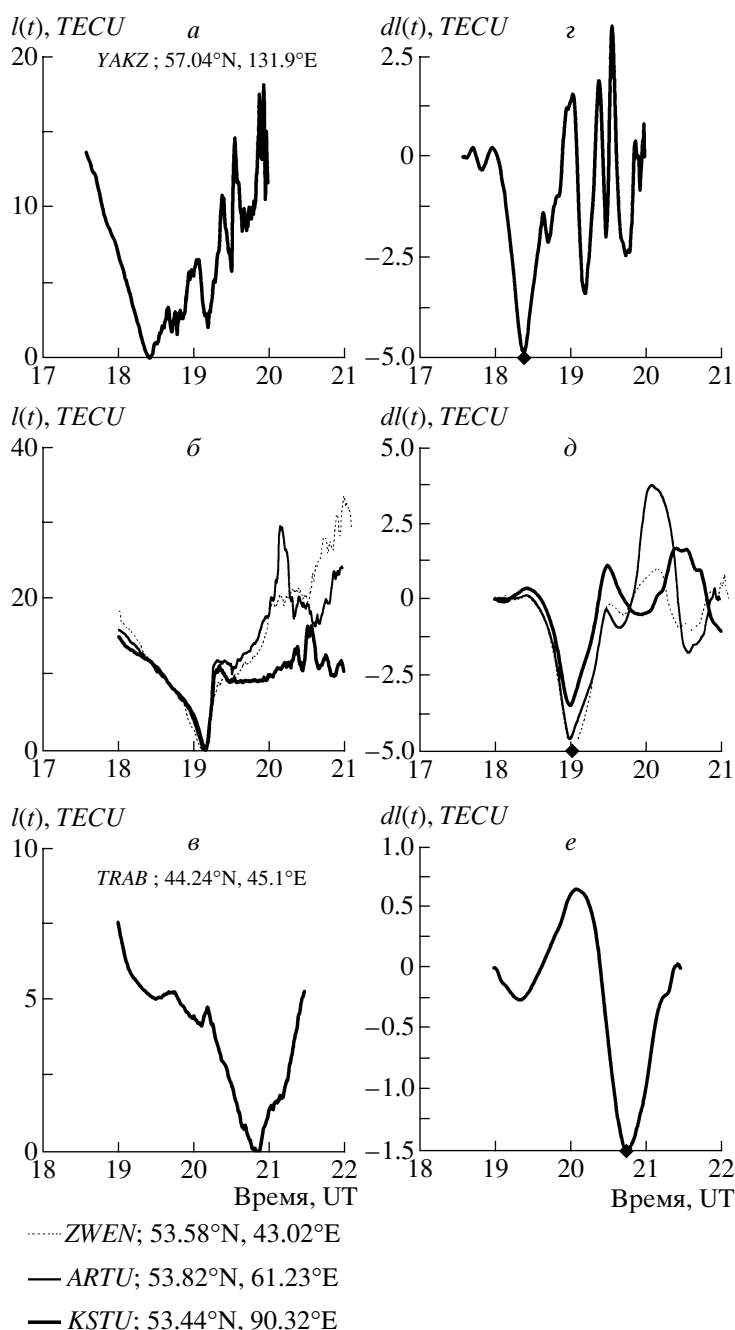


Рис. 2. Геометрия эксперимента. Жирные точки и мелкий шрифт – станции *GPS*. Сплошные кривые – траектории движения подионосферных точек. Крестики на траекториях – положение подионосферных точек в моменты  $t_{\min}$  вариаций ПЭС; рядом даны величины  $t_{\min}$  в долях часа UT. Сверху – значения местного времени (LT). Ромбики и крупный шрифт – положение оптических приборов.



**Рис. 3.** Временные зависимости “наклонного” ПЭС  $I(t)$  для PRN25 на станциях GPS ZWEN, ARTU, KSTU (б) и TRAB (в); вариации ПЭС  $dl(t)$ , со снятым трендом и сглаживанием с временным “окном” 60 мин (д, е). Вариации  $I(t)$  и  $dl(t)$  для PRN30 на станции YAKZ (а, з). Ромбики – моменты  $t_{\min}$  минимума вариаций  $dl(t)$ .

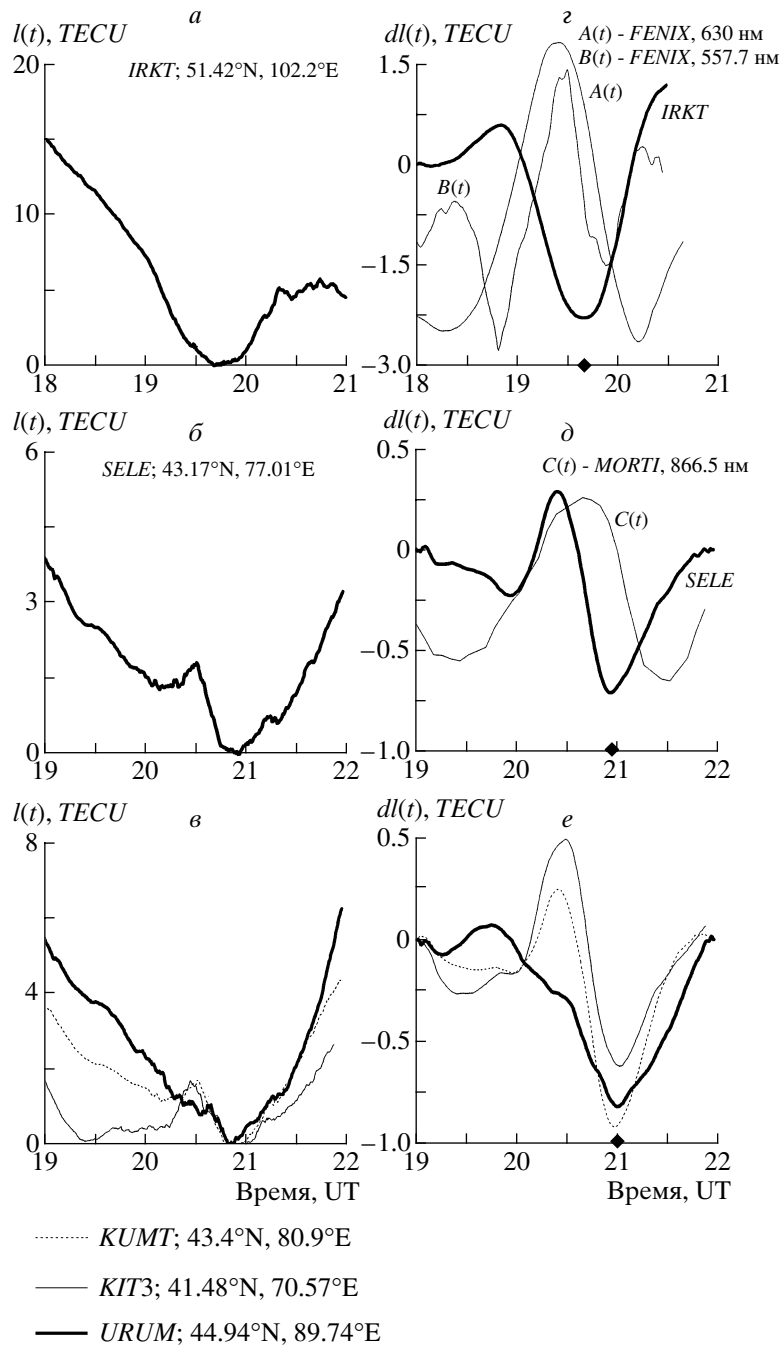
где  $R_z$  – радиус Земли,  $h_{\max} = 400$  км – высота максимума  $F_2$ -слоя.

### 3.1. Крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения по данным GPS

Исходные ряды  $I(t)$ , а также ряды  $dl(t)$  с удаленным трендом, даны на рис. 3 и 4. Для ст. YAKZ по техническим причинам удалось использовать

данные только для PRN30 в интервале 17.00–20.00 UT.

Практически для всех станций GPS можно отметить вначале плавное уменьшение  $I(t)$  до определенного момента времени, меняющегося в соответствии с положением станции в диапазоне 19.00–21.00 UT, а затем прохождение глубокого и резкого минимума в момент времени  $t_{\min}$  (отмечены ромбиками на осях абсцисс рис. 3 и 4 справа) и



**Рис. 4.** То же, что на рис. 3, но для станций GPS IRKT (а, з), SELE (б, д), KUMT, KIT3 и URUM (в, е). Тонкие линии (з) – вариации интенсивности свечения в линиях 630 нм – A(t) и 577.7 нм – B(t). Тонкая линия (д) – вариации интенсивности эмиссии в линии 866.5 нм – C(t).

выраженные глубокие и быстрые вариации ПЭС после пересечения этой временной метки.

Выбор одного и того же спутника PRN25 для всего набора станций (кроме YAKZ) определялся тем, что для этого спутника минимальное значение угла места  $\theta(t)$  луча на ИСЗ для интервала 19.00–21.00 UT превышало  $45^\circ$ , что свело к минимуму возможную ошибку преобразования “наклонного” значения ПЭС в “вертикальное” из-за отклоне-

ния пространственного распределения ПЭС от сферическисимметричного.

На рис. 2 сплошными кривыми отмечены траектории движения подионосферных точек для ИСЗ PRN25 (для YAKZ – PRN30) на высоте  $h_{\max} = 400$  км. Крестики на траекториях отмечают положение подионосферных точек в моменты  $t_{\min}$  минимума вариаций ПЭС (см. рис. 3 и рис. 4); рядом даны величины  $t_{\min}$  в долях часа UT. В таблице для поди-

оносферной точки каждой станции *GPS* занесены значения  $t_{\min}$  и соответствующие этим моментам амплитуды  $A_{\min}$  в единицах *TECU*.

По данным рис. 2 минимум  $dI$  прежде всего отмечается в подионосферной точке для ст. *YAKZ* на широте  $57^\circ\text{N}$  (рис. 3 з), затем практически одновременно на широтах  $\sim 53^\circ\text{N}$  для станций *ZWEN*, *ARTU*, *KSTU* (рис. 3 б, д), разнесенных по долготе на  $47^\circ\text{E}$ , образуя фронт возмущения протяженностью не менее 5000 км. Через 40 мин аналогичное возмущение фиксируется в подионосферной точке для ст. *IRKT* на  $51.5^\circ\text{N}$  (рис. 4 а, з). Спустя примерно 2 ч подобное по форме возмущение  $dI(t)$  отмечается на широтах  $40\text{--}45^\circ\text{N}$ , на которых расположены станции *TRAB* (рис. 3 в, е), *SELE* (рис. 4 б, д), *KITZ*, *KUMT*, *URUM* (рис. 4 в, е).

По данным таблицы и рис. 3, 4 интересно проследить изменение характера возмущения ПЭС с уменьшением широты подионосферной точки. Амплитуда  $A_{\min}$  возмущения  $dI(t)$  заметно уменьшается с продвижением фронта возмущения на юг – от 5 *TECU* на северной цепочке станций до 1 *TECU* на южной цепочке. Кроме того, вслед за резким уменьшением  $I(t)$  на северной цепочке станций наблюдаются быстрые и глубокие вариации  $dI(t)$ , характерные для высокоширотной ионосферы. Аналогичный факт был отмечен и в работе [3]. На южных станциях такие вариации уже существенно слабее.

Возможная интерпретация этих данных заключается в том, что лучи на ИСЗ для станций, расположенных в северной части карты рис. 2, в указанном интервале времени (около 19.00 UT) пересекали южную границу авроральной зоны, движущуюся в южном направлении. Если считать, что фронт возмущения двигался равномерно, то запаздывание появления возмущения на южной цепочке станций порядка двух часов соответствует скорости перемещения в южном направлении  $\sim 200$  м/с.

Похожие результаты с помощью цепочки ионозондов были получены в работах [15, 16]. Ширина фронта возмущения в нашем случае достигает величины 5000 км, что также согласуется с данными [16, 17].

В рамках данной статьи нам важно то, что по всему фронту возмущения, зафиксированного цепочкой станций *ZWEN*, *ARTU*, *KSTU*, *YAKZ*, величина относительного изменения (резкого падения) ПЭС достигла весьма большой величины (от 15 до 20 *TECU*). Согласно представлениям, обобщенным в обзоре [2] и в работе [5], такая протяженная область атмосферы, столь резко выведенная из равновесия за короткий интервал времени, должна стать источником мощных ПИБ, перемещающихся по направлению к экватору. Стоит еще раз отметить, что для этого интервала времени было характерно максимальное значе-

ние производной  $Dst$  (рис. 1 б), что согласуется с аналогичным выводом, сделанным в работе [18].

### 3.2. Вариации критической частоты и действующей высоты слоя F2 в Алмате

На рис. 1 з представлены вариации критической частоты F2-слоя ( $foF2$ ) (жирные точки). Сплошными линиями показаны текущие медианы, определенные методом, в котором используются значения  $foF2$  за три месяца [19]. День, предшествующий магнитной буре, был магнитоспокойным, и значения  $foF2$  были близки к медианным. Главная фаза магнитной бури совпала с ночным временем в Алмате. Видно, что уменьшение критической частоты относительно медианных значений, отражающее уменьшение электронного содержания в максимуме слоя, началось вскоре после начала бури, и максимальная разница между текущим значением  $foF2$  и текущей медианой имела место в момент максимума производной  $dDst/dt$ . Увеличение  $foF2$ , начавшееся с появлением солнечного ионизирующего излучения, отставало по фазе от увеличения медианных значений примерно на два часа. К сожалению, после 02.00 UT отсутствуют данные зондирования за 7 ч по техническим причинам, поэтому существует некоторая неопределенность в установлении момента времени, когда текущее значение  $foF2$  снова стало близко к медиане.

На рис. 1 д жирными точками представлены временные вариации действующей высоты  $h'F$ . Здесь также сплошная линия показывает поведение текущей медианы  $h'F$ . Из рисунка видно, что резкое увеличение  $h'F$  относительно текущих медианных значений началось одновременно с уменьшением  $foF2$ . Восстановление  $h'F$  произошло в 01.00 UT. В это время критическая частота равнялась 6 МГц при медианном значении 11 МГц. Резкое уменьшение критической частоты в период главной фазы магнитной бури вполне согласуется с глубоким отрицательным возмущением ПЭС, отмеченным на сети станций *GPS* (рис. 4).

Таким образом, рассматриваемая магнитная буря сопровождалась необычайно большим уменьшением электронного содержания в максимуме F-слоя, которое привело к уменьшению  $foF2$  на 4–5 МГц. Понижение электронного содержания сопровождалось значительным увеличением действующей высоты F-слоя.

## 4. ДАННЫЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

### 4.1. Крупномасштабные возмущения интенсивности эмиссий в Иркутске

Оптический комплекс *FENIX* расположен в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН на удалении 100 км от г. Иркутска ( $51.9^\circ\text{N}$ ,  $103.0^\circ\text{E}$ ,

геомагнитная широта  $41.0^\circ\text{N}$ ,  $L = 2$ ) и включает в себя четырехканальный зенитный фотометр и высокочувствительную телевизионную систему на базе электронно-оптического усилителя и *CCD* (charge coupled device)-камеры.

Фотометрические измерения проводились нами в линиях атомарного кислорода 557.7 и 630 нм и в спектральных диапазонах 360–410 и 720–830 нм. Высоты высвечивания эмиссий 557.7 и 630 нм в невозмущенных условиях составляют 85–115 км с максимумом на 97 км и 160–300 км с максимумом на 250–270 км соответственно. В спектральном диапазоне 360–410 нм в невозмущенных условиях основной эмиссионной компонентой излучения ночной верхней атмосферы в средних широтах являются электронные полосы  $\text{O}_2$  с максимумом излучения на 97 км, в спектральном диапазоне 720–830 нм – излучение молекул гидроксила  $\text{OH}$  (высоты высвечивания 75–115 км, максимум 85–90 км).

Эмиссионные линии 557.7 и 630 нм выделялись с помощью качающихся интерференционных светофильтров с характерными полуширинами 1–2 нм. Спектральные диапазоны 360–410 и 720–830 нм выделялись абсорбционными светофильтрами. Угловые поля зрения каналов фотометра составляли  $4\text{--}5^\circ$ . Абсолютная калибровка измерительных трактов аппаратуры осуществлялась в отдельные предшествующие периоды по эталонным звездам и впоследствии контролировалась с помощью опорных световых источников. Программное обеспечение фотометра позволяло записывать данные фотометрических каналов с усреднением 12 с; при появлении импульсных сигналов с амплитудой, превышающей заданный порог, запись велась с временным разрешением 8 мсек. В период магнитной бури 6 апреля 2000 г. измерения проводились только четырехканальным зенитным фотометром.

На рис. 5 а приведены вариации интенсивности излучения верхней атмосферы по данным зенитного фотометра 6 апреля 2000 г. Основной характерной особенностью вариаций эмиссий верхней атмосферы для этой ночи являлось значительное, более чем двадцатикратное усиление интенсивности эмиссии 630.0 нм во второй половине ночи (рис. 5 а, кривая 1) по сравнению со значениями около полуночи и значениями предшествующей геомагнитноспокойной ночи 5 апреля 2000 г. (рис. 5 а, кривая 3).

Динамика усиления эмиссии 630.0 нм, начавшаяся после 16 UT и продолжавшаяся и в момент прекращения оптических наблюдений на рассвете, кроме общей тенденции к усилению. Включала периодические возмущения. В вариациях эмиссии 557.7 нм (рис. 5 а, кривая 2) можно отметить небольшое возмущение  $\sim 17$  UT, совпадающее с аналогичным возмущением эмиссии 630.0 нм, и

резкое усиление интенсивности (35%), совпадающее с первой фазой максимального роста интенсивности эмиссии 630.0 нм.

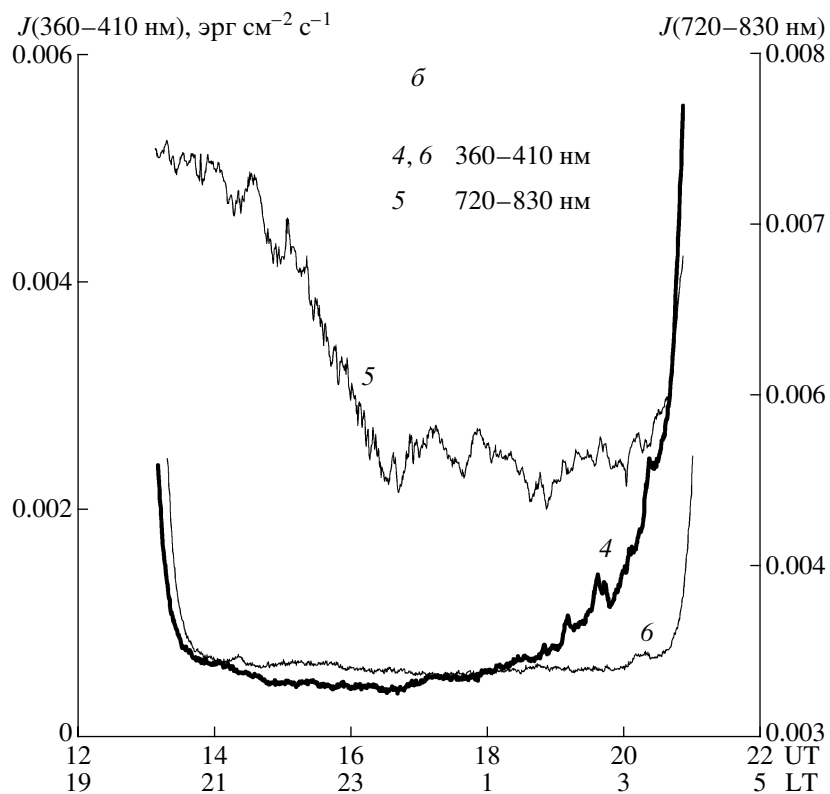
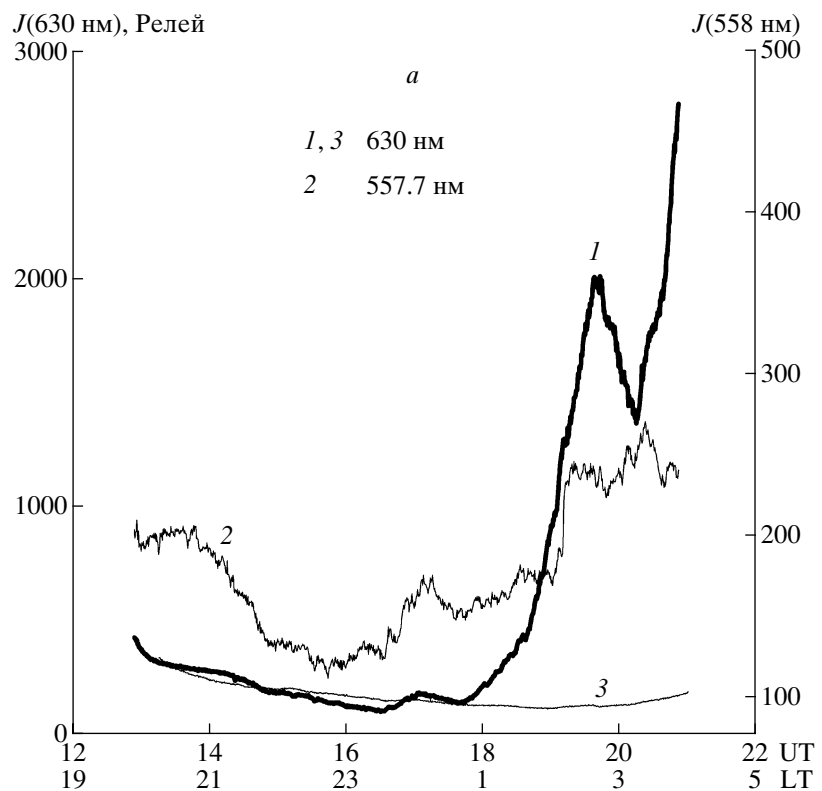
В излучении спектрального диапазона 360–410 нм начиная с 17 UT (рис. 5 б, кривая 4) отмечается нехарактерный для спокойных геомагнитных условий (рис. 5 б, кривая 6 для предшествующей ночи 5 апреля 2000 г.) монотонный рост интенсивности с наложением нерегулярных короткопериодических возмущений. Излучение в спектральном диапазоне 720–830 нм (рис. 5 б, кривая 5) в интервале времени с 14 до 16 UT, до начала геомагнитных возмущений (16 UT), испытывало монотонное снижение интенсивности, прекратившееся после 16 UT.

Интересно сравнить эти данные с вариациями ПЭС, измеренными для ближайшей станции *IRKT*. Для сравнения на рис. 4 з в относительных единицах нанесены зависимости интенсивности свечения в линиях 630 нм –  $A(t)$  и 577.7 нм –  $B(t)$ , измеренные прибором *FENIX* и отфильтрованные из исходных данных (рис. 5 а, кривые 1 и 2 соответственно) аналогично данным ПЭС  $I(t)$ . Как видно из рисунка, наблюдается весьма сильная корреляция этих вариаций, причем вариации интенсивности эмиссий находятся в противофазе с изменениями ПЭС. Максимум в оптических данных опережает минимум данных ПЭС примерно на 12 мин. Возможные причины такого явления обсуждаются в разделе 6.

#### 4.2. Крупномасштабные возмущения по оптическим данным в Средней Азии

Оптический комплекс *MORTI* (Mesopause Rotational Temperature Imager) ввезен в г. Алматы из Канады в 1997 г. с целью проведения исследований динамики планетарных волн области мезопаузы в рамках проекта *PSMOS* (Planetary Scale Mesopause Observing System) и установлен в 20 км от г. Алматы ( $43.05^\circ\text{N}$ ,  $76.97^\circ\text{E}$ ) в горах на высоте 2800 м над уровнем моря. Аппаратура *MORTI* позволяет проводить измерения вращательной температуры и эмиссии свечения ночного неба полосы (0–1) линии молекулярного кислорода  $\text{O}_2$  866.5 нм. Конструкция *MORTI* подробно описана в работе [20]. В данной работе мы ограничимся кратким описанием аппаратуры *MORTI* и его основными техническими характеристиками.

Конструкция прибора *MORTI* включает в себя коническое зеркало, линзу Френеля, интерференционный фильтр, фотографическую линзу и *CCD*-камеру. Оптическая ось *MORTI* направлена вертикально. Коническое зеркало передает просматриваемую кольцевую область ночного неба на высотах 95–97 км с внутренним и внешним радиусами кольца 47 и 63 км соответственно. Интерференционный фильтр центрирован на длину вол-



**Рис. 5.** *a* – вариации интенсивности эмиссий атомарного кислорода 630 нм (кривая 1) и 557.7 нм (кривая 2); *b* – вариации интенсивности излучения ночной атмосферы в спектральных диапазонах 360–410 нм (кривая 4) и 720–830 нм (кривая 5). Вариации интенсивности эмиссии 630 нм (кривая 3) и интенсивности излучения в спектральном диапазоне 360–410 нм (кривая 6) для магнитоспокойной ночи 5 апреля 2000 г.



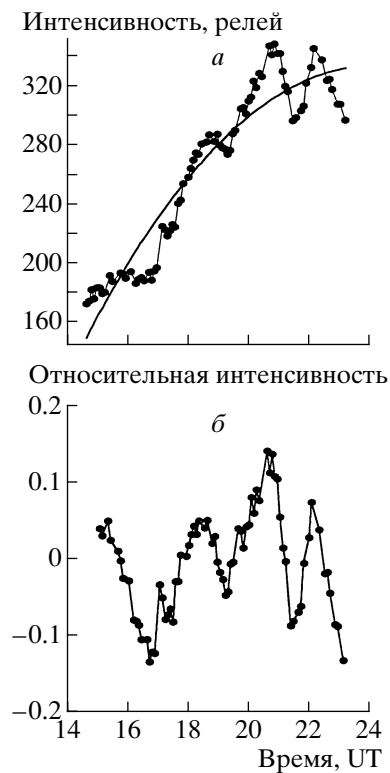
ны 867.6 нм и имеет полосу пропускания 0.27 нм, обеспечивая тем самым передачу линий  $O_2$  с различными длинами волн и с различных угловых расстояний от оптической оси, формируя на плоскости *CCD*-камеры шесть concentрических колец, соответствующих шести вращательным линиям  $O_2$ . Радиальное распределение интенсивности изображения содержит информацию о вращательной температуре и интегральной интенсивности свечения  $O_2$  для соответствующего участка неба. Пятиминутное время экспозиции обеспечивает точность измерения температуры и относительной эмиссии  $\pm 2$  К и  $\pm 2\%$  соответственно [10].

На рис. 6 точками представлены вариации интенсивности эмиссии  $O_2$  866.5 нм во время магнитной бури 6 апреля 2000 г. в функции UT, полученные в ночное местное время с помощью прибора *MORTI* Института ионосферы МОН РК. Сплошной линией показан среднеквадратичный тренд (а) и тот же ряд после удаления среднеквадратичного тренда (б). Из рис. 6 а видно, что 6 апреля наблюдались значительные фоновые вариации эмиссии до момента, который по данным *GPS* считается временем прихода уединенной волны, вызванной магнитной бурей. Период этих вариаций составлял  $\sim 2$  ч, поэтому имелась возможность выделить на их фоне уединенную волну с продолжительностью около одного часа, с максимумом, имевшим место в 20.7 UT.

На рис. 4 д нанесена зависимость интенсивности эмиссии в линии 866.5 нм –  $C(t)$ , отфильтрованная из исходных данных (рис. 6 а) аналогично данным ПЭС  $I(t)$  для ст. *SELE*. Сравнивая результаты, полученные по данным *GPS* и *MORTI* (рис. 4 д), необходимо отметить, что данные ПЭС и свечения  $O_2$  по *MORTI* достаточно хорошо коррелируют между собой, хотя находятся в противофазе: максимум свечения линии  $O_2$  опережает минимум ПЭС примерно на 18 мин. Однако, в отличие от Иркутска, корреляция данных ПЭС и интенсивности эмиссии в линии 866.5 нм хотя и вполне заметна, но фазовые соотношения в данном случае совсем другие. Возможно, это несовпадение можно объяснить, учитывая различие диапазонов высот чувствительности приборов *FENIX* и *MORTI*.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На обсуждаемые в настоящей работе измеряемые параметры в первую очередь оказывают влияние локализация и динамика главного ионосферного провала (ГИП), плазмосферы и плазмопаузы, зоны высыпания частиц (аврорального овала) и магнитосферно-ионосферных токов. Граница плазмопаузы в наиболее возмущенные периоды может достигать предельных значений  $L$  в диапазоне 1.7–2.5 [21]; положение минимума ГИП доходит до  $43^\circ N$  инвариантной широты [22], граница аврорального овала – до  $48^\circ N$  исправленных геомагнит-



**Рис. 6.** Вариации интенсивности эмиссии молекулярного кислорода  $O_2$  866.5 нм (а) – жирные точки. Среднеквадратичный тренд (а) – сплошная линия. Относительные вариации того же ряда после удаления тренда (б).

ных широт (<http://www.sec.noaa.gov/Aurora/index.html>). Для Иркутска эта широта равна  $47^\circ N$ .

По данным спутника NOAA-15 (<http://sec.noaa.gov/pmap/pmapN.html>) граница аврорального овала к рассветному периоду 7 апреля 2000 г. (по уровню  $0.1$  эрг/см<sup>2</sup> с) достигала географической широты  $56$ – $58^\circ N$  градусов в рассматриваемом долготном секторе. Учитывая, что ширина ГИП достигает нескольких градусов, можно допустить, что, по крайней мере, южная граница ГИП достигла широты  $52^\circ N$  в Восточной Сибири, где проводились оптические наблюдения. Перечисленное выше дает основание полагать, что во время магнитной бури 6–7 апреля 2000 г. на широте г. Иркутска могли наблюдаться элементы субавроральной, а возможно, и авроральной ионосферы. В пользу этого обстоятельства говорят и некоторые особенности данных оптических наблюдений. Увеличение сигнала в спектральном диапазоне 360–410 нм после 17.00 UT может быть интерпретировано как появление эмиссий  $N_2^+$  ( $1NG$ ) с длиной волны 391.4 нм, обычно наблюдаемых в полярных сияниях в результате ионизации высыпавшимися электронами молекулярного

азота или высыпанием энергичных атомов или ионов [5, 9].

Кроме известного факта увеличения эмиссии 630 нм в среднеширотных сияниях, представляет интерес существование максимума излучения линии 630 нм около 19.30 UT, антикоррелирующего (с некоторой временной задержкой) относительно ПЭС над регионом наблюдения (рис. 4 з). Аналогичная особенность эмиссии 630 нм с существованием максимума на фоне общего роста интенсивности отмечалась вблизи г. Иркутска и во время большой магнитной бури 24–25 марта 1991 г. [17] Если связывать минимум ПЭС с прохождением ГИП во время усиления кольцевого тока на начальной стадии бури, тогда можно предположить, что наблюдаемый максимум в свечении 630 нм развивается в районе ГИП, где обычно наблюдаются устойчивые субавроральные красные (Stable auroral red – SAR) дуги [23].

В этом смысле представляют интерес данные из работы [24] по SAR-дугам над Северной Америкой, где, в частности, отмечается, что слабое свечение в виде SAR-дуг при сильных магнитных возмущениях может “становиться явлением низкоширотного сияния” и приводятся значения максимальных интенсивностей SAR-дуг в эмиссии 630 нм при больших магнитных бурях ( $Dst < -200$  нТл), которые лежат в диапазоне 2.2–4 кРелей. Этому диапазону интенсивностей соответствуют зарегистрированные в районе г. Иркутска интенсивности эмиссии 630 нм во время бури 6 апреля 2000 г. Отождествление SAR-дуг и среднеширотных сияний проводится и в других работах (см., например, [21]).

Для SAR-дуг увеличение заселения уровня  $^1D$  нейтрального кислорода является результатом увеличения температуры электронов на высоте области F2 и внешней ионосферы, которое в свою очередь связано с возрастанием теплового потока из плазмосферы, где происходит энергообмен между тепловой плазмой и кольцевым током.

Согласно [25], ПЭС находится в прямой зависимости от отношения  $\frac{O}{(O_2 + N_2)}$ , поэтому рост  $N_2$  ведет к понижению локальной (а значит, и интегральной) электронной концентрации, что согласуется с полученными результатами (рис. 4).

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных показал, что образовавшаяся в результате аврорального возмущения крупномасштабная волна уединенного типа с длительностью порядка 1 ч и шириной фронта не менее 5000 км распространялась в экваториальном направлении на расстояние не менее 1000 км со средней скоростью ~200 м/с. Возмущение ПЭС, отображающее, в основном, уменьшение концен-

трации электронов в окрестности максимума слоя F2, хорошо коррелирует с возрастанием интенсивности эмиссий в оптическом диапазоне со сдвигом по времени, отличным для различных высот в ионосфере. Можно предположить, что во время большой магнитной бури на широте г. Иркутска наблюдались элементы субавроральной ионосферы. В Алмате магнитная буря сопровождалась необычайно большим уменьшением электронного содержания в максимуме F-слоя, которое привело к уменьшению ночных критических частот на 4–5 МГц. Понижение электронного содержания сопровождалось значительным увеличением действующей высоты слоя.

Авторы благодарят Е.А. Пономарева, А.В. Тащилина за интерес к данной работе, полезные советы и активное участие в дискуссиях. Эта работа выполнена при поддержке гранта INTAS 99-1186, гранта ведущих научных школ Российской Федерации № 00-15-98509, а также Российского фонда фундаментальных исследований (грант 99-05-64753).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hocke K., K. Schlegel. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophys. 1996. V. 14. P. 917–940.
2. Hunsucker, R. D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere. A review // Rev. Geophys. 1982. V. 20. P. 293–315.
3. Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Leonovich L.A. et al. Determining parameters of large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin using GPS-arrays // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2000. V. 62. P. 553–565.
4. Yeh K.C., Ma S.Y., Lin K.H., Conkright R.O. Global ionospheric effects of the October 1989 geomagnetic storm // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. A4. P. 6201–6218.
5. Ishimoto M., Torr M.R., Richards P.G., Torr D.G. The role of energetic  $O^+$  precipitation in a mid-latitude aurora // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 5793.
6. Tinsley B.A. Energetic neutral atom precipitation during magnetic storm: Optical emission, ionization, and energy deposition at low and middle latitudes // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 1855.
7. Torr M.R., Torr D.G. Energetic oxygen in mid-latitude aurora // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 5547.
8. Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W. Spectrometric and Photometric Observation of Low-Latitude Aurorae // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. A5. P. 7695–7709.
9. Tinsley B.A., Rohrbaugh R.P., Rassoul H. et al. Spectral characteristics of two types of low latitude aurorae // Geophys. Res. Lett. 1984. V. 11. № 6. P. 572–575.
10. Wiens R.H., Zhang S.P., Peterson R.N., Shepherd G.G. MORTI: A mesopause oxygen rotational temperature imager // Planet. Space Sci. 1991. V. 39. P. 1363–1375.

11. *Sahal Y., Bittencourt J.A., Takahasili H. et al.* Multi-spectral optical observations of ionospheric *F*-region storm effects at low latitude // *Planet. Space Sci.* 1988. V. 36. № 4. P. 371–381.
12. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.* *Global Positioning System: Theory and Practice.* New York: Springer-Verlag Wien, 1992. 327 p.
13. *Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P.* GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances // *J. Atmos. and Sol. Terr. Phys.* 1998. V. 60. P. 1205–1223.
14. *Klobuchar J.A.* Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, AES* 1986. 23(3). P. 325–331.
15. *Maeda S., Handa S.* Transmission of large-scale TIDs in the ionospheric *F2*-region // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1980. V. 42. P. 853–859.
16. *Whalen J.A.* Daytime *F*-layer trough observed on a macroscopic scale // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 2571–2576.
17. *Mikhalev A.V.* Photometric observation of midlatitude auroras over South-East Siberia // *Abs. 8th Scientific Assembly of IAGA with ICMA and STP Symposia.* Uppsala. August 4–15. 1997. P. 161.
18. *Ho C.M., Iijima B.A., Lindqwister X.P. et al.* Ionospheric total electron content perturbations monitored by the GPS global network during two northern hemisphere winter storms // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 26409–26420.
19. *Wrenn G.L., Rodger A.S., Rishbeth H.* Geomagnetic storm in the Antarctic *F*-region // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1987. V. 49. № 9. P. 901–913.
20. *Misawa K., Takeuchi I., Aoyama I.* Apparent progression of intensity variations of the oxygen red line // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1984. V. 46. № 1. P. 39–46.
21. *Хорошова О.В.* О связи авроральных дискретных форм полярных сияний и низкоширотных красных дуг // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1987. V. 27. № 5. P. 804–811.
22. *Аннакулиев С.К., Афонин В.В., Деминов М.Г., Карпачев А.Т.* Эмпирическая формула для положения главного ионосферного провала в период магнитной бури // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1997. V. 37. № 3. P. 183–187.
23. *Rees M.H., Roble R.G.* Observations and theory of the formation of stable auroral red arcs // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1975. V. 13. 1. P. 201.
24. *Лобзин В.В., Павлов А.В.* Связь интенсивности свечения субавроральных красных дуг с солнечной и геомагнитной активностью // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1998. V. 38. № 4. P. 49–61.
25. *Burns A.G., Killen T.L., Roble R.G.* A theoretical study of thermospheric composition perturbation during an impulsive geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. A8. P. 153–167.