

УДК 550.388.2

Я.Ф. АШКАЛИЕВ, С.Н. МУКАШЕВА

ПРОЯВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ В ВАРИАЦИЯХ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ И ИОНОСФЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ

Исследованы вариации полного электронного содержания и ионосферного параметра foF2(t) во время большой геомагнитной бури в апреле 2000 г. Анализ показал уменьшение электронной концентрации как в данных глобальной навигационной системы GPS, так и в максимуме слоя F2 по данным станции вертикального зондирования г. Алматы (43.25°N, 76.92°E).

В последнее время глобальная навигационная система (GPS) широко применяется для научных исследований в области геодинамики, физики атмосферы и ионосферы [1]. Глобальный GPS детектор отличается от ранее известных средств радиозондирования ионосферы непрерывностью наблюдений, высоким пространственно-временным разрешением и чувствительностью, а также стандартизацией и технологичностью обработки данных. Первичные данные с 30-секундным разрешением в стандартном формате RINEX поставляются на сервер SOPAC (<ftp://lox.ucsd.edu>), что представляет совершенно новые возможности для исследования возмущений естественного и техногенного происхождения в верхних слоях земной атмосферы. Пользователю доступны ионосферные карты полного электронного содержания, которые рассчитываются несколькими исследовательскими группами в США и Европе и представляются в сети Internet по адресу <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex> в стандартном формате IONEX [2-3].

В данной работе исследуется отклик среднеширотной ионосферы на большую геомагнитную бурю 6-8 апреля 2000 г. с использованием 5-минутных ионосферных данных станции вертикального зондирования г. Алматы (43.25°N, 76.92°E), данных по глобальному электронному содержанию (ГЭС) и данных по полному электронному содержанию (ПЭС), полученных с ионосферных карт, формируемых Европейским центром геофизических данных (Center for Orbit Determination in Europe, University of Berne, Switzerland) [4].

Описание геомагнитного возмущения. Магнитная буря началась 6 апреля 2000 г. в 00.12 LT и продолжалась 46 часов до 01.00 LT 8 апреля с.г. На рисунке 1 показаны вариации магнитных

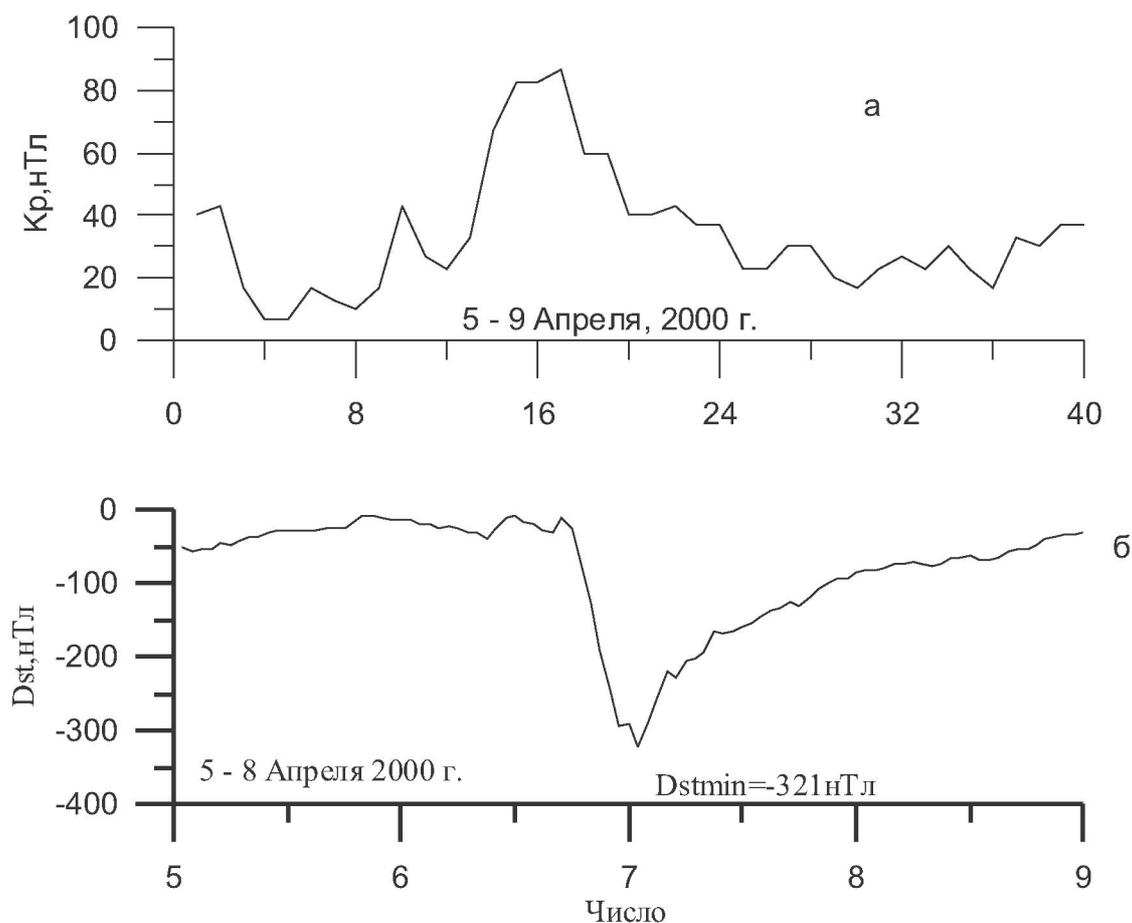
индексов Kp и Dst, взятые из данных Международного геомагнитного центра данных (Data Center A in Boulder, Colorado по адресу: <http://www.sec.noaa.gov/world>). Из рисунка 1 видно, что магнитный индекс Dst после кратковременного увеличения до величины Dst = -30 нТл в 18.00 LT 6 февраля из-за сжатия магнитосферы межпланетной ударной волной 12 часов остается без изменения до момента попадания магнитосферы в область плазменного образования. С этого момента величина Dst начинает уменьшаться, минимальное значение Dst=-321 нТл (Kp=87 нТл) достигается в 07.00 LT 7 апреля, далее 19 часов длится фаза восстановления геомагнитной бури до 01.00 LT 8 апреля.

Геомагнитные индексы Kp, Dst отражают только вариации ионосферного тока и используются при классификации бурь «спокойно» - «возмущенно», они не предназначены для количественной оценки возмущенности ионосферы во время геомагнитной бури [4]. Для оценки возмущенности ионосферы следует их связать с временными вариациями электронной концентрации.

Вариации ионосферных параметров во время геомагнитной бури.

Для изучения зависимости пространственной неоднородности ионосферы во время геомагнитного возмущения проанализированы как глобальные (ГЭС), так и локальные суточные вариации полного электронного содержания (ПЭС) временной ряд критических частот слоя F2, foF2(t).

Глобальные ионосферные карты (GIM) для любого дня года формируются на основе суточных базовых данных от 150 GPS станций. Вертикальное полное электронное содержание (VTEC) рассчитывается с учетом состояния сол-

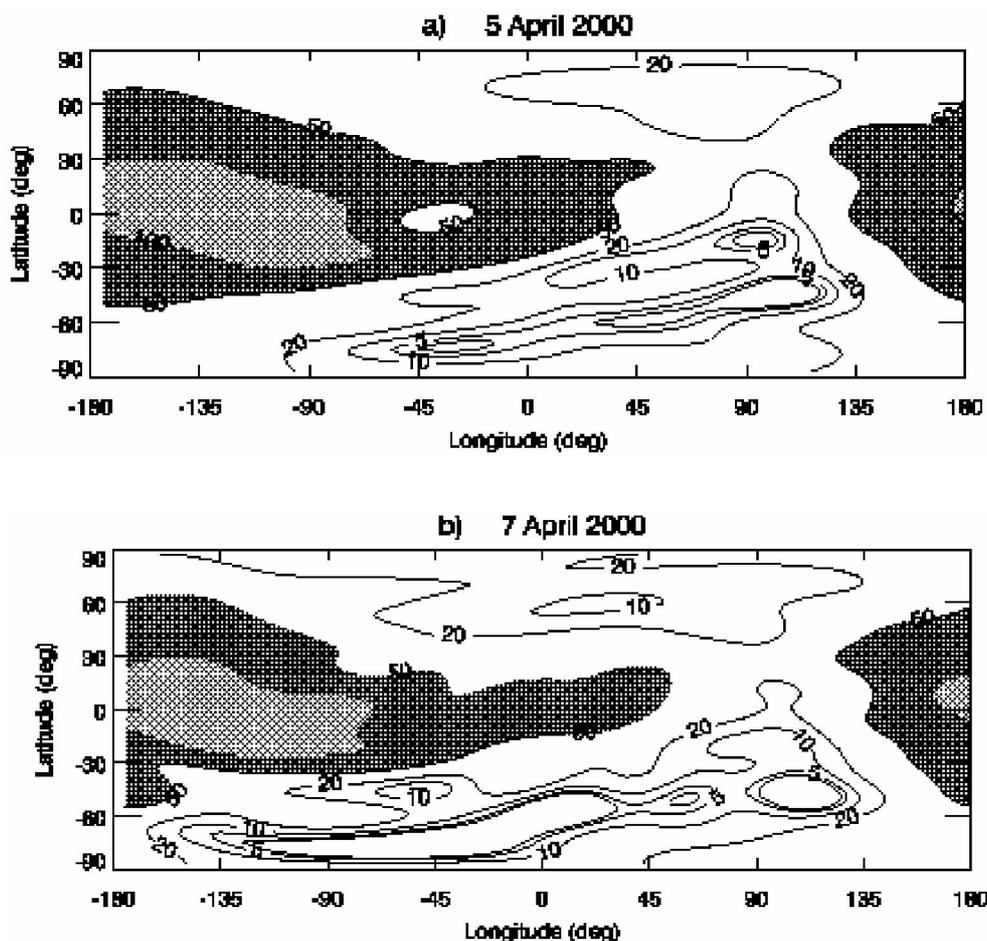


а) вариации 3-х часовой Kp-индексов; б) вариации часовые значения Dst.
Рис. 1. Вариации геомагнитных Kp и Dst во время магнитной бури 5 – 9 апреля 2000 г.

нечно-геомагнитных условий по сферическим гармоническим формулам.

На рисунке 2 приведены ионосферные карты для относительно магнитоспокойного дня 5 апреля 2000 г. (максимальное отклонение индекса D_{st} составило -55 нТл) и магнито-возмущенного дня – 7 апреля 2000 г. (максимальное отклонение индекса D_{st} составило -320 нТл). По картам IONEX можно восстановить суточный ход ПЭС в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях, чтобы получить представление о некоторых характеристиках поведения ПЭС. По оси ординат отложена широта от -90°S до 90°N , а по оси абсцисс – долгота от -180°W до 180°E . Из рисунка 2 видно, что в магнито-возмущенный день наблюдается увеличение электронной концентрации на высоких и низких широтах, а на средних широтах, соответствующим долготам от -45°W до 45°E , отмечается уменьшение электронной концентрации.

Отметим, что ионосферные карты рассчитываются с разрешением в 5° по долготе и 2.5° по широте с временным интервалом в 2 часа. Ионосферная карта состоит из 5184 элементарных ячеек. Элементарная GIM-ячейка, размером (5° по долготе и 2.5° по широте) определяется стандартом файлов IONEX. Для широт, не превышающих 60° , ячейку можно представить в виде прямоугольника со сторонами d_e и d_n . Линейный размер прямоугольной ячейки по широте не зависит от широты и равен $d_n=279$ км; линейный размер по долготе зависит от широты и для 45°N равен $d_e=436$ км. Для каждого момента времени из файлов IONEX известны значения вертикального ПЭС – I_a, I_b, I_c, I_d (величины ПЭС измерены в принятых в литературе единицах $\text{TECU} \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$). Для построения контурных ионосферных карт IONEX-файлы были соответствующим образом обработаны с помощью компьютерной Фортран программы и суточные матрицы с ПЭС значени-



а) для относительно магнитоспокойного дня 5 апреля 2000 г. (максимальное отклонение индекса D_{st} составило -20 нТл);
 б) магнито-возмущенного 7 апреля 2000г. (максимальное отклонение индекса D_{st} составило -320 нТл).

Рис. 2. Ионосферные карты полного электронного содержания ионосферы.

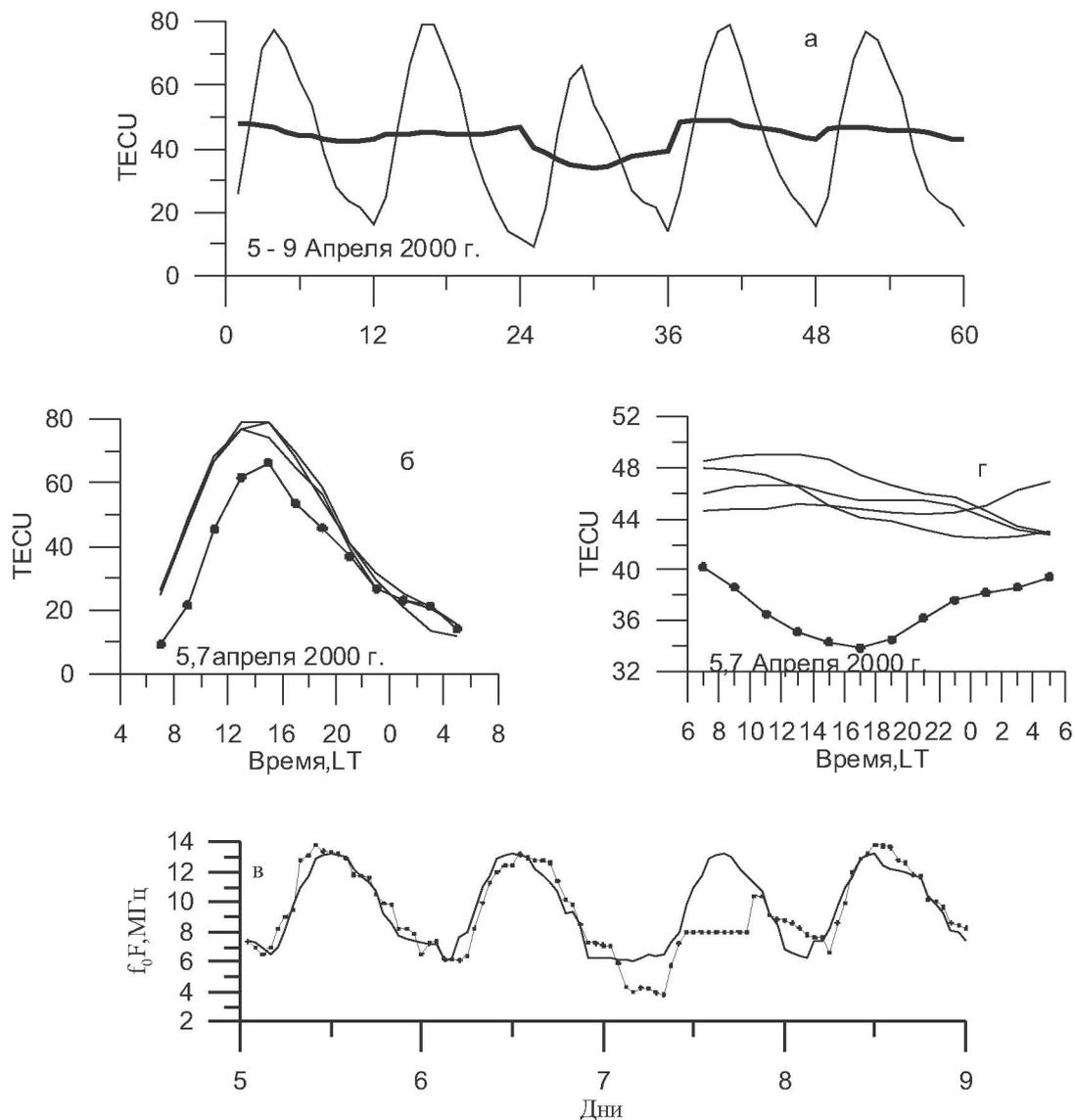
ям в каждой GIM ячейки с помощью программы на языке IDL (Interactive Data Language) [5].

На рисунке 3а представлены изменения абсолютных значений ПЭС (серая линия) и глобального (черная линия). Глобальное электронное содержание равно общему количеству электронов в околоземном космическом пространстве, ограниченном высотой орбиты навигационных спутников GPS. Метод расчета ГЭС основан на использовании технологии построения глобальных карт ПЭС. Для каждого момента времени с двухчасовым временным разрешением из файлов IONEX известны значения абсолютного вертикального ПЭС T_{av} , где индексы i, j отмечают координаты (широту и долготу) GIM-ячейки. Глобальное электронное содержание вычисляется путем суммирования по всем GIM-ячейкам зна-

чений ПЭС для каждой ячейки умноженных на площадь GIM-ячейки.

По изменениям ПЭС прослеживается отклик на магнитную бурю 7 апреля 2000 г., видно, что после внезапного начала происходит уменьшение ПЭС. Такую же картину видим в изменениях глобального электронного содержания. Глобальное электронное содержание синхронно следует вариациям $Dst(t)$ -индекса.

На рисунке 3б суточный ход ПЭС в спокойные дни 5, 6, 8 и 9 апреля (серые линии) и магнитно возмущенного 7 апреля 2000 года (кружочки). По вертикальной оси отложены значения ПЭС (в единицах $TECU \times 10^{16} m^{-2}$), а по горизонтальной оси местное время соответствующее элементарной ячейке с координатами (43°N; 75°E). Максимум ПЭС наблюдается в 14:00 LT, мини-



а) вариации глобального (черная линия), локального (серая линия) ПЭС; б) суточные вариации локального ПЭС; в) суточные вариации глобального электронного содержания; д) вариации критических частот слоя F2 ионосферы; сплошная линия вариации в спокойных условиях; точками обозначены вариации в магнито-возмущенный день.

Рис.3. Суточные вариации локального и глобального полного электронного содержания и критических частот слоя F2

мальные значения ПЭС смещены относительно полуночи более значительно достигается в 04:00 LT [1, 7]. На средних широтах хорошо выражен суточный ход. В апреле 2000 г. зарегистрированные на станции Алматы амплитуда суточных вариаций ПЭС изменяется от $25 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$ до $76 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

На рисунке 3в представлены вариации глобального электронного содержания в спокойные дни (5, 6, 8, 9 апреля 2009 г.) и в магнитовозмущенные сутки 7 апреля 2000 г. В спокойных условиях ГЭС варьирует в интервале от $44 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$

до $50 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$, а во время магнитной бури глобальное содержание уменьшается до $34 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$ в 7 часов местного времени, продолжая понижаться до $34 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$ в 18:00 с этого момента начинает повышаться до нормального уровня, равным $40 \times 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Во время магнитной бури 5-8 апреля 2000 г. на ст. вертикального зондирования г. Алматы проводились наблюдения за динамикой ионосферы по специальной 5-и минутной программе. На нижнем рисунке 3д приведены вариации (темные кружки) критической частоты F2-слоя, $f_0 F_2$. В

спокойных геомагнитных условиях дневные значения критических частот не превышают 12,5 МГц, в ночные часы они не превышают 6,0 МГц. Сплошными линиями на этих фрагментах рисунка показаны текущие медианы “m” критических частот, определяемые по трем месячным медианам M0, M-1, M+1, разнесенным во времени на 30 дней, следующим образом [4, 6]:

$$m = M0 - (D - 16) \times ((M-1) - M0)/30, D = 1 \div 15, \\ m = M0 + (D - 16) \times ((M+1) - M0)/30, D = 17 \div 31,$$

где M0 – месячная медиана, соответствует 16 дню данного месяца, а M-1 – медиана предыдущего месяца; M+1 – медиана последующего месяца. Из сравнения кривых суточных изменений $f_0F2(t)$ в возмущенные дни видно, что они имеют различные вариации. Суточные вариации $f_0F2(t)$ в спокойные дни обусловлены регулярным источником ионизирующего излучения Солнца, а отклонение форм кривых от ежедневных медиан является фактором действующим временно. Видно, что 7 и 8 апреля измеренные значения f_0F2 были несколько выше, чем у текущих медиан. Процентное превышение в местный полдень в г. Алматы составляет 10 %, в местный полдень 7 апреля во время главной фазы магнитной бури измеренная критическая частота была ниже суточной медианы в г. Алматы на 4.6 МГц (37 %). В ранние утренние часы из-за рассеяния радиосигнала на неоднородностях, наклонных эхо и поглощения трудно расшифровать ионограммы. В этих условиях наиболее надежным методом изучения возмущенной ионосферы является использование возможностей радиозондирования ионосферы с помощью сигналов глобальной навигационной системы GPS на основе использования данных широко развитых сетей станции GPS.

Обсуждение результатов. Важным при трансionoсферном зондировании является вопрос о соответствии параметров возмущений, определенных по данным полного электронного содержания и локальными ионосферными характеристиками возмущений, например, критическими частотами f_0F2 . Полное электронное содержание (ПЭС) является специфическим интегралом и его легко вычислить, однако интерпретировать временные вариации нужно с осторожностью. Интеграл выражает электронную плот-

ность вдоль линии видимого пути от места наблюдения до спутника и вариации ПЭС неоднозначно указывают на изменение электронной плотности вследствие движения плазмы. Так, уменьшение на 2 процента в ПЭС могут быть вызваны изменениями на 2 процента плотности ионосферной плазмы или локальным уменьшением на части пути на линии, соединяющей пункт приема до спутника [7]. Для того, чтобы разрешить эту неопределенность, содержащуюся в вариациях ПЭС, в данной работе для исследования поведения среднеширотной ионосферы во время большой геомагнитной бури использованы данные одновременных наблюдений ПЭС и данные (с пятиминутным разрешением) станции вертикального зондирования Департамента «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ».

Таким образом, по данным вертикального зондирования и измерениям полного электронного содержания исследована ионосферно-магнитная возмущенность среднеширотной ионосферы во время большой геомагнитной бури 5 – 9 апреля 2000 года. Максимум области F как в дневные часы, так и в темное время суток поднимается на 50 – 100 км и сопровождается понижением электронной концентрации. Ионосферные бури с отрицательной фазой выражены в ранние утренние часы резче, чем в дневное время и возникают затруднения в интерпретации ионограмм из-за рассеяния, наклонных эхо и поглощения радиосигнала.

Сравнение ионосферных характеристик, наблюдаемых по данным GPS станций и ионосферной станции г. Алматы, показало, что при качественном подобии характера их протекания имеются существенные отличия в их количественных величинах. Так, по данным вертикального зондирования спад электронной концентрации во время главной фазы магнитной возмущенности составляет 37 %, а по данным спад GPS станций локальной ПЭС – 20 %, а глобального электронного содержания – 24 %).

ЛИТЕРАТУРА

1. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS -Мониторинг Верхней Атмосферы Земли, Иркутск, 2006 г.
2. Schaer S., Gurtner W., Feltens J. // Proceeding of the IGSAC Workshop, Darmstadt, Germany, February 9 - 11, J. W. Dow, editor. P. 233 – 247

3. *Beach T.L, Kelley M.C and Kintner P.M., Miller C.A.* Total electron content variations to nonclassical traveling ionospheric listurbances: Theory and Positioning System observations.// J.of Geophys.Reseach, vol.102, No. A4,P. 7279 – 7292, April 1, 1997

4. *Wrenn G. L. ,Rodger A. S., Rishbeth H.* Geoagnetic storm in Antarctic F –region. J. Atmos. And Terr. Physics. V. 49, N 9.

5. *Gumely L. E* Practical IDL Programming, 2002..

6. *Ашкалиев Я. Ф.б Яковец А. Ф.б Зыкин О.В.* О методике выделения ионосферных бурь в области F2. Изв. МН – АН РК, Сер. Физ.- мат., 1998, 4, с. 141 – 146.

7. *Мукашева С. Н.* Суточные, сезонные и долгопериодные вариации полного электронного содержания ионосферы над Казахстаном. Изв. МН – АН-РК, Сер. Физ. – мат. 1989, 4, с. 126-133.

Работа выполнена в рамках проекта 02.01 по ПФИ «Физические процессы в системе Солнце-Земля» (Шифр Ф.0487).

Резюме

Толық электрондық құрам мен ионосфералық параметрдің foF2(t) 2000 жылдың сәуірінде болған геомагниттік үлкен дауыл кезіндегі түрленімдері зерттелген. Талдау мынаны көрсетті: электрондық концентрация глобалды навигациялық GPS жүйенің деректерінде қалай азайса, Алматы қ. (43.25°N, 76.92°E) тік зондтау станциясының деректері көрсеткендей F2 қабат максимумында да солай азаяды.

Summary

Variations of total electronic content and foF2(t) ionospheric parameter during large geomagnetic storm in April 2000 are investigated. The analysis revealed decreasing of electronic concentration both in GPS data and in maximum of F2 layer according to vertical sounding station in Almaty (43.25°N, 76.92°E).

Департамент «Институт ионосферы»,

г. Алматы

Поступила 11.07.2009 г.