

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 315 (2017), 44 – 49

A.F. Yakovets, G.I. Gordienko, S.V. Kryukov, B.T. Zhumabayev, Yu.G. Litvinov

«Institute of Ionosphere» JSC «National Center of Space Research and Technology», Almaty
artyak40@mail.ru

DAY-TO-DAY VARIABILITY OF ELECTRON CONCENTRATION IN THE IONOSPHERIC F2 LAYER MAXIMUM

Abstract. The analysis of the day-to-day variations in the electron concentration at the maximum of the F2 layer was carried out on the basis of measurements of the critical frequency of the ionospheric F2 layer (f_oF2) over Almaty in 1999 (high solar activity), 2008 (low activity), 2011 and 2012 (average activity). Autocorrelation functions and spectra of variations were calculated, which showed the existence of two types of day-by-day variations in the electron concentration at the maximum of the F2 layer. To the first type, representing the stochastic day from the day of variation, 56% of all the cases considered were attributed. To the second type, which represents a superposition of stochastic and quasiperiodic variations of f_oF2 , 44% of all cases considered were attributed. An analysis of all the spectra obtained showed that the periods of quasiperiodic variations of f_oF2 are distributed in the interval of 2-16 days. This interval corresponds to the range of planetary waves generated in the lower layers of the atmosphere, and penetrating to the heights of the thermosphere. It is shown that: a) the values of the relative mean-square deviations are minimal in the daytime and they do not depend on the level of solar activity, b) the night values of the root-mean-square deviations significantly exceed the daytime deviations, with the maximum deviation occurring at the after-midnight hours.

Key words: ionosphere, vertical sounding, electron concentration in the F2 layer maximum.

УДК 550.383

А.Ф. Яковец, Г.И. Гордиенко, С.В. Крюков, Б.Т. Жумабаев, Ю.Г. Литвинов

ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы,

ДЕНЬ ОТО ДНЯ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В МАКСИМУМЕ F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ

Аннотация. Проведен анализ день ото дня вариаций электронной концентрации в максимуме F2- слоя на основе данных измерений критической частоты F2-слоя ионосферы (f_oF2) над Алматы за 1999 г. (высокая солнечная активность), 2008 г. (низкая активность), 2011 г. и 2012 г. (средняя активность). Рассчитаны автокорреляционные функции и спектры вариаций, показавшие существование двух типов день ото дня вариаций электронной концентрации в максимуме F2-слоя. К первому типу, представляющему стохастические день ото дня вариации, было отнесено 56% от всех рассмотренных случаев. Ко второму типу, представляющему суперпозицию стохастических и квазипериодических вариаций f_oF2 , было отнесено 44% от всех рассмотренных случаев. Анализ всех полученных спектров показал, что периоды квазипериодических вариаций f_oF2 распределены в интервале 2 – 16 дней. Этот интервал соответствует диапазону планетарных волн, генерируемых в нижних слоях атмосферы, и проникающих на высоты термосферы. Показано, что: а) значения относительных среднеквадратичных отклонений минимальны в дневное время и они не зависят от уровня солнечной активности, б) ночные значения среднеквадратичных отклонений заметно превышают дневные, при этом максимум отклонений приходится на послеполуночные часы.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное зондирование, день ото дня вариации электронной концентрации.

Введение. Эмпирические модели ионосферы играют важную роль в исследовании солнечно-земных связей. Признанная международным сообществом международная модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere), созданная на основе надёжных экспериментальных данных зондирования ионосферы, позволяет получать усредненные за месяц данные об электронной плотности и температуре, ионной температуре и составе в высотном интервале 60 – 1500 км. Изменчивость характеристик $F2$ -слоя ионосферы, представляющая разброс данных, полученных на основе их одноразовых измерений, вокруг их среднемесячных значений является общепризнанным фактом, который следует принимать во внимание при практическом использовании ионосферных моделей [1, 2]. В работах [3, 4] было замечено, что день ото дня изменения электронного содержания максимума $F2$ -слоя были обусловлены в основном стохастическими механизмами. В работе [5] было получено, что день ото дня изменчивость электронного содержания превышает час от часу изменчивость. Исследование изменчивости значительно увеличивает практическую пользу ионосферных моделей, поэтому целью настоящей работы является изучение изменчивости электронного содержания максимума $F2$ -слоя над Алматы для разного времени суток при различных величинах солнечной активности.

Результаты исследований. Наблюдения ионосферы проводятся в Институте ионосферы на цифровом ионозонде, сопряженном с компьютером, который предназначен для сбора, хранения и обработки ионограмм в цифровом виде. Информация считывается с ионограмм полуавтоматическим методом. Зондирование ионосферы осуществлялось в 15 – минутном режиме. Первичная обработка ионограмм включала считывание значений критической частоты слоя $F2$ (f_oF2) с точностью считывания ~ 0.05 МГц. Критическая частота слоя связана с электронной концентрацией в максимуме слоя ($NmF2$), выражаемой количеством электронов в кубическом сантиметре, соотношением $NmF2 = 1.24 \cdot 10^4 f_oF2^2$. Для исследования поведения статистических параметров день ото дня вариаций электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя использованы данные измерений критической частоты $F2$ -слоя ионосферы (f_oF2) над Алматы за 1999 г. (высокая солнечная активность), 2008 г. (низкая активность), 2011 г. и 2012 г. (средняя активность).

Для визуального контроля суточного хода и день ото дня изменчивости f_oF2 и электронной концентрации в максимуме слоя значения критических частот, полученные в течение конкретного месяца, представлялись в графическом виде (рис. 1). На рисунке значения $NmF2$ отображены в виде отдельных точек. Линия представляет суточное поведение медианного значения $NmF2$.

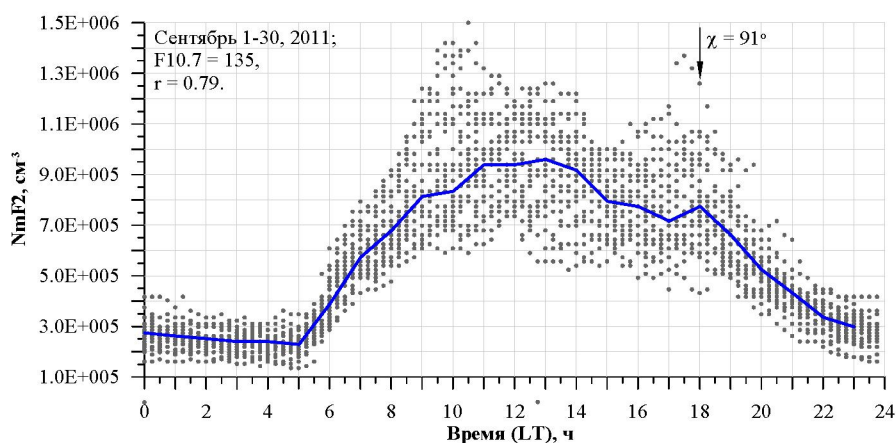


Рисунок 1 - Суточное поведение электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя ионосферы над Алматы в сентябре 2011 г.

Значительный день ото дня разброс значений электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя ионосферы требует проведения анализа статистических параметров и, в частности, автокорреляционных функций f_oF2 . Рассчитанные автокорреляционные функции рядов, представляющих отсчеты значений f_oF2 для конкретного времени суток в последовательные дни, показали существование различного типа день ото дня вариаций электронной концентрации в максимуме

F2-слоя. К первому типу, представляющему стохастические день ото дня вариации (примеры автокорреляционных функций приведены на двух верхних панелях рис.2), было отнесено 56% от всех рассмотренных случаев. Ко второму типу, представляющему суперпозицию стохастических и квазипериодических вариаций *foF2*, было отнесено 44% от всех рассмотренных случаев (примеры автокорреляционных функций приведены на двух нижних панелях).

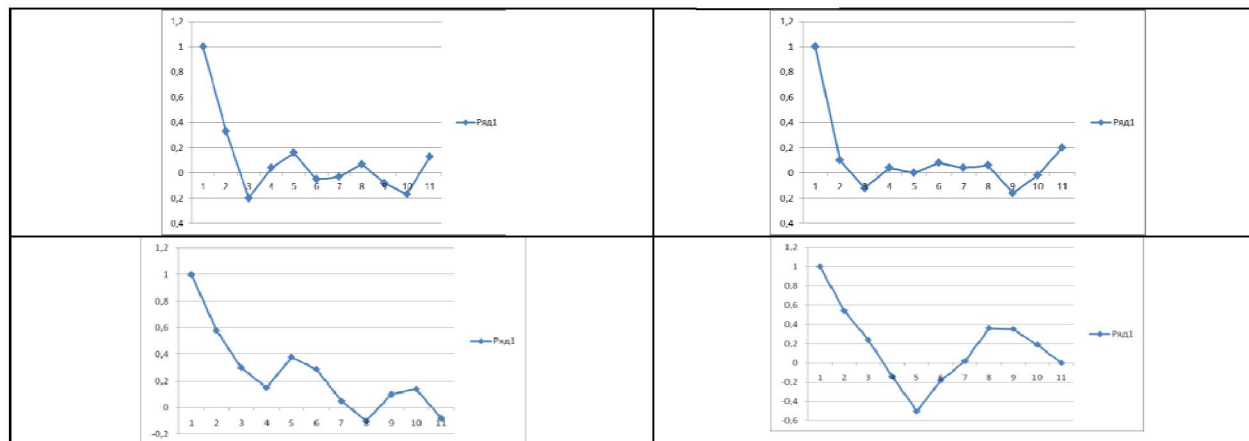


Рисунок 2 - Автокорреляционные функции вариаций *foF2* разного типа

Спектральный анализ рядов, представляющих значения *foF2* для конкретного времени суток в последовательные дни проведен методом Блекмана-Тьюки. Верхние две панели показывают примеры существования периодических компонент в день ото дня вариациях *foF2*. Анализ всех полученных спектров показал, что периоды квазипериодических вариаций *foF2* распределены в интервале 2 – 16 дней. Этот интервал соответствует диапазону планетарных волн, генерируемых в нижних слоях атмосферы, и проникающих на высоты термосферы. Нижние две панели представляют примеры спектров стохастических вариаций *foF2*.

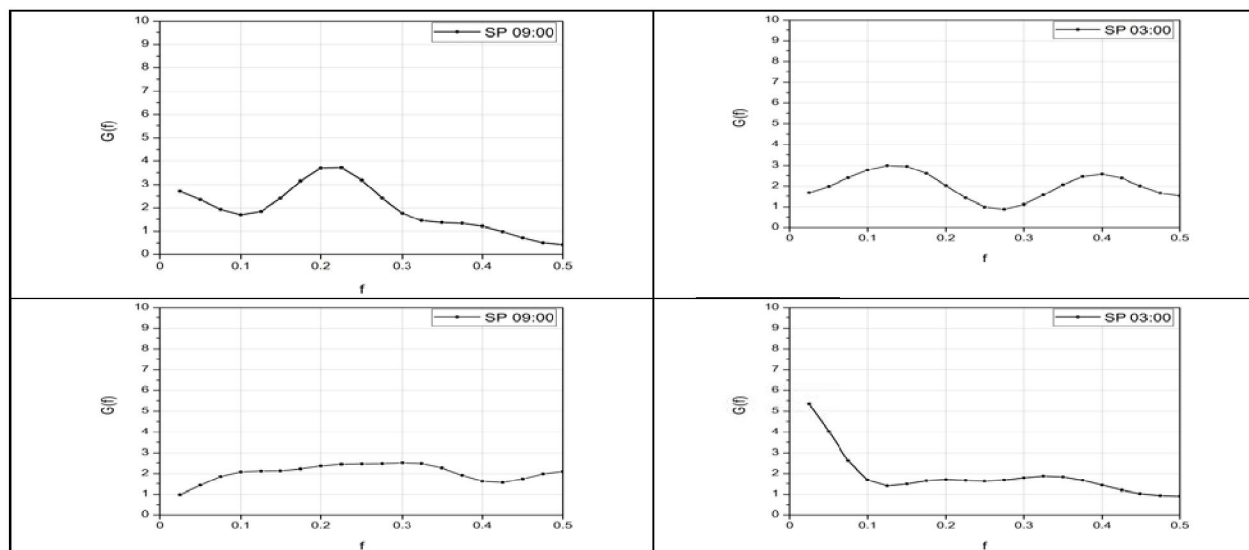


Рисунок 3 - Разные типы спектров вариаций *foF2*

Стохастические вариации электронной концентрации в *F2*-слое (высота более 150 км), по-видимому, говорят о его турбулентной структуре. Известно, что образование турбулентности выше турбопаузы (~ 100км) затруднено, что обусловлено ростом молекулярной вязкости с высотой. Теплопроводность и вязкость стремятся сгладить любые мелкомасштабные градиенты

температурного и ветрового поля. Однако в верхней атмосфере источником турбулентности может быть разрушение идущих из нижней атмосферы внутренних волн, в результате нелинейного взаимодействия планетарных волн и приливов. Диссипация энергии турбулентных движений может оказывать влияние на стохастические вариации электронной концентрации в F2-слое ионосферы.

Физические механизмы, определяющие разброс критических частот или электронной концентрации в максимуме F2-слоя, довольно многочисленны. Существует много факторов, таких как солнечная радиация, геомагнитная активность, внутренние атмосферные волны различных периодов и пространственных масштабов, которые могут приводить ко дню ото дня вариациям электронного содержания в F2-слоя ионосферы в фиксированное местное время. В работе [6] рассмотрели почти все возможные механизмы вариативности F2-слоя ионосферы и пришли к заключению, что их можно разделить на четыре класса: вариации 1) солнечного ионизирующего излучения, 2) солнечного ветра и геомагнитной активности, 3) метеорологических источников в нижней атмосфере и 4) электродинамических источников. Считается, что метеорологические источники по степени воздействия на F2-слой сравнимы с геомагнитными источниками и значительно больше солнечной компоненты.

Вариативность от различных источников имеет различные масштабы корреляции в пространстве. Это обусловлено тем, что некоторые источники глобальны, например, солнечная радиация, а некоторые локальны, например, метеорологические источники. Большая вариативность F2-слоя ночью по сравнению с днем обусловлена тем, что ночью возрастает энергия, поступающая в авроральный овал [6] из магнитосферы. Существенными источниками случайных флуктуаций $NmF2$ являются нерегулярные высыпания энергичных частиц из магнитосферы в авроральную зону, а также электрические поля и соответствующие токи магнитосферного происхождения. Приток энергии происходит в области авроральных овалов, при этом в ночном полушарии он больше, чем в дневном полушарии.

Крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (КМ ПИВ) вызываются атмосферными гравитационными волнами (АГВ), генерируемыми в авроральной зоне во время геомагнитных возмущений [7], когда быстрое усиление авроральных электроджетов приводит к нагреву атмосферы. Процесс быстрого расширения и последующего сжатия атмосферы генерирует АГВ, распространяющуюся к экватору и вызывающую появление КМ ПИВ на пути ее распространения. Распространение АГВ в нейтральной атмосфере и их ионосферное проявление изучалось как экспериментально, так и теоретически в течение ряда лет. В работе [8] на основе анализа данных GPS приемников показано, что существует заметная вероятность (28% от полного числа) наблюдения КМ ПИВ и при спокойных магнитных условиях ($Kp \leq 3$). Типичные параметры КМ ПИВ в F-области ионосферы представляют следующие величины: периоды занимают диапазон 40 мин – 6 ч; горизонтальные длины волн – 1000–3000 км; фазовые скорости – 400–1000 м/с. При спокойных геомагнитных условиях вариативность вариативности F2-слоя обусловлена, в основном, метеорологическими источниками [9], к которым относятся проникающие снизу на ионосферные высоты внутренние волны. Эти волны в нейтральной атмосфере переносят значительное количество кинетической энергии из тропосферы вверх. В зависимости от пространственных и временных масштабов их разделяют на: 1) приливные колебания, 2) гравитационные и 3) планетарные волны. Спектральный анализ суточного хода параметров атмосферы, испытывающих приливные колебания, свидетельствует о том, что в верхней атмосфере отчетливо выражены главным образом полусуточные и суточные колебания. Внутренние гравитационные волны, периоды которых лежат в интервале от нескольких минут до ~ 6 часов, распространяются до ионосферных высот. Выполнено большое количество теоретических расчетов “отклика” ионосферы на прохождение внутренних гравитационных волн, экспериментально подтверждена их роль в динамике термосферы. Планетарные волны, периоды которых меняются в пределах 1-15 суток, относятся к классу длинных крупномасштабных волн в атмосфере, являющихся проявлением инерционных сил. Системы сильных зональных ветров в стратосфере препятствуют просачиванию планетарных волн из тропосферы в термосферу, но, тем не менее, часть их энергии достигает верхней атмосферы - об этом свидетельствуют спектры вариаций $foF2$.

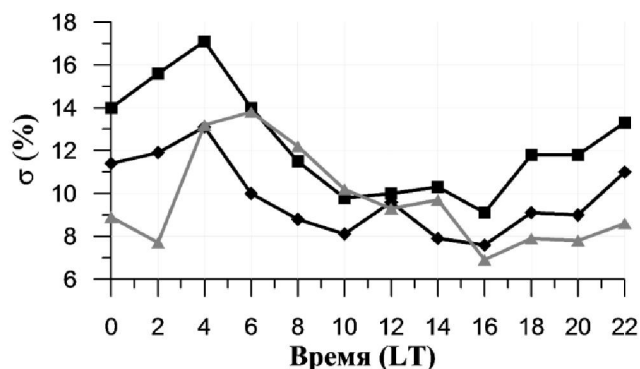


Рисунок 4- Суточные зависимости относительных среднеквадратичных отклонений значений критических частот для июня-июля при трех уровнях солнечной активности $F_{10.7} = 65.8$ (ромбы), $F_{10.7} = 128.0$ (квадраты) и $F_{10.7} = 168$ (треугольники)

Нами также рассчитаны суточные зависимости относительных среднеквадратичных отклонений значений критических частот (рис. 4) для июня-июля при трех уровнях солнечной активности $F_{10.7} = 65.8$ (ромбы), $F_{10.7} = 128.0$ (квадраты) и $F_{10.7} = 168$ (треугольники).

Относительные среднеквадратичные отклонения представляют отношение среднеквадратичного отклонения $foF2$ к среднемесячному значению, умноженное на 100%.

Зависимости показали, что: а) значения относительных среднеквадратичных отклонений минимальны в дневное время и они не зависят от уровня солнечной активности, б) ночные значения среднеквадратичных отклонений заметно превышают дневные, при этом максимум отклонений приходится на послеполуночные часы. Большая вариативность $F2$ -слоя ночью по сравнению с днем обусловлена, по-видимому, тем, что ночью возрастает энергия, поступающая в авроральный овал из магнитосферы в ночном полушарии. Существенными источниками случайных флуктуаций $NmF2$ являются нерегулярные высыпания энергичных частиц из магнитосферы в авроральную зону, а также электрические поля и соответствующие токи магнитосферного происхождения, вызывающие генерацию ионосферных возмущений, перемещающихся на средние широты.

Заключение. Доказано существование двух типов день ото дня вариаций электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя. К первому типу, представляющему стохастические день ото дня вариации, было отнесено 56% от всех рассмотренных случаев. Ко второму типу, представляющему суперпозицию стохастических и квазипериодических вариаций $foF2$, было отнесено 44% от всех рассмотренных случаев.

Анализ всех полученных спектров показал, что периоды квазипериодических вариаций $foF2$ распределены в интервале 2 – 16 дней. Этот интервал соответствует диапазону планетарных волн, генерируемых в нижних слоях атмосферы, и проникающих на высоты термосферы.

3. Показано, что: а) значения относительных среднеквадратичных отклонений минимальны в дневное время и они не зависят от уровня солнечной активности, б) ночные значения среднеквадратичных отклонений заметно превышают дневные, при этом максимум отклонений приходится на послеполуночные часы.

Работа выполнена по РБП-076 “Развитие методов мониторинга и исследований космического пространства на базе современных информационных технологий” в рамках темы “Изучить структуру и динамику потока космических лучей, геомагнитного поля, ионосферы и атмосферы с целью диагностики и прогноза состояния ближнего космоса”, Регистрационный номер (РН) 0115PK01275.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rishbeth, H., Mendillo, M., 2001. Patterns of $F2$ -layer variability. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 63, 1661–1680.
 [2] Bilitza, D., 2000. Report from 33rd COSPAR Scientific Assembly. Warsaw, Poland. 16–23 July 2000. *IRI News Letters*, vol. 7 (no. 3/4). pp. 1–4.

- [3] Somoye, E.O., 2009. Comparison of NmF2 variability at Ibadan, Singapore and Slough during different epochs of solar cycle. *Asian J. Sci. Res.* 2 (3), 155–160.
- [4] Somoye, E.O., Akala, A.O., 2010. NmF2 variability at equatorial and low latitude stations: a review. *Res. J. Phys.* 4 (2), 50–55.
- [5] Kouris, S.S., Fotiadis, D.N., 2002. Ionospheric variability a comparative statistical study. *Adv. Space Res.* 29 (6), 977–985.
- [6] Rishbeth, H. and Mendillo, M.: Patterns of F2-layer variability, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 63, 1661–1680, 2001.
- [7] Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review // *Rev. Geophys.* V. 20. P. 293–315. 1982.
- [8] Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan // *J. Geophys. Res.* V. 109. A06302, doi:10.1029/2003JA010302. 2004.
- [9] Forbes, J. M., Palo, S. E., and Zhang, X. L.: Variability of the ionosphere, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 62, 685–693, 2000.

REFERENCES

- [1] Rishbeth, H., Mendillo, M., 2001. Patterns of F2-layer variability. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 63, 1661–1680.
- [2] Bilitza, D., 2000. Report from 33rd COSPAR Scientific Assembly. Warsaw, Poland. 16–23 July 2000. *IRI News Letters*, vol. 7 (no. 3/4), pp. 1–4.
- [3] Somoye, E.O., 2009. Comparison of NmF2 variability at Ibadan, Singapore and Slough during different epochs of solar cycle. *Asian J. Sci. Res.* 2 (3), 155–160.
- [4] Somoye, E.O., Akala, A.O., 2010. NmF2 variability at equatorial and low latitude stations: a review. *Res. J. Phys.* 4 (2), 50–55.
- [5] Kouris, S.S., Fotiadis, D.N., 2002. Ionospheric variability a comparative statistical study. *Adv. Space Res.* 29 (6), 977–985.
- [6] Rishbeth, H. and Mendillo, M.: Patterns of F2-layer variability, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 63, 1661–1680, 2001.
- [7] Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A review // *Rev. Geophys.* V. 20. P. 293–315. 1982.
- [8] Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan // *J. Geophys. Res.* V. 109. A06302, doi:10.1029/2003JA010302. 2004.
- [9] Forbes, J. M., Palo, S. E., and Zhang, X. L.: Variability of the ionosphere, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 62, 685–693, 2000.

Сведения об авторах:

Яковец Артур Федорович, канд. ф.-мат. наук, СНС, Каменское плато, Институт ионосферы, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы, artyak40@mail.ru;

Гордиенко Галина Ивановна, канд. ф.-мат. наук, СНС, Каменское плато, Институт ионосферы, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы, ggordienko@mail.ru;

Крюков Сергей Викторович, Каменское плато, Институт ионосферы, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы, cosmoserg@mail.ru;

Жумабаев Бейбит Тенелович, канд. ф.-мат. наук, СНС, Каменское плато, Институт ионосферы, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы, beibit.zhu@mail.ru;

Литвинов Юрий Георгиевич, канд. ф.-мат. наук, Каменское плато, Институт ионосферы, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы, yurii-litvinov@mail.ru.

А.Ф. Яковец, Г.И. Гордиенко, С.В. Крюков, Б.Т. Жумабаев, Ю.Г. Литвинов

«Ионосфера институты» ДТОО «ҰҒЗТО» АҚ, Алматы,

ЭЛЕКТРОНДЫҚ КОНЦЕНТРАЦИЯНЫҢ ИОНОСФЕРАНЫҢ F2-ҚАБАТЫНЫҢ МАКСИМАЛЫНДАҒЫ КҮНДЕЛІКТІ ӨЗГЕРУІ

Аннотация. Алматы үшін 1999 (жоғары күн белсенділігі), 2008 (төмен белсенділік), 2011 және 2012 (орташа белсенділігі) аралығында F2 қабатының максимумында электрон концентрациясының күнделікті өзгерулерін талдау нәтижесінде ионосфераның F2 қабатының сындық жиілігін өлшеу негізінде (f_oF2) Автокорреляциялық функциялар мен вариация спектрлері есептелді, бұл F2 қабатының максимумында электрондық концентрациядағы күнделікті өзгерістердің екі түрінің бар екенін көрсетеді. Вариация күнінен бастап стохастикалық күнді білдіретін бірінші типтегі қаралған барлық жағдайлардың 56%-ы анықталды. f_oF2 -ның стохастикалық және квазипериодтық ауытқуларының суперпозицияларын білдіретін екінші типтегі қарастырылған барлық жағдайлардың 44% -на жатқызылады. Алынған барлық спектрлерді талдау f_oF2 квазипериодтық өзгеру кезеңдері 2-16 күн аралығында бөлінгенін көрсетті. Бұл интервал атмосфераның төменгі қабаттарында пайда болатын планеталық толқындардың диапазонына сәйкес келеді және термосфераның биіктігіне енеді. а) Күндізгі орташа ауытқулардың шамасы шамалы және олар күн белсенділігінің деңгейіне байланысты емес, б) Орташа-квадраттық ауытқулардың түнгі мәні жарты түнгі сағаты ең көп ауытқу бар кезінде күндізгіден айтарлықтай асып түсетінін көрсетеді.

Тірек сөздер: ионосфера, тік барлау, электрондық концентрацияның күнделікті өзгеруі.