

NEWS

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

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 315 (2017), 50 – 54

A.F. Yakovets¹, G.I. Gordienko¹, B.T. Zhumabayev¹, Yu.G. Litvinov¹, N. Abdrakhmanov²

¹«Institute of Ionosphere» JSC «National Center of Space Research and Technology», Almaty;

²Korkyt ata's Kysylorda State University, Kysylorda
artvak40@mail.ru

**FINE STRUCTURE OF NIGHTTIME ENHANCEMENTS OF THE
ELECTRON CONCENTRATION IN THE $F2$ LAYER MAXIMUM**

Abstract. The analysis of the fine structure of the night enhancements of the electron density at the maximum $F2$ -layer is carried out. In a specific example of behavior of the $F2$ -layer parameters, we consider the mechanism of the enhancements formation, which consists of several steps. These steps are consistent increase of the velocity of the meridional directed to the equator thermospheric wind, lifting $F2$ -layer. This step greatly reduces the rate of recombination, so beginning an enhancement in the electron density in the layer. Increasing the electron concentration leads to a decrease in the electron temperature in the $F2$ -layer and the further enhancement of the plasma flow speed directed down. Increased downward plasma speed provides additional flow in the $F2$ -layer, resulting in electron enhancement, and so forth. This self-sustaining avalanche process produces peak N_mF2 . The process stops when the thermospheric wind begins to decrease with a corresponding reduction in the height of the $F2$ -layer. The layer goes back to the heights with the high rate of recombination, and N_mF2 begins to decrease.

Key words: ionosphere, vertical sounding, nighttime enhancements in the electron concentration of the $F2$ -layer maximum

УДК 550.383

А.Ф. Яковец¹, Г.И. Гордиенко¹, Б.Т. Жумабаев¹, Ю.Г. Литвинов¹, Н. Абдрахманов²

¹ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы;

²Кызылординский государственный университет им. Коркыт ата, Кызылорда.

**ТОНКАЯ СТРУКТУРА НОЧНЫХ УВЕЛИЧЕНИЙ
В МАКСИМУМЕ $F2$ -СЛОЯ**

Аннотация. Проведен анализ тонкой структуры ночных увеличений электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя. На конкретном примере поведения параметров $F2$ -слоя, рассмотрен механизм образования увеличений, состоящий из ряда этапов. Эти этапы представляют последовательное увеличение скорости меридионального направленного к экватору термосферного ветра, поднимающего $F2$ -слой, что сильно уменьшает скорость рекомбинации, поэтому начинается увеличение электронной концентрации в слое. Увеличение электронной концентрации приводит к уменьшению электронной температуры в $F2$ -слое и дальнейшему усилению скорости плазменного потока вниз. Увеличение направленной вниз скорости плазмы обеспечивает дополнительное поступление плазмы в $F2$ -слой, приводя к увеличению электронной плотности и так далее. Этот самоподдерживающийся лавинообразный процесс формирует пик в $NmF2$. Процесс останавливается, когда термосферный ветер начинает уменьшаться с соответствующим понижением высоты слоя h_mF . Слой возвращается назад на высоты, где высока рекомбинация, N_mF2 начинает уменьшаться и описываемый процесс обращается.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное зондирование, ночные увеличения электронной концентрации.

Введение. Если не брать в расчет процессы переноса ионосферной плазмы, электронная концентрация среднеширотного $F2$ -слоя ионосферы, когда ночью выключен солнечный источник

фотоионизации, должна плавно уменьшаться благодаря рекомбинации электронов с отрицательными ионами. Однако ночью часто происходит увеличение электронной концентрации. Экспериментальные и теоретические исследования ночных увеличений электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя ионосферы (N_mF2) проводятся продолжительное время. В работах [1-5] рассматриваются механизмы формирования ночных увеличений, включающие направленный вверх дрейф плазмы, обусловленный направленным к экватору меридиональным нейтральным ветром, и усиление направленного вниз потока плазмы из протоносферы из-за дополнительного нагрева плазмы протоносферы. В работе [3] дан физический механизм явления, включающий последовательность этапов, рассмотрение которых позволяет экспериментально проследить тонкую структуру увеличений, отражающуюся во временном поведении параметров $F2$ -слоя. Поэтому целью настоящей работы явился анализ поведения параметров $F2$ -слоя в периоды ночных увеличений электронной концентрации по данным вертикального зондирования ионосферы на ст. Алматы ($76^{\circ}55'E$, $43^{\circ}15'N$).

Описание аппаратуры и анализ результатов наблюдений. Ночные наблюдения ионосферы проводятся в Институте ионосферы (ст. Алматы) на цифровом ионозонде, сопряженном с компьютером, который предназначен для сбора, хранения и обработки ионограмм в цифровом виде. Информация считывается с ионограмм полуавтоматическим методом. Длительность сеансов наблюдения, осуществляемых в 5 – минутном режиме, в зависимости от сезона составляла 10-14 часов, 10-15 ночей каждый месяц. Учащенное зондирование ионосферы дает возможность четко фиксировать увеличения N_mF2 с малой длительностью и амплитудой. Вертикальное зондирование ионосферы проводилось на цифровом ионозонде “Парус”. Ионозод обеспечивает точность считывания действующих высот отражения радиосигнала ($h'(f)$) ~ 2.5 км и рабочих частот зондирования (f_o) ~ 0.05 МГц. Информация, необходимая для расчетов разнообразных параметров $F2$ -слоя, считывалась с ионограмм полуавтоматическим методом с участием опытного оператора. В работе [6] показано, что подобный способ обработки ионограмм обладает большей, по сравнению с автоматическим методом, точностью считывания ионосферных параметров и большим статистическим выходом ионограмм, пригодных к обработке. С ионограмм считывались значения действующих высот отражения ($h'(f)$) радиосигнала на ряде рабочих частот и значения критических частот ($f_{o,x}F2$). Дальнейшая обработка данных представляла расчет высотного распределения электронной плотности ($N(h)$ -профиля) методом POLAN [7] и получение из последовательности профилей временных вариаций ряда параметров $F2$ -слоя (электронной плотности на фиксированных высотах ($N_h(t)$), плотности в максимуме слоя (N_mF2), истинных высот максимума (h_mF) и основания ($h_{bot}F$) слоя и его полутолщины ($\Delta h = h_mF - h_{bot}F$). За высоту основания $F2$ -слоя выбиралась высота, которой соответствовало значение электронной плотности $0.3 \times N_mF2$. Коэффициент 0.3 был подобран эмпирически из соображения наибольшего приближения этой высоты к высоте, на которой на экспериментальном $N(h)$ -профиле проявлялся значительный высотный градиент электронной плотности.

На рисунке 1 представлен пример поведения параметров $F2$ -слоя, которое представляет последовательность увеличений: первого ($t \sim 20.40 - 22.25$), второго ($t \sim 23.10 - 02.00$) и третьего ($t \sim 03.15 - 04.15$). Жирной линией на рисунке показано поведение критической частоты (f_oF2) $F2$ -слоя для обыкновенной компоненты отраженного сигнала. Критическая частота слоя (в МГц) связана с электронной концентрацией в максимуме слоя (N_mF2), выражаемой количеством электронов в кубическом сантиметре, соотношением $N_mF2 = 1.24 \cdot 10^4 (f_oF2)^2$. Падение критической частоты в начале сеанса измерения обусловлено выключением ионизирующего излучения Солнца после его захода и химическими потерями, связанными с рекомбинацией плазмы. Быстрое увеличение электронной концентрации после 06.00 обусловлено восходом Солнца. Рассмотрим поведение всех параметров слоя для первого по порядку увеличения ионизации с пиком N_mF2 в $t \sim 22.25$, принимая во внимание последовательность этапов, рассмотренных в работе [3], в которой используется разработанный авторами самосогласованный метод получения термосферных параметров из данных радара некогерентного рассеяния. Основная идея метода представляет подгонку теоретического $N(h)$ - профиля к наблюдаемому профилю и таким образом получение самосогласованного набора главных аэрономических параметров: нейтрального состава,

температуры нейтралов ($T_n(h)$), вертикального дрейфа плазмы (W), и наблюдаемые высотные профили электронной и ионной температур ($T_e(h)$, $T_i(h)$). Не смотря на разнообразие возможностей реализации увеличений N_mF2 , авторы установили главный механизм образования пика.

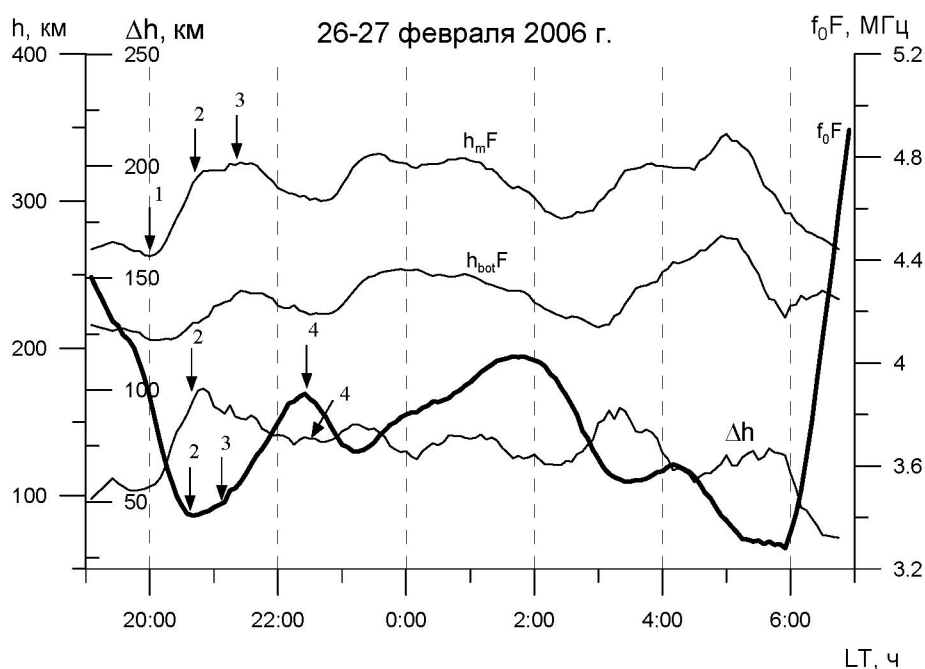


Рисунок 1 – Поведение параметров $F2$ -слоя при формировании ночных увеличений электронной концентрации

Ночью всегда существует направленный вниз из плазмасферы поток ионов O^+ в $F2$ - слой благодаря рекомбинации плазмы. Вертикальная скорость плазмы определяется высотными градиентами электронной плотности, ионной и электронной температур, а также гравитационным членом и скоростью дрейфа, определяемой термосферным ветром. Начальная стадия процесса представляет увеличение скорости меридионального направленного к экватору термосферного ветра, поднимающего $F2$ -слой и, таким образом, приводящим к увеличению h_mF2 . На рисунке 1 это начало соответствует времени $t \sim 20.00$ (1). На рисунке стрелки, сопровождаемые цифрами, обозначают моменты начала последовательных стадий формирования ночных увеличений. Подъем $F2$ -слоя сильно уменьшает скорость рекомбинации, и соответствующий коэффициент плазменных потерь становится малым. При этом даже умеренный плазмасферный поток оказывается достаточным, чтобы начать увеличение электронной концентрации в $F2$ -слое ($t \sim 20.40$ (2)), сначала медленное до $t \sim 21.10$ (3), а затем все более быстрое.

Увеличение электронной концентрации приводит к уменьшению электронной температуры в $F2$ -слое. Механизм, ответственный за обратную связь электронной концентрации и температуры, представлен в работе [8]. Электронная температура уменьшается с ростом электронной концентрации, из-за увеличения удельной теплоемкости электронного газа и усиления передачи энергии относительно холодным ионам. Электронная температура определяет шкалу высот ионосферной плазмы (H_p). С увеличением температуры шкала высот возрастает, а уменьшение температуры приводит к уменьшению шкалы высот. В работе [9] показано, что хотя H_p напрямую не связана с $N(h)$ -профилем, однако полученные регрессионные зависимости говорят о сильной корреляционной связи между этими величинами. Поэтому вариации полутолщины (Δh) слоя, можно использовать для качественного описания поведения электронной температуры.

Уменьшение электронной температуры приводит к уменьшению приведенной высоты (полутолщины (Δh)), и быстрому и дальнейшему усилению скорости потока вниз. Увеличение направленной вниз скорости плазмы обеспечивает дополнительное поступление плазмы в $F2$ -слой, приводя к увеличению электронной плотности и так далее. Этот самоподдерживающийся лавинообразный процесс формирует пик в N_mF2 в $t \sim 22.25$ (4). Процесс останавливается, когда

термосферный ветер начинает уменьшаться с соответствующим понижением высоты слоя h_mF . Слой возвращается назад на высоты, где высока рекомбинация, N_mF2 начинает уменьшаться и описываемый процесс обращается. Максимальный поток строго соответствует времени пика в вариациях N_mF2 , так как он пропорционален произведению скорости на N_e , а они максимальны около этого времени. Согласно этому механизму, всегда должна быть задержка пика в вариациях N_mF2 (4) относительно пика в h_mF2 (3). Пик в N_mF2 должен формироваться на участке понижения h_mF2 .

Второе и третье увеличения электронной концентрации с пиком N_mF2 в $t \sim 01.50$ и $t \sim 04.20$ имеют те же особенности, что и первое увеличение. Кроме того, эти особенности сохраняются и во время формирования увеличений в другие даты, приходящиеся на разные сезоны и года с разным уровнем солнечной активности.

Выводы. Выполнен анализ поведения параметров $F2$ -слоя в периоды ночных увеличений электронной концентрации по данным вертикального зондирования ионосферы. На конкретном примере поведения параметров $F2$ -слоя, рассмотрена тонкая структура увеличений электронной концентрации на основе механизма их образования, описанного в литературе и представляющего последовательность ряда этапов. Эти этапы представляют последовательное увеличение скорости меридионального направленного к экватору термосферного ветра, поднимающего $F2$ -слой и, таким образом, приводящим к увеличению высоты слоя. Подъем $F2$ -слоя сильно уменьшает скорость рекомбинации, поэтому начинается увеличение электронной концентрации в слое. Увеличение электронной концентрации приводит к уменьшению электронной температуры в $F2$ -слое. Уменьшение электронной температуры приводит к уменьшению приведенной высоты (полутолщины (Ah)), и быстрому и дальнейшему усилению скорости потока вниз. Увеличение направленной вниз скорости плазмы обеспечивает дополнительное поступление плазмы в $F2$ -слой, приводя к увеличению электронной плотности и так далее. Этот самоподдерживающийся лавинообразный процесс формирует пик в N_mF2 . Процесс останавливается, когда термосферный ветер начинает уменьшаться с соответствующим понижением высоты слоя h_mF . Слой возвращается назад на высоты, где высока скорость рекомбинации, N_mF2 начинает уменьшаться и описываемый процесс обращается. Максимальный поток строго соответствует времени пика в вариациях N_mF2 , так как он пропорционален произведению скорости на N_e , а они максимальны около этого времени. Согласно этому механизму, всегда должна быть задержка пика в вариациях N_mF2 относительно пика в h_mF2 .

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) 0115РК01275.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bailey G.J., Sellek R., Balan N. The effect of interhemispheric coupling on nighttime enhancement in ionospheric total electron content during winter at solar minimum. *Ann. Geophys.* 1991, V. 9, № 11, P. 738-747.
- [2] Mikhailov A.V., Leschinskaya T.Yu., Förster M. Morphology of NmF2 nighttime increases in the Eurasian sector. *Ann. Geophysicae.* 2000, V. 18, № 6, P. 618-628.
- [3] Mikhailov A.V., Forster M., Leschinskaya T.Y. On the mechanism of the post-midnight winter NmF2 enhancements: dependence on solar activity. *Ann. Geophys.* 2000, V. 18, № 11, P. 1422-1434.
- [4] Pavlov A.V., Pavlova N.M. Mechanism of the post-midnight winter night-time enhancement in the NmF2 over Millstone Hill during 14-17 January 1986. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2005, V. 67, № 4, P. 381-395.
- [5] Pavlov A.V., Pavlova N.M. Causes of the mid-latitude NmF2 winter anomaly at solar maximum. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2005, V. 67, № 10, P. 862-877.
- [6] Stankov S., Jodogne J.C., Kutiev I., Stegen K., Warnant R., Evaluation of automatic ionogram scaling for use in real-time ionospheric density profile specification: Dourbes DGS256/ARTIST4 performance // *Ann. Geophysics.* V. 55. № 2. P. 283–291. doi:10.4401/ag4976. 2012.
- [7] Titheridge J.E. Ionogram analysis with the generalized program Polan. Boulder. CO USA: National Data Center. 189 p. 1985.

- [8] R. W. Schunk, A.F. Nagy. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Cambridge University Press, 2004. P. 554.
[9] Liu, L., H. Le, W. Wan, M. P. Sulzer, J. Lei, and M.-L. Zhang (2007), An analysis of the scale heights in the lower topside ionosphere based on the Arecibo incoherent scatter radar measurements, *J. Geophys. Res.*, 112, A06307, doi:10.1029/2007JA012250.

REFERENCES

- [1] Bailey G.J., Sellek R., Balan N. The effect of interhemispheric coupling on nighttime enhancement in ionospheric total electron content during winter at solar minimum. *Ann. Geophys.* **1991**, V. 9, № 11, P. 738-747.
[2] Mikhailov A.V., Leschinskaya T.Yu., Förster M. Morphology of NmF2 nighttime increases in the Eurasian sector. *Ann. Geophysicae.* **2000**, V. 18, № 6, P. 618-628.
[3] Mikhailov A.V., Forster M., Leschinskaya T.Y. On the mechanism of the post-midnight winter NmF2 enhancements: dependence on solar activity. *Ann. Geophys.* **2000**, V. 18, № 11, P. 1422-1434.
[4] Pavlov A.V., Pavlova N.M. Mechanism of the post-midnight winter night-time enhancement in the NmF2 over Millstone Hill during 14-17 January 1986. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* **2005**, V. 67, № 4, P. 381-395.
[5] Pavlov A.V., Pavlova N.M. Causes of the mid-latitude NmF2 winter anomaly at solar maximum. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* **2005**, V. 67, № 10, P. 862-877.
[6] Stankov S., Jodogne J.(C., Kutiev I., Stegen K., Warnant R., Evaluation of automatic ionogram scaling for use in real-time ionospheric density profile specification: Dourbes DGS256/ARTIST4 performance // *Ann. Geophysics.* V. 55. № 2. P. 283–291. doi:10.4401/ag4976. **2012**.
[7] Titheridge J.E. Ionogram analysis with the generalized program Polan. Boulder. CO USA: National Data Center. 189 p. **1985**.
[8] R. W. Schunk, A.F. Nagy. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Cambridge University Press, **2004**. P. 554.
[9] Liu, L., H. Le, W. Wan, M. P. Sulzer, J. Lei, and M.-L. Zhang (2007), An analysis of the scale heights in the lower topside ionosphere based on the Arecibo incoherent scatter radar measurements, *J. Geophys. Res.*, 112, A06307, doi:10.1029/2007JA012250.

УДК 550.383

А.Ф. Яковец¹, Г.И. Гордиенко¹, Б.Т. Жумабаев¹, Ю.Г. Литвинов¹, Н. Абдрахманов²

¹ЕЖШС «Ионосфера институты» «ҰҒЗТО» АҚ, Алматы;

²Қорқыт ата атындағы Қызылорда мемлекеттік университеті

МАКСИМУМ F2-ҚАБАТЫНЫҢ ТҮНГІ КӨБЕЙУЛЕРІНІҢ ЖҰҚА ҚҰРЫЛЫМЫ

Аннотация. Түнде F2-қабатының максималды деңгейінде электрондардың концентрациясының ұсақ құрылымының көбейуіне талдау жасалынды. F2 - қабатының параметрлерінің мінез-құлқына нақты мысал келтіріліп, бірнеше кезеңнен тұратын көбеюдің қалыптасу механизмі қарастырылды. Бұл кезеңдер экваторға бағытталған меридианға арналған термосфералық желдің жылдамдығын біртіндеп арттырады, және де рекомбинация жылдамдығын айтарлықтай төмендететін F2-қабатын көтереді, сондықтан қабаттағы электрондардың концентрациясын жоғарлауы басталады. Электрондардың концентрациясының өсуі F2-қабатындағы электрондардың температурасын төмендетуге және плазмалық ағынның жылдамдығының төмендеуіне әкеледі. Төмендетілген бағытталған плазма жылдамдығының жоғарылауы плазманың F2 - қабатына қосымша жеткізілуін қамтамасыз етеді, яғни электрондық тығыздығының артуына әкеледі және т.с.с. Бұл өзін-өзі қамтамасыз ететін көшкін сияқты үрдіс NmF2- шыңын құрайды. Термосфералық желдің hmF қабатының биіктігіне тиісті төмендей бастаған кезде үрдіс тоқтатылады. Қабат рекомбинациясы жоғары болатын биіктіктерге қайта оралады. NmF2 азая бастайды және сипатталған процесс қалпына келтіріледі.

Кілт сөздер: ионосфера, тік зондтау, түндік электрондардың концентрациясының артуы.

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;

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;

Абдрахманов Нуртаза, канд. ф.-мат. наук, Қызылординский государственный университет им. Қорқыт ата, Қызылорда