

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Журнал засновано в лютому 1995 р. ♦ Виходить 6 разів за рік

КИЇВ

Том 11, № 3/4, 2005

KYIV

ЗМІСТ

Григоренко Е. І., Пазюра С. А., Таран В. І., Черногор Л. Ф.
Аномальная ионосферная буря 20—23 марта 2003 г.: результаты измерений и моделирования

Григоренко Е. І., Пазюра С. А., Таран В. І., Черногор Л. Ф.
Сильнейшая геокосмическая буря 30—31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования

Залюбовский И. И., Карташев В. М., Ковтун В. Е., Лебедев А. В., Минко О. К., Шматко Е. С. Собственное электрическое поле избыточного заряда электронно-фотонных ливней и метод его детектирования на больших расстояниях

Леонов М. А. Особливості часової структури даних, отриманих в моменти інжекцій електронів в магнітосферному експерименті Г60С

Гоков А. М., Тирнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Экспериментальное исследование реакции среднеширотной D-области ионосферы на рентгеновские и оптические вспышки

CONTENTS

- 4 *Grigorenko Ye. I., Pazura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F.*
Anomalous ionospheric storm on 20—23 March 2003: Some results of measurements and simulation
- 20 *Grigorenko Ye. I., Pazura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F.*
The severe geomagnetic storm on 30—31 May 2003: Results of measurements and simulation
- 38 *Zalyubovsky I. I., V. M. Kartashov, Kovtun V. E., Lebedev A. V., Minko O. K., Shmatko E. S.* Self-electric field of the electron-photon shower excess charge and the technique for its detection at long distances
- 48 *Leonov M. A.* Peculiarities of temporal structure of data obtained during electron beam injection pulses in the magnetospheric experiment G60S
- 56 *Gokov A. M., Tyrnov O. F., Chernogor L. F.* The response of the ionospheric D region to X-ray and optical flares as observed by partial reflection technique at mid-latitudes

- Опачко І. І.** Про можливість часопролітного мас-спектрометричного детектування корпускулярних потоків на космічних аппаратах
- Лялько В. І., Сахацький О. І., Шпортиuk З. М., Сибирцева О. М.** Оцінка точності результатів топографічної корекції даних космозйомки гірських територій в залежності від точності цифрової моделі рельєфу
- Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Боднар Е. Н., Козлов З. В.** Оценка эффективности космических систем ДЗЗ на основе метода анализа иерархий
- Станкевич С. А.** Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аерокосмічних зображень
- Кириллов А. И., Кириллова Н. А., Махонин Е. И.** Формирование и отображение планов работы полезной нагрузки космических аппаратов и получение данных дистанционного зондирования Земли с применением программных пакетов ГИС-технологий
- Волошин В. И., Капустин Е. И., Кириллов А. И., Кириллова Н. А., Засуха С. О.** Информационные технологии в управлении работой полезной нагрузки космических аппаратов по дистанционному зондированию Земли
- Антонова В. А., Борщев В. Н., Листратенко А. М., Тымчук И. Т.** Разработка и исследование солнечных батарей для системы энергоснабжения украинского молодежного спутника
- Сливинский В. И., Сливинский М. В.** Эффективность применения сотовых конструкций в ракетно-космической технике
- Куссуль Н. М., Лавренюк А. М., Шелестов А. Ю., Лобунець О. Г., Скакуп С. В.** Розробка віртуального інформаційного середовища для спільнотного виконання космічних проектів
- Губарев В. Ф., Самойленко Л. И., Ильченко Т. В., Подгородецкая Л. В., Колос Л. Н., Кирносова М. А.** Структурная целевая модель космической деятельности в Украине
- Криводубський В. Н.** Роль механізмов магнітної накачки в формуванні «королівської зони» сонячних пятен
- Лесняк Ю. І., Демків О. Т.** Сприйняття і реалізація гравістимулу у протонемі мохів
- 68 Opachko I. I.** On possibility of time-of-flight detection of corpuscular currents aboard space vehicles
- 70 Lyalko V. I., Sakhatskyi O. I., Shportyuk Z. M., Sybirtseva O. M.** Estimation of the topographic correction accuracy for satellite data on mountain regions in relation to the digital elevation model accuracy
- 75 Fedorovsky A. D., Yakimchuk V. G., Bodnar H. N., Kozlov Z. V.** Efficiency evaluation of remote sensing space systems based on hierarchy analysis method
- 81 Stankovich S. A.** Statistical approach to determination of threshold modulation of digital aerospace images
- 85 Kirillov O. I., Kirillova N. A., Mahonin Ye. I.** Forming and display of spacecraft payload work plans and deriving remotely sensed data with the use of GIS-technologies program packages
- 88 Voloshyn V. I., Kapustin Ye. I., Kirillov O. I., Kirillova N. A., Zasukha S. O.** Information technologies in control of spacecraft payload work on remote sensing of the Earth
- 92 Antonova V. A., Borschew V. N., Listratenko A. M., Tymchuk I. T.** Development and investigation of solar batteries for the solar energy system of the Ukrainian Youth Satellite
- 96 Slyvyn's'kyj V. I., Slyvyn's'kyj M. V.** Efficiency of application of cellular designs in rocket-space technology
- 100 Kussul N. M., Lavrenyuk A. M., Shelestov A. Yu., Lobunets O. G., Skakun S. V.** A virtual informational environment for collaborative space research project development
- 103 Gubarev V. F., Samoilenco L. I., Ilyenko T. V., Pidgorodetska L. V., Kolos L. N., Kirnosova M. A.** The structural purpose model of space activity in Ukraine
- 112 Kryvodubskyj V. N.** A role of magnetic pumping mechanisms in the formation of a sunspot «royal zone»
- 120 Lesnyak Yu. I., Demkiv O. T.** Perception and realization of gravistimulation in protonema of mosses
- 124 OUR AUTHORS**

**13 квітня 2005 р. виповнилось 70 років
директорові Інституту геофізики імені С. І. Субботіна
Національної академії наук України
академікові НАН України**

Віталію Івановичу СТАРОСТЕНКУ

**Редакційна колегія журналу
сердечно вітає Віталія Івановича з ювілеєм
і зичить йому міцного здоров'я та наслаги
для здійснення всіх його творчих задумів**

УДК 550.388+520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, С. А. Пазюра¹, В. И. Таран¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери НАН і МОН України, Харків

²Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

Аномальная ионосферная буря 20—23 марта 2003 г.: результаты измерений и моделирования

Надійшла до редакції 14.10.04

Наведено результати спостережень та моделювання динамічних процесів в геокосмосі, які супроводжували двофазну іоносферну бурю 20—23 березня 2003 р. Найсильнішу негативну фазу цієї бури можна віднести до аномальної, через те що вона проходила на фоні помірного збурення геомагнітного поля ($Ap = 29$, $K_p = 5$). Розглянуто основні механізми, які формують розвиток позитивної та негативної фаз бурі. Особлива увага приділена діагностиці процесів, що супроводжували зміну фаз бурі, яка відбулася у період заходу Сонця (біля 18.00 UT). Проведено моделювання та дослідження ефектів термосферних збурень, а також теплового режиму нейтральних і заряджених складових верхньої атмосфери Землі під час бурі. Спостереження виконано за допомогою радара некогерентного розсіяння у Харкові.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением исследований двухфазной ионосферной бури (ИБ) 20—23 марта 2003 г. [9]. Ионосферные измерения в Харькове проводились в соответствии с международной программой Storms/TIMED/LTCS с помощью единственного в среднеширотной Европе радара некогерентного рассеяния (НР). Метод НР является высоко эффективным диагностическим средством исследования эффектов бури в околосолнечном пространстве. Ионосферная и геомагнитная бури, как известно, относятся к одним из проявлений геокосмических бурь. Последние зарождаются в недрах Солнца, охватывают межпланетное пространство, в том числе систему Солнце — Земля, и вызывают глубокие изменения в состоянии различных областей геокосмоса. На Земле бури могут вызывать сбои в работе мощных энергетических систем, систем навигации и дальней радиосвязи, влиять на погоду, здоровье людей и состояние всей биосфера. Исследование последствий геокосмической бури и вызванных ею вариаций космической погоды с целью предупреждения технологических катастроф и неблагоприятных биогеофизических условий стало актуальной задачей солнечно-земной физики.

Накопленный на протяжении многих десятилетий обширный материал об ионосферных буриях свидетельствует о большом разнообразии их типов и характера протекания вследствие сложного взаимодействия комплекса процессов в геокосмосе, формирующих бури. Этим объясняется практически уникальный характер каждой бури, что затрудняет решение задачи моделирования и прогнозирования возмущенной ионосферы. Исследование каждой бури дает важную информацию для понимания формирующих ее процессов.

Результаты наблюдения рассматриваемой бури описаны в работах [9, 12]. Показано, что сильнейшую отрицательную фазу этой бури, которая сопровождалась уменьшением концентрации электронов до пяти раз, можно отнести к аномальной, поскольку она протекала на фоне умеренного геомагнитного возмущения ($Ap = 29$, $K_p = 5$). Подробно рассмотрены основные механизмы, формирующие положительную и отрицательную фазы бури. Особое внимание удалено диагностике процессов, сопровождавших смену фаз бури. Эти данные представляют значительный интерес, поскольку вопрос о характере чередования фаз бури и причинах смены фаз изучен недостаточно полно.

Настоящая работа посвящена исследованию и моделированию эффектов термосферных возмуще-

$$N(x_{\max}) = N_{\max} = \frac{0.31}{\sqrt{\ln(E_0/E_{cr})}} \cdot \frac{E_0}{E_{cr}}. \quad (2)$$

Радиальное относительно оси ливня распределение плотности числа заряженных частиц в ливневом диске (число частиц, отнесенное к единичной площадке) также принято описывать аппроксимацией Грейзена [13]

$$\rho(r, x) = \frac{0.443 s^2 (1.9 - s)}{2\pi r_m^2} \left(\frac{r}{r_m} \right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_m} \right)^{s-4.5} N(x), \quad (3)$$

в которой R — текущее расстояние частиц от оси ливня, $r_m = E_s x_0 / (E_{cr} \rho_{sub})$ — радиус Мольер, $E_s = 21$ МэВ, ρ_{sub} — плотность вещества (плотность воздуха на уровне моря при нормальных условиях $\rho_{air} = 1.225 \cdot 10^{-3}$ г/см³, плотность галита $\rho_{NaCl} = 2.165$ г/см³), $r_m = 78.9$ м для воздуха на уровне моря и $r_m = 5.95$ см для галита.

Электронно-фотонный ливень с энергией выше 100 ТэВ, развивающийся в атмосферном воздухе, называется широким атмосферным ливнем. Он имеет особенности своего развития, связанные с тем, что первичными частицами для него в подавляющем большинстве случаев являются космические протоны или ядра. В первых ядерных взаимодействиях они дают начало ядерно-каскадному процессу, в котором в каждом первом и последующих взаимодействиях сохраняются первичные частицы, унося в среднем половину своей энергии, и происходит множественное каскадное рождение π^- , π^+ - и π^0 -мезонов. Каждый из π^0 -мезонов очень быстро распадается на два γ -кванта, которые дают начало парциальным электронно-фотонным ливням. Поэтому широкий атмосферный ливень (ШАЛ) представляет собой суперпозицию парциальных ливней и подпитывается ядерно-каскадным процессом почти на протяжении всего пути своего развития и затухания. По этой причине его каскадная кривая и число частиц в максимуме не могут быть рассчитаны по формулам (1, 2). Для уровня моря экспериментальным путем была найдена связь полного числа частиц с энергией первичной частицы ШАЛ [20]:

$$E_0 = (7.7 \pm 2.5) \cdot 10^{17} \left(\frac{N}{10^8} \right)^{0.86 \pm 0.06}, \quad (4)$$

в которой E_0 вычисляется в эВ, а $N \geq 10^8$.

Радиальное распределение плотности числа заряженных частиц ШАЛ описывается с использованием двух возрастных параметров s . На периферии распределения возрастной параметр изменяется с

толщиной x пройденного пути так же, как и для электронно-фотонного ливня (см. формулу (1)). На малых и средних расстояниях s остается близким к единице в широком интервале x из-за непрерывного обновления частиц за счет ядерно-каскадного процесса. Поэтому радиальную плотность числа частиц ШАЛ описывают видоизмененной аппроксимацией Грейзена, которая для энергии $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ ($N \geq 10^9$) и уровня моря имеет вид [20]:

$$\rho(r) = \frac{1.6}{2\pi r_m^2} \left(\frac{r}{r_m} \right)^{-1} \left(1 + \frac{r}{r_m} \right)^{-2.6} N. \quad (5)$$

СОБСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ШАЛ

Продольный релятивистский ток избыточных электронов ШАЛ создает в воздухе на уровне моря, на расстоянии R от его оси напряженность электрического поля, которая выражается интегралом

$$\tilde{E}_t(t, R) = 3 \cdot 10^4 \int_{E_{min}}^{E_0} dE \int_0^\infty dr \int_0^{2\pi} F_{ev}(E) \rho(r) \times \tilde{E}_s(t, R) \cos \alpha d\varphi_r, \quad (6)$$

$$\tilde{E}_s(t, R) = \frac{e(1 - \beta^2)}{\varepsilon_{air} L^2 (1 - \beta^2 \sin^2 \theta)^{3/2}},$$

$$\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{mc^2}{E + mc^2} \right)^2},$$

$$\sin \theta = \sqrt{1 - [\beta c(t - \tau)/L]^2},$$

$$L = \sqrt{R^2 + r^2 - 2rR \cos \varphi_r + [\beta c(t - \tau)]^2},$$

$$\tau = \frac{n_{air}}{c} \sqrt{R^2 + r^2 - 2rR \cos \varphi_r}.$$

Здесь $\tilde{E}_s(t, R)$ — напряженность электрического поля равномерно движущегося электрона в воздухе [30], e — заряд электрона, β — отношение скорости частицы к скорости света в вакууме, mc^2 и E — соответственно энергия покоя и кинетическая энергия электрона, θ — угол между направлением скорости частицы и направлением ее электрического поля [35], $\varepsilon_{air} \approx 1$ — диэлектрическая проницаемость воздуха, L — расстояние от точки наблюдения до ливневого электрона в момент времени t [35], φ_r — азимутальный угол радиуса-вектора ливневого электрона, τ — время распространения в среде электрического поля от ливневого электрона до точки наблюдения, совпавшей с плоскостью ливневого диска [35], $n_{air} = \sqrt{\varepsilon_{air}} \approx 1$, $\cos \alpha = (R - r \cos \varphi_r)/L$ —

ний, а также теплового режима нейтральных и заряженных компонент верхней атмосферы Земли во время бури. Кроме того, пересмотрены и дополнены некоторые результаты измерений, приведенные в работе [9]. Они представлены здесь в более широком диапазоне высот и времени. Это позволило подробнее рассмотреть эффекты ионосферной бури на фоне соседних дней.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ И ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ

Магнитная буря (МБ) была вызвана серией интенсивных рентгеновских вспышек на Солнце. Они сопровождались выбросами корональной массы, высокоскоростными потоками солнечного ветра, но геoeffективность возмущений на Солнце была невысокой. Их результатом явилась умеренная магнитная буря 20—21 марта 2003 г. с индексами $Ap = 21$ и 29 , $K_p_{\max} = 5$. Буря началась внезапно 20 марта около 04:45 (здесь и далее время UT). Момент начала бури определен точно с помощью магнитометра-флюксметра Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина [4]. Во время главной фазы бури индекс Dst достиг значения -57 нТл в 20.00, после чего началась фаза восстановления. Основные параметры геокосмической обстановки иллюстрируют рис. 1 и 2.

Используя минимальное значение индекса $Dst \approx -57$ нТл, продолжительность главной фазы 13 ч и максимальное значение давления солнечного ветра $p_{sw} \approx 2.8$ нПа, по соотношениям из [34] легко оценить энергию и мощность бури. Они оказались близки к $2.5 \cdot 10^{15}$ Дж и $5.3 \cdot 10^{10}$ Вт. Энергия такой бури эквивалентна энергии 0.6 Мт тротила. Энергия и мощность рассматриваемой бури соответственно в 15 и 30 раз меньше энергии и мощности крайне сильной бури.

Магнитная буря вызвала двухфазную ионосферную бурю. На рис. 3, *a* показаны вариации критических частот $f_0 F2$. Они получены из ионограмм станции вертикального зондирования «Базис» в Харькове и станции в Сан-Вито (географические координаты: 40° с.ш., 17° в.д.). Последние привлечены для выбора контрольных (невозмущенных) суток, в качестве которых взяты сутки 19 марта ($Ap = 14$, $K_p \leq 4$). Рис. 4 иллюстрирует вариации отклонения критической частоты $\delta f_0 F2$ в течение двухфазной ионосферной бури 20—23 марта 2003 г. Видно, что начальная, положительная, фаза ионосферной бури носила характер длительного возмущения (примерно 6 ч) с наибольшим отклонением $\delta f_0 F2$ около $+20\%$. Смена фаз произошла в тече-

ние 17:00—18:00. Отрицательная фаза была более интенсивной, максимальное отклонение $\delta f_0 F2$ достигло -60% , ее запаздывание относительно начала магнитной бури составило около 14 ч. Поведение основных параметров ионосферы: концентрации электронов (в IgN_e), температур электронов T_e и ионов T_i , вертикальной скорости переноса плазмы V_z в течение ионосферной бури 20—21 марта приведены на рис. 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ

Концентрация электронов и высота максимума слоя $F2$. Положительная фаза ионосферной бури 20 марта сопровождалась увеличением критической частоты $f_0 F2$ по сравнению с контрольным днем. Наибольшее отклонение $\Delta f_0 F2$ составило 1.6 МГц около 14:00 (начало измерений на радаре), что соответствовало увеличению $NmF2$ примерно в 1.5 раза (рис. 3, *b* и 5). При этом высота максимума слоя $hmF2$ увеличилась примерно на 20 км (рис. 3, *b*) по сравнению с контрольным днем 19 марта (по данным харьковского радара), а также 22—23 сентября 1998 г., который рассматривался как спокойный день (см. рис. 2 из работы [10]). В этот день $f_0 F2$ достигла максимальной величины 11.3 МГц вблизи полудня.

Отрицательная фаза началась 20 марта около 18:00 и наблюдалась до конца измерений. Максимальное падение $f_0 F2$ отмечалось 21 марта около 07:00 и составило 5.1 МГц, что соответствовало уменьшению $NmF2$ в 5.3 раза (рис. 3, *b* и 5). Уменьшение N_e отмечалось во всем диапазоне высот 100—550 км (рис. 6). Максимальное значение $f_0 F2$ 21 марта составило 5.8 МГц. Поведение высоты $hmF2$ 19 марта и в утренние часы 20 марта (рис. 3, *b*) можно считать характерным для слабо возмущенной среднеширотной ионосферы: $hmF2 \approx 350$ км ночью и 250 км днем. Уменьшение $hmF2$ с восходом Солнца, как известно, обусловлено регулярными суточными изменениями нейтрального состава, фотохимических процессов и термосферных ветров: меридиональная составляющая ветра ночью направлена к экватору и способствует подъему слоя на более высокие уровни. Днем она обращена к полюсу, что вызывает уменьшение $hmF2$. Во время отрицательной фазы $hmF2$ увеличилась по сравнению с контрольным периодом 19—20 марта примерно на 100—130 км в ночь 20—21 марта и на 100 км вблизи восхода Солнца.

Температуры электронов и ионов. На рис. 7 приведены вариации температур электронов T_e и

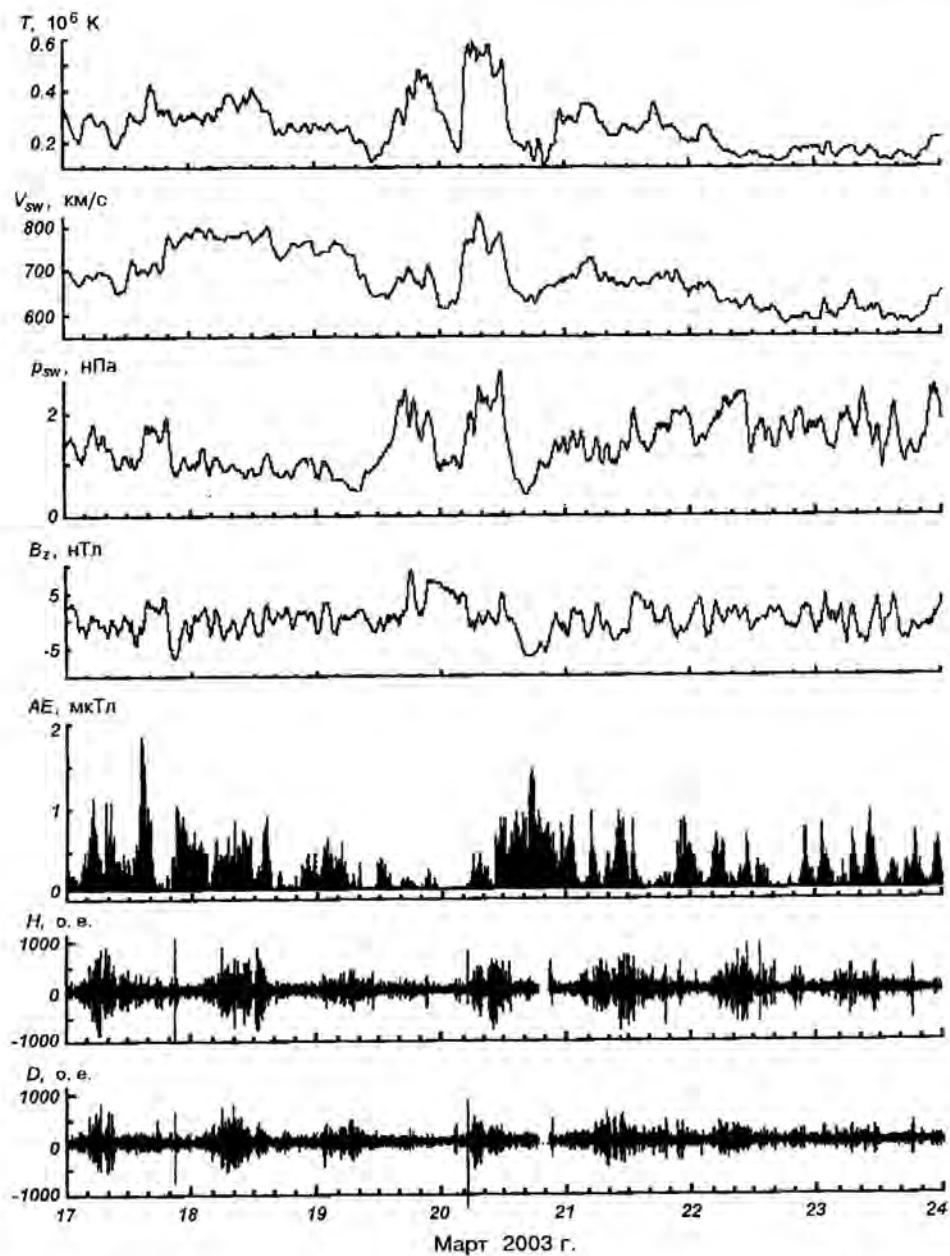


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра: температуры T , радиальной скорости V_{sw} и динамического давления p_{sw} (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), B_z -составляющей межпланетного магнитного поля (ACE Satellite — Magnetometer), AE -индекса (WDC Kyoto) и H -, D -компонентов геомагнитного поля (по данным магнитометра-флюксметра Харьковского национального университета) в период 17—23 марта 2003 г.

ионов T_i в течение 19—23 марта. В спокойной ионосфере при средней солнечной активности значения T_e быстро увеличиваются во время восхода Солнца, уменьшаются вблизи полудня за счет увеличения теплопередачи от электронов к ионам, которая пропорциональна N_e^2 , и уменьшаются после

захода Солнца (см. данные за 22 марта, близкие к спокойному дню: $Ap = 16$). В контрольный день 19 марта, например, в 14:00 на высоте 300 км $T_e \approx 1700$ К. В последующие даты поведение T_e определялось значениями N_e , т. е. характером ионосферного возмущения. Так, во время положи-

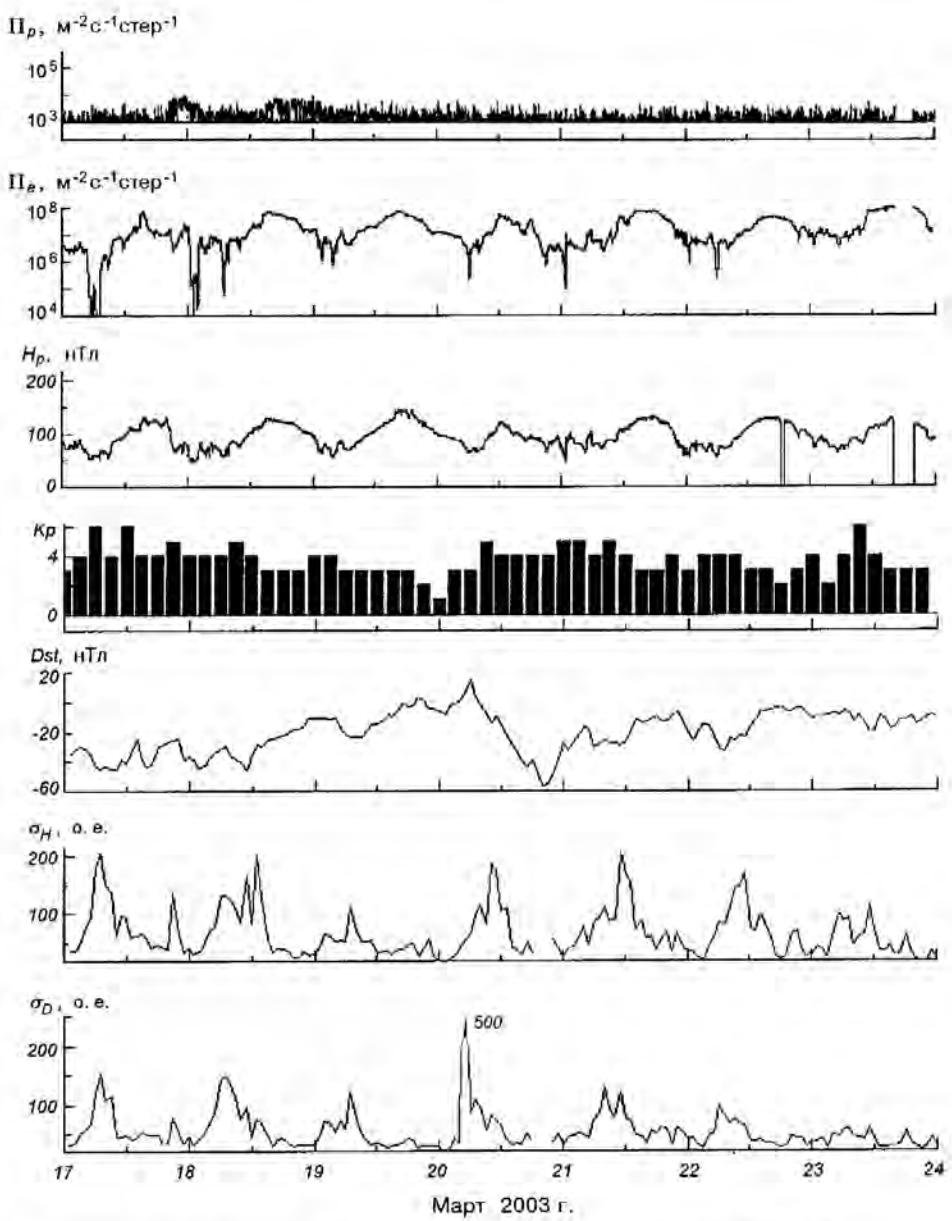
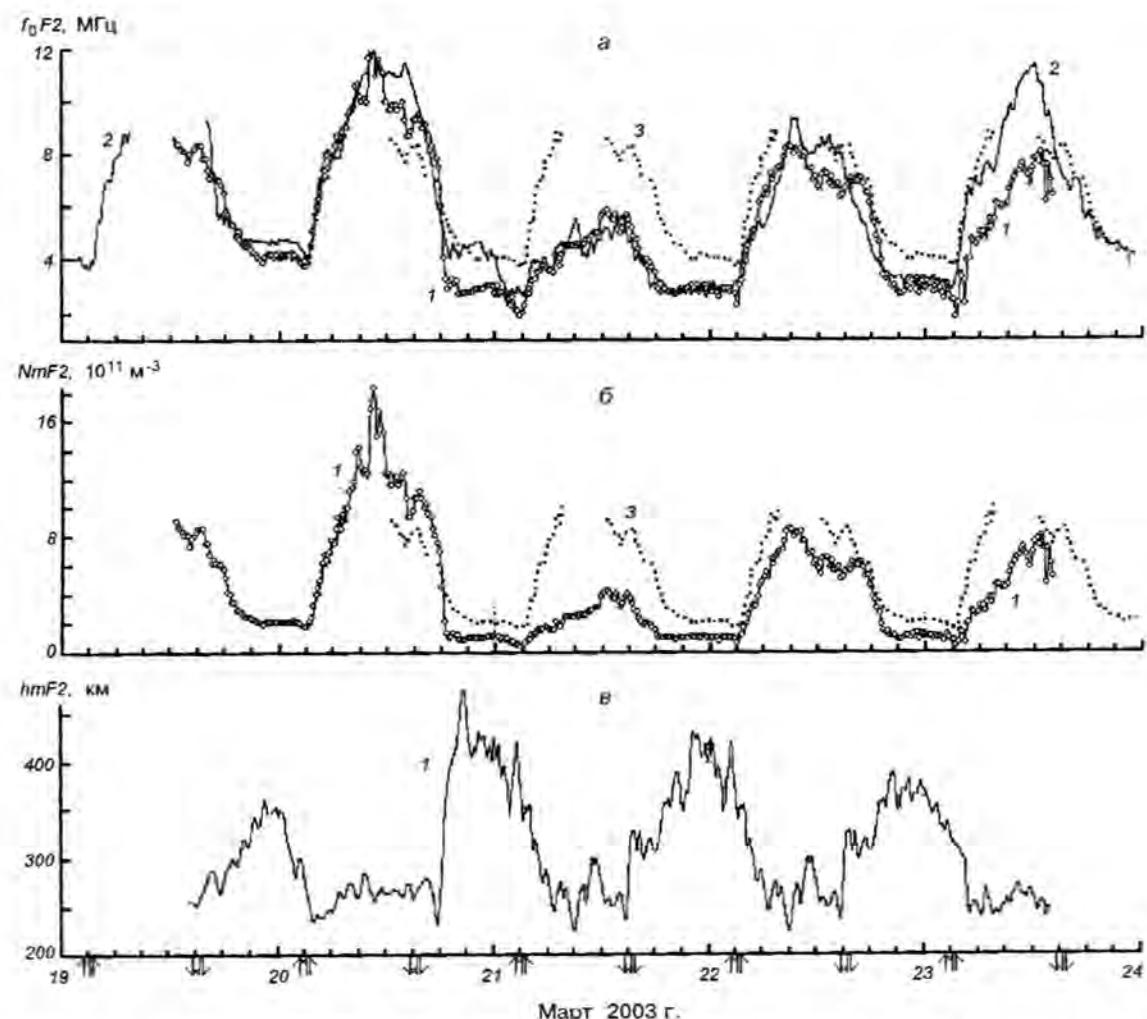


Рис. 2. Временные вариации потоков протонов (ИСЗ GOES-8, W75) и электронов (ИСЗ GOES-12), компонента H_p геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), Kp -индекса (Air Force Weather Agency), индекса Dst (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и стандартных отклонений компонентов H , D геомагнитного поля (с часовым усреднением) (по данным магнитометра-флюксметра ХНУ) в период 17—23 марта 2003 г.

тельной фазы 20 марта $T_e = 1300$ К, во время отрицательной фазы 21 марта $T_e = 2400$ К.

Суточные изменения T_i (в контрольный день 19 марта и слабо возмущенный день 22 марта) были небольшими. С восходом Солнца T_i увеличилась примерно от ночных значений 850 К на высоте 300 км до дневных значений 1050 К. Вечером наблюдалось уменьшение T_i к ночному уровню. В

возмущенные даты днем наблюдалось небольшое увеличение T_i , как в положительную, так и в отрицательную фазы бури. Например, на высотах 250—300 км оно составило около 50 К 20 марта и 100—150 К 21 марта. По-видимому, увеличение T_i было связано с высокоширотным источником нагрева атмосферы во время магнитной бури [17, 21]. Следует отметить, что эти эффекты в течение



Март 2003 г.

Рис. 3. Вариации параметров слоя $F2$ 19—23 марта 2003 г.: 1 — в Харькове, 2 — в Сан-Вито, 3 — в контрольный день 19 марта 2003 г. по данным ионозондов в Сан-Вито и Харькове. Стрелки на горизонтальной оси здесь и далее обозначают моменты восхода (вверх) и захода (вниз) Солнца в Харькове (двойные) и в магнитосопряженной точке вблизи острова Мадагаскар (одинарные) на поверхности Земли

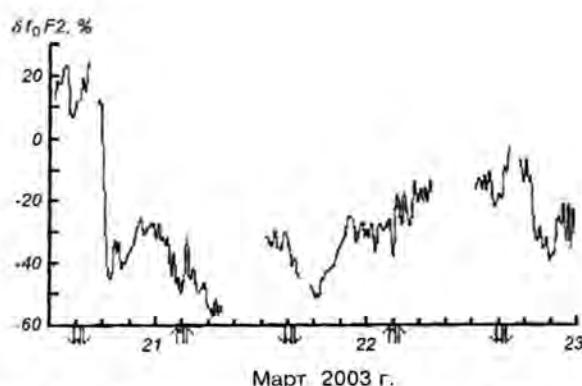


Рис. 4. Вариации отклонения критической частоты δf_0F2 в течение двухфазной ионосферной бури 20—22 марта 2003 г. по данным ионозонда в Харькове

рассматриваемой бури ($Ap = 21$ и 29) не были столь значительными, как, например, во время крайне сильной магнитной бури 25 сентября 1998 г. ($Ap = 121$, $K_p = 9$), когда увеличение T_i достигало 500 К. Особенности бури 1998 г. описаны нами в ряде работ [6—8, 10, 11, 13—16, 22—25, 29, 48]. Кроме того, 21 марта дополнительный нагрев ионного газа мог быть вызван повышенным теплообменом ионов с электронами за счет большей разности их температур в этот день (см. рис. 5 и 7).

Следует остановиться подробнее на применяемой методике определения температур T_i и T_e . Расчет T_i , T_e проводится с учетом ионного состава на высотах ниже максимума слоя $F2$. При этом отношения T_e/T_i и T_i/m_i , где m_i — масса ионов,

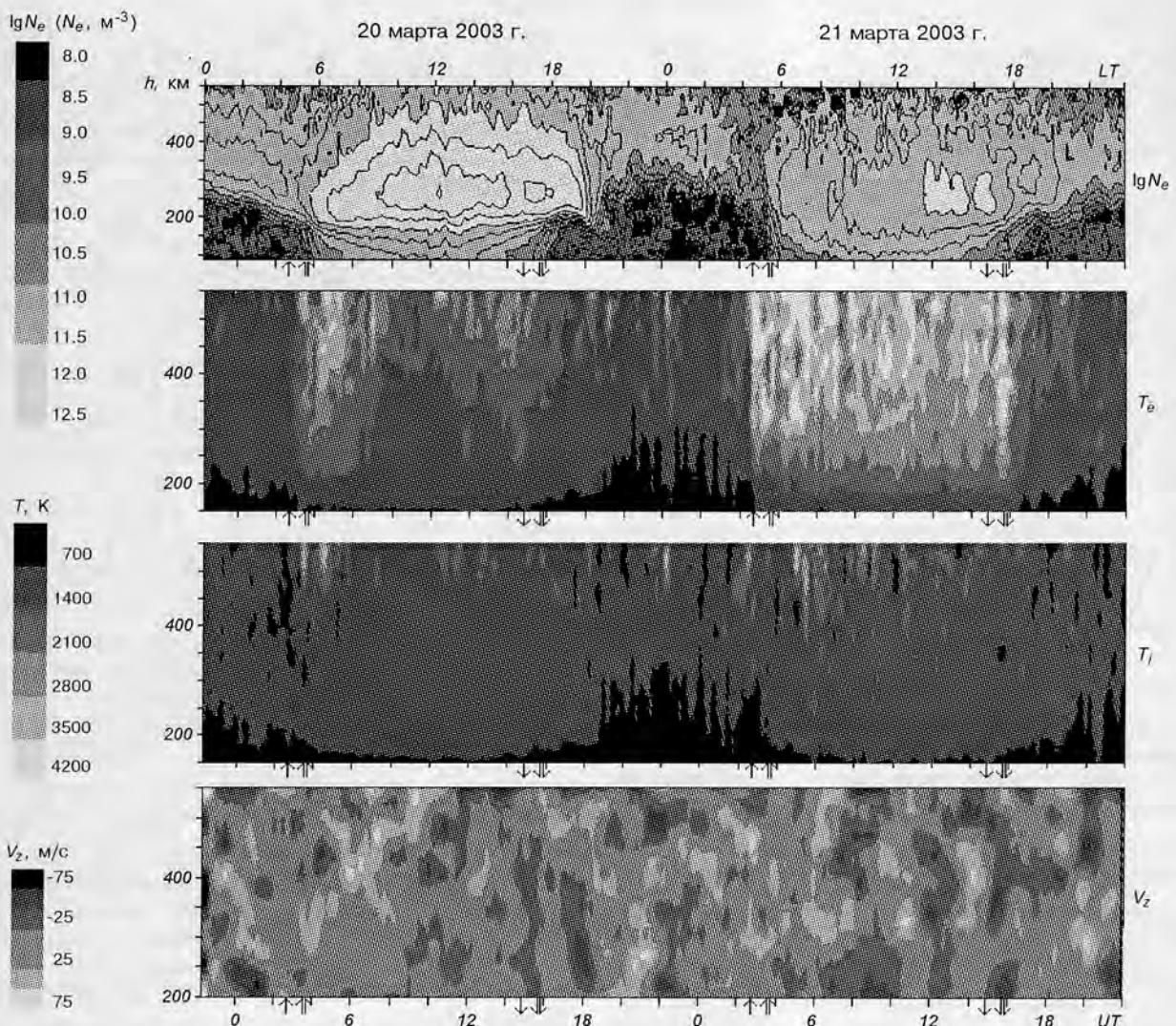


Рис. 5. Вариации параметров ионосфера 20—21 марта 2003 г. по данным харьковского радара НР: концентрация электронов (в $\lg N_e$), температуры электронов и ионов, вертикальная скорость переноса плазмы

находятся из измеренных корреляционных функций (КФ) рассеянного сигнала [31] путем сравнения их методом наименьших квадратов с библиотечной теоретических КФ. Для устранения неоднозначности в решении задачи накладываются определенные условия [41, 46]. Средний молекулярный вес ионов (O_2^+ и NO^+) взят равным 31. Задается постепенный переход от 100 % концентрации молекулярных ионов на высоте 120 км, где взято $T_e \approx T_i \approx T_n \approx 355$ К, к приблизительно 100 % концентрации ионов O^+ на высоте 230—300 км, выбираемой в зависимости от конкретных условий: день — ночь, зима—лето. Дополнительно введено ограничение на величину изменения T_i в пределах

высотного шага 10 км: $\Delta T_i(\max) = \pm 0.1 \cdot T_i$.

В спокойных условиях нижняя граница ионосферы (на уровне, например, $N_e \approx 0.1 N_m F2$) увеличивается от дневного значения примерно 100 км до 250—300 км ночью. Во время бури (в ночь 20—21 марта) она превышала 300—350 км. На меньших высотах, где N_e и отношение сигнал/шум q уменьшились на один-два порядка величины, определить температуры по КФ сигнала невозможно из-за большого разброса данных. Поэтому для нахождения температур T_i , T_e применялась линейная интерполяция между их значениями, заданными на нижней границе (120 км), и на высоте, где температуры определялись достаточно надежно (при N_e

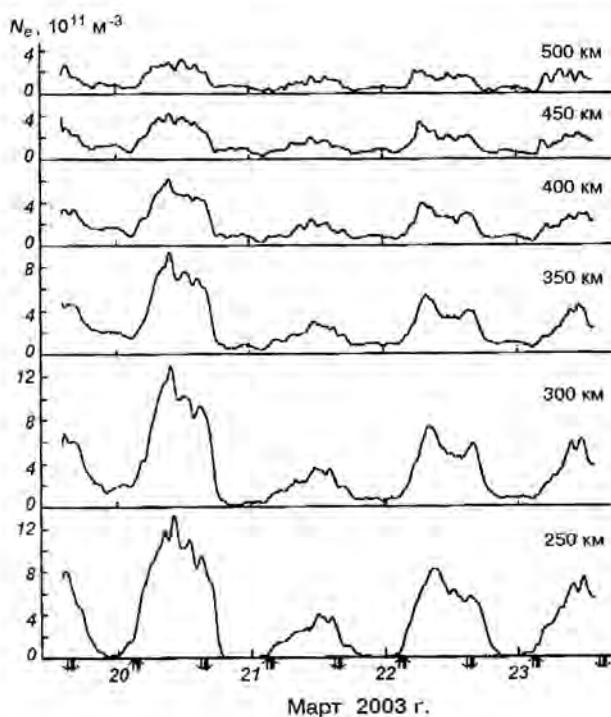


Рис. 6. Временные вариации электронной концентрации N_e на фиксированных высотах 19–23 марта 2003 г. (здесь и далее, кроме оговоренного, применено скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

$\approx 0.1 N_m F2$). Поэтому следует учитывать, что ночные значения T_i , T_e ниже 250–350 км непосредственно не рассчитываются и содержат дополнительную погрешность. Это обстоятельство следует принимать во внимание при расчете производных параметров ионосферы, например ночных значений температуры нейтралов T_n ниже 300 км (см. далее).

Следует отметить также, что применяемая методика недостаточно отражает изменения концентрации молекулярных ионов, которые особенно существенны в периоды возмущений, и дает погрешность в определении T_i , T_e , N_e . Проблема коррекции измеряемых параметров ионосферы T_i , T_e , N_e в зависимости от используемой модели ионного состава впервые обсуждалась в работе [49]. Известно, что эта проблема решается в современных моделях ионосферы, например [38, 46]. Сопоставление с данными о концентрации N_e , полученными на харьковском радаре методом фарадеевского вращения [5], позволило оценить ошибку определения T_i , T_e ниже максимума области F . В спокойных условиях она не превышала 15 %.

Вертикальная составляющая скорости переноса плазмы. Временные вариации скорости V_z на

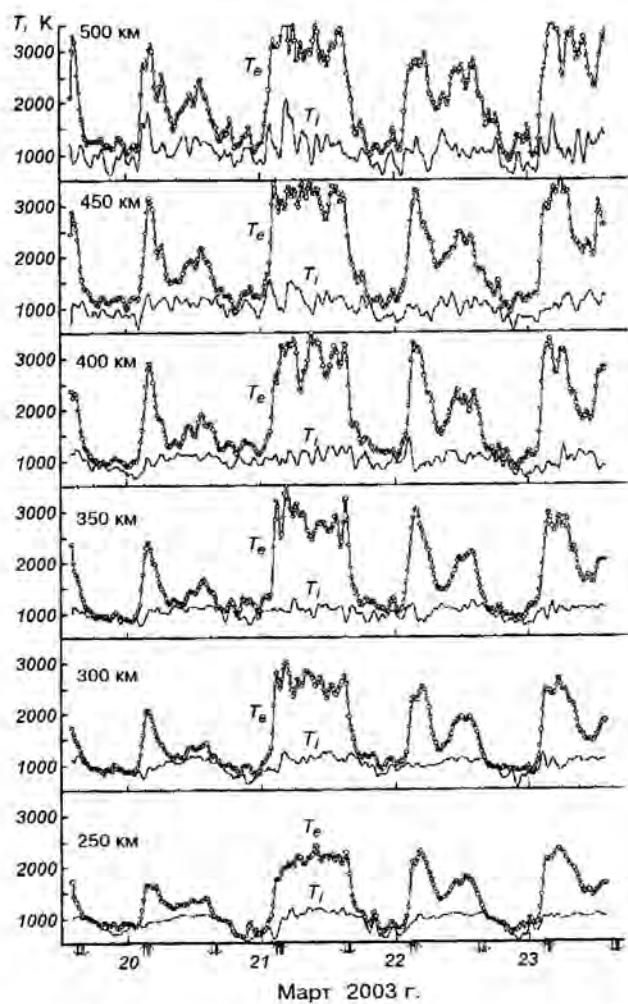


Рис. 7. Вариации температур электронов T_e и ионов T_i 19–23 марта 2003 г.

высотах 250–350 км для 20–21 марта приведены на рис. 8. Для сравнения привлечены данные 22–23 сентября 1998 г. (из-за отсутствия другого, более подходящего магнитоспокойного периода). Для этих суток $Ap = 10$ и 14, среднемесячный индекс $F_{10.7} = 138$, т. е. гелиофеофизические условия (равноденствие, средний уровень солнечной активности) в рассматриваемые периоды близки. Конечно, они находились на разных ветвях текущего 23-го цикла солнечной активности, но можно допустить, что их различия не были значительными. Для выявления основных особенностей поведения V_z применено скользящее сглаживание исходных сеансов на временном интервале 105 мин с шагом 15 мин.

Особенности суточного поведения вертикальной скорости переноса плазмы V_z в области максимума

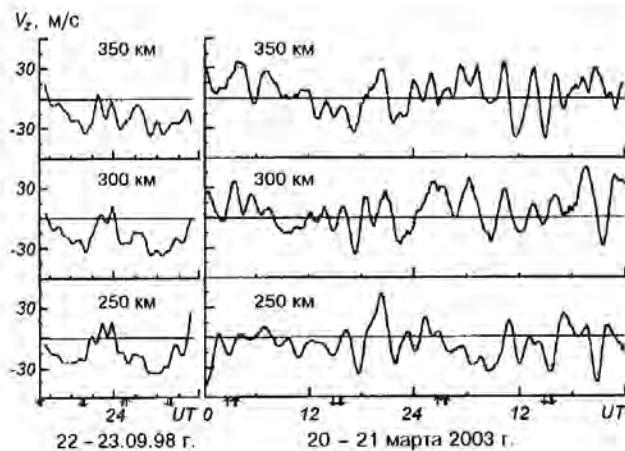


Рис. 8. Вариации вертикальной скорости переноса плазмы V_z в спокойный день 22–23 сентября 1998 г. и во время бури 20–21 марта 2003 г.

слоя $F2$, как известно, определяются воздействием трех факторов: амбиополярной диффузии вдоль геомагнитных силовых линий, термосферного ветра и дрейфа в скрещенных геомагнитном и электрическом полях. Сравнение суточных вариаций V_z в рассматриваемые периоды показало ряд особенностей, которые будут обсуждаться ниже. Так, вблизи местного полудня на высоте 300 км $V_z = -15$ м/с 20 марта 2003 г. и -25 м/с 22–23 сентября 1998 г. (статистическая погрешность оценки V_z в окрестности максимума слоя $F2$ составляла в среднем 5–7 м/с для использованного режима работы радара). Далее, вблизи захода Солнца 20 марта наблюдалось необычное квазипериодическое изменение V_z примерно от +10 м/с до -35 м/с и далее до +20 м/с на высоте 300 км в интервале времени 17:00–19:00.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, СОПУТСТВОВАВШИХ БУРЕ

Концентрация нейтралов. Состав нейтральной атмосферы, как известно, определяет скорости фотохимических реакций, процессов переноса плазмы и высотное распределение заряженных частиц. На рис. 9 приведены вариации концентрации основных компонентов нейтральной атмосферы: $N(N_2)$, $N(O)$, $N(O_2)$ — молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода на высоте 300 км в течение 19–23 марта 2003 г. Данные получены из эмпирической модели термосферы MSIS-86 [35]. К входным параметрам модели относятся поток солнечно-

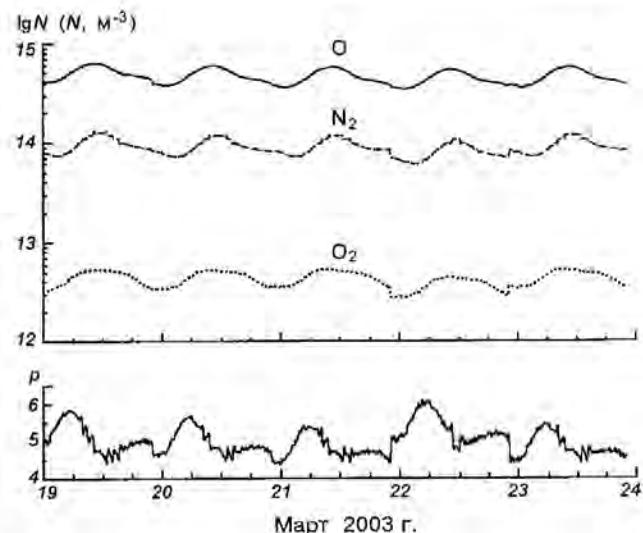


Рис. 9. Вариации концентрации основных компонентов нейтральной атмосферы и параметра p на высоте 300 км 19–23 марта 2003 г. (из расчета по модели MSIS-86)

го радиоизлучения $F_{10.7}$ в конкретный день и усредненный за три оборота Солнца — $F_{10.7A}$, а также суточный индекс геомагнитной активности Ap . Для анализа использовался параметр $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, который характеризует соотношение процессов образования и потерь ионов O^+ в фотохимическом приближении и примерно пропорционален $NmF2$. Во время отрицательной фазы 21 марта, например около 12:00, значения $NmF2$ уменьшились в два раза по сравнению с контрольным днем 19 марта. В это время согласно модели MSIS-86 концентрация $N(N_2)$ на высоте 300 км увеличилась на 7 %, $N(O_2)$ — на 10 %, $N(O)$ уменьшилась на 2 %. В результате значение p уменьшилось на 8 %.

Температура нейтрального газа. Нагрев нейтрального газа является одним из эффектов термосферных возмущений, связанных с магнитной бурей. Температура нейтралов T_n вычислялась по методике [44, 45] на основе уравнения теплового баланса ионного газа [3, 47]. В расчете использовались параметры ионосферы N_e , T_e , T_θ , измеренные непосредственно методом ИР. Для нахождения концентраций нейтральных компонентов привлекалась модель MSIS-86. Полагалось, что на высотах 250–300 км, где теплопроводностью газа можно пренебречь, скорость нагрева ионов O^+ за счет теплообмена с электронами можно приравнять скорость охлаждения за счет передачи тепла нейтральным частицам. Для этого случая уравнение теплового баланса имеет вид [44, 45]:

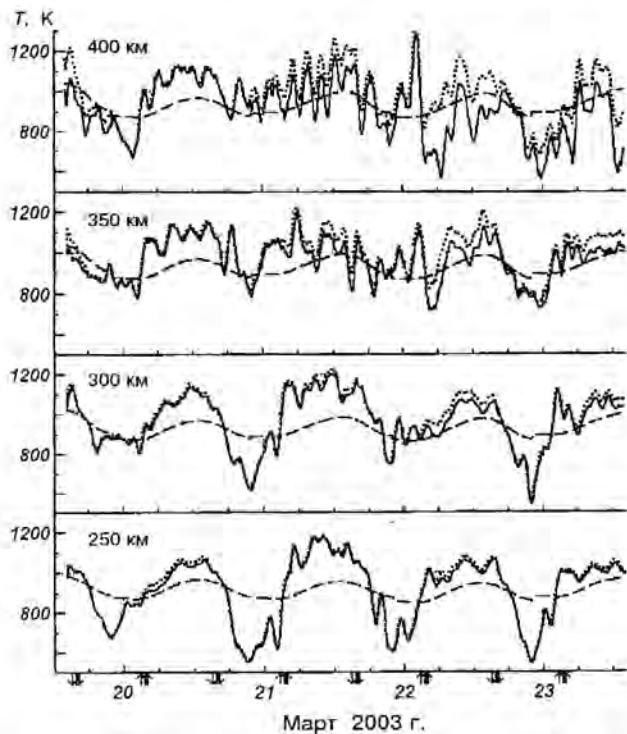


Рис. 10. Измеренные температуры ионов T_i (точки) и рассчитанные температуры нейтралов T_n по данным радара НР (сплошные линии) и $T_{n\text{MSIS}}$ по модели MSIS-86 (штриховые линии) 19–23 марта 2003 г.

$$T_i - T_n = \frac{4.82 \cdot 10^7 N_e (T_e - T_i) T_e^{-3/2}}{6.6N(N_2) + 5.8N(O_2) + 0.2N(O)(T_i + T_n)^{1/2}}$$

Рассчитанные значения T_n и их временные вариации в период 19–23 марта 2003 г. на высотах 250, 300, 350 и 400 км иллюстрирует рис. 10.

Анализ результатов расчета T_n из данных радара НР и $T_{n\text{MSIS}}$ из модели MSIS-86 обнаружил следующие особенности в поведении T_n : 1) температура T_n при переходе от 250 к 300 км мало изменилась, достигнув, по-видимому, значения температуры экзосферы; 2) на высотах 350 и 400 км значения T_n уменьшились (см. данные за 22 и 23 марта), что подтверждает некорректность принятой методики расчета T_n для больших высот, где следует учитывать теплопроводность заряженных и нейтральных компонентов атмосферы; 3) в слабо возмущенные сутки (22 марта) T_n на высоте 300 км изменялась примерно от 850 К ночью до 1050 К днем. В течение бури температура нейтралов в дневное время увеличилась в среднем на 50 К во время

положительной фазы (20 марта, $Ap = 21$) и на 100 К в течение отрицательной фазы (21 марта, $Ap = 29$); 4) расчеты T_n по данным радара и по модели MSIS-86 показали, что высота термопаузы, где атмосфера становится изотермичной, в данном цикле измерений составляла около 300 км; 5) модель MSIS-86 дает заниженные значения T_n в дневное время. Отличия T_n , рассчитанных по данным радара, от модельных значений $T_{n\text{MSIS}}$ на высоте 300 км составляли в слабо возмущенных условиях (22 марта) около 120 К, во время бури — до 150 К 20 марта и до 180 К 21 марта.

Как отмечалось в предыдущем разделе, применяемая нами методика расчета T_i , T_e недостаточно отражает изменения ионного состава. В работах [37, 38] показано, что некорректный учет ионного состава может привести, например, к занижению T_i , T_e во время возмущений до 50 %. Поэтому следует ожидать, что рассчитанные значения T_n дают лишь качественное представление о поведении возмущенной атмосферы.

Подвод энергии к электронам. Нагрев тепловых электронов осуществляется в процессе термализации сверхтепловых электронов, который в нижней части ионосферы ($h \leq 300$ км) из-за малости их длин свободного пробега носит локальный характер. Выше 200 км частота соударений электронов с нейтралами становится меньше, чем с ионами v_{ei} . Основными механизмами охлаждения электронного газа здесь являются кулоновские соударения с ионами, возбуждение уровней тонкой структуры атомов кислорода и теплопроводность электронного газа [3, 47]. Оценки показали (см. также [1]), что на высотах $h \leq 350$ км время переноса тепла электронами намного больше времени становления за счет первых двух механизмов, и теплопроводностью электронов можно пренебречь. Рассмотрим диапазон высот 300–350 км. Здесь уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае в системе СИ имеет вид [26, 30]:

$$Q = L_{ei} + L_e, \quad (1)$$

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N_e^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2}, \quad (2)$$

$$L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} N_e N(O) (T_e - T_i) T_n^{-1}, \quad (3)$$

где Q — энергия, передаваемая в единицу времени в единичном объеме тепловым электронам при кулоновских столкновениях со сверхтепловыми электронами, L_{ei} — энергия, теряемая при столкновении электронов с ионами, L_e — энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода.

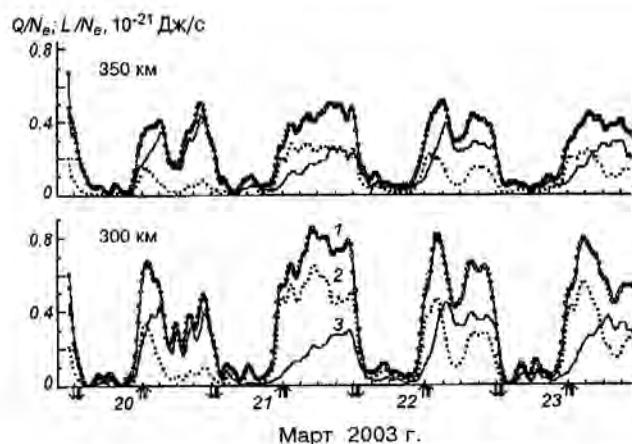


Рис. 11. Вариации скоростей нагрева электронного газа Q/N_e (1) и теплообмена электронов с атомами кислорода L_e/N_e (2) и ионами L_{ei}/N_e (3) 19—23 марта 2003 г.

На рис. 11 приведены результаты расчета энергии, подводимой к электрону в единицу времени (Q/N_e), а также составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами (L_{ei}/N_e) и нейтралами (L_e/N_e). В расчетах использовались значения T_e , T_i и N_e , полученные методом некогерентного рассеяния. Параметры T_n и $N(O)$ взяты из модели MSIS-86. Видно, что в разные даты вклад составляющих L_{ei}/N_e и L_e/N_e в процесс охлаждения электронного газа был разным. Например, в течение суток 20 марта при высоких значениях N_e преобладали в основном потери энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами; 21 марта при низких значениях N_e и более высокой разности температур ($T_e - T_i$) преобладающим стал процесс неупругого теплообмена электронов с нейтралами. В результате вблизи полудня на высоте 300 км подвод энергии к электронному газу Q/N_e во время отрицательной фазы бури (21 марта) превышал значение Q/N_e в течение положительной фазы (20 марта) в 2.5—4 раза, а в слабо возмущенные сутки (22 марта) — примерно в два раза. На высоте 300 км около 10:00 в слабо возмущенный день 22 марта $Q/N_e \approx 0.6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж/с}$, в возмущенные дни — $Q/N_e \approx 0.25 \cdot 10^{-21} \text{ Дж/с}$ 20 марта и $0.8 \cdot 10^{-21} \text{ Дж/с}$ 21 марта.

Поскольку скорости упругого и неупругого теплообмена в уравнениях (2) и (3) теплового баланса для электронов зависят от концентрации N_e , разности температур компонентов плазмы и значений температур, которые сильно варьировались, соотношение этих процессов в течение суток также изменялось (рис. 11). С увеличением высоты нагрев

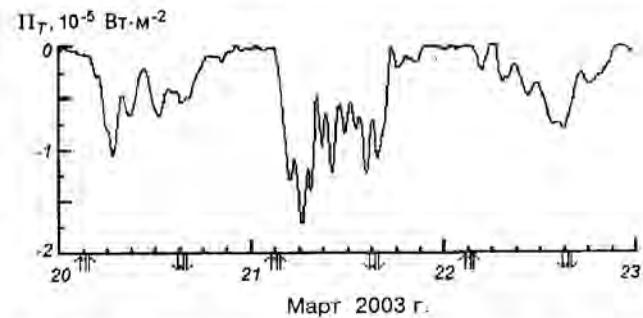


Рис. 12. Вариации потока тепла Π_T , переносимого электронами из протоносферы в ионосферу, на высоте 445 км в период 20—22 марта 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 135 мин с шагом 15 мин)

электронного газа уменьшался за счет уменьшения концентраций электронов и атомов кислорода.

Потоки тепла, переносимого электронами. Эти потоки характеризуют приток энергии к электронному газу из плазмосферы за счет теплопроводности. Тепло запасается в плазмосфере за счет термализации в ней убегающих фотоэлектронов (пролетных и захваченных). Вертикальная составляющая потока тепла равна

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial z},$$

где $\kappa_e = 2.08 k^2 N_e T_e / m v_{ei}$ — коэффициент теплопроводности электронного газа, k — постоянная Больцмана, m — масса электрона, $I = 66.4^\circ$ — наклонение геомагнитного поля, v_{ei} — частота столкновений электронов с ионами. В системе СИ $v_{ei} = 5.5 \cdot 10^6 N_e T_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N_e^{-1/3})$.

Результаты расчета потока тепла Π_T на высоте 445 км в течение 20—22 марта 2003 г. приведены на рис. 12. Видно, что во время отрицательной фазы бури (21 марта) вблизи местного полудня $\Pi_T = -1.0 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$, в течение положительной фазы (20 марта) $\Pi_T = -0.6 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$, а в слабо возмущенный день (22 марта) $\Pi_T = -0.2 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$. Следовательно, наибольшая по модулю величина потока Π_T наблюдалась 21 марта. Это объясняется тем, что поток тепла сильно зависит от T_e (практически $\Pi_T \propto T_e^{7/2}$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Положительная фаза бури. Физические механизмы, которые поддерживают длительное время положительную fazu и особенности ее проявления, изучены до настоящего времени еще недостаточно.

В свете современных представлений возможны следующие причины положительных возмущений [17, 18, 28]. Одной из них является дрейф слоя $F2$ вверх за счет усиления меридиональных ветров, направленных к экватору, который замедляет потери ионов O^+ . Другой механизм связан с изменением состава нейтральной атмосферы, которое в отличие от отрицательной фазы бури протекает с увеличением содержания атомарного кислорода и параметра p за счет оседания легких компонентов газа в низких и средних широтах, т. е. экваториальнома области возмущения состава термосферы. Оба механизма являются результатом крупномасштабных возмущений термосферной циркуляции, связанных с высокоширотным джоулевым нагревом термосферы во время магнитной бури [17, 21, 28]. Согласно работе [37] первый механизм более эффективен в дневное время, когда протекают процессы ионообразования, тогда как роль второго механизма более существенна ночью. Значительный вклад в положительную фазу бури может вносить также высapsulation мягких частиц с энергиями $E \leq 1$ кэВ в область дневного каспа, где они поглощаются на высотах области F (200–300 км), вызывая ее разогрев и меридиональную циркуляцию. Последняя способствует переносу газа, обогащенного атомарным кислородом, к экватору [18].

Рассмотренные механизмы связаны с двумя разными областями магнитосферы и двумя независимыми каналами передачи энергии солнечного ветра в полярную ионосферу. В первых двух случаях воздействие солнечного ветра происходит по каналу: граничный слой хвоста магнитосферы — плазменный слой — продольные токи — джоулев нагрев — изменение термосферной циркуляции и состава атмосферы. Высыпание мягких частиц в дневной касп связано с дневными граничными слоями магнитосферы. Это второй канал передачи энергии. Он не имеет непосредственного отношения к плазменному слою, который контролирует развитие кольцевого тока, магнитную активность и высapsulation авроральных частиц. Данные процессы могут происходить одновременно, и эффекты джоулея нагрева в авроральной зоне и нагрева в каспе могут носить синергетический характер, создавая большое разнообразие ионосферных бурь.

Рассмотрим возможность реализации первого механизма, т. е. дрейфа слоя $F2$ вверх за счет усиления меридионального ветра V_{nx} к экватору в дневных условиях 20 марта. Сравнение со спокойным днем 22–23 сентября 1998 г. [10, 29] показало, что на высоте 300 км около полудня 20 марта 2003 г. нисходящая скорость V_z уменьшилась примерно на 10 м/с. Если допустить, что изменение V_z связано

только с вариациями V_{nx} (т. е. пренебречь изменениями вертикальной составляющей скорости диффузии, которые, как показали оценки, были небольшими, и вкладом дополнительных электрических полей во время умеренной магнитной бури ($Ap = 21$)), то получим оценку сверху величины $\Delta W \approx 10$ м/с, которая приводит к $\Delta hmF2 \approx 16$ км (здесь W — суммарная скорость вертикального переноса плазмы за счет ветрового увлечения и электромагнитного дрейфа [19]). Полученные оценки в пределах точности измерения V_z согласуются с результатами эксперимента ($\Delta hmF2 \approx 20$ км) и подтверждают возможный вклад V_{nx} в формирование положительной фазы. При этом дополнительная скорость ΔV_{nx} должна составлять около 25 м/с.

Отрицательная фаза бури. Отрицательная ионосферная буря относится к числу аномальных, поскольку она сопровождалась значительным (до 2–5 раз) уменьшением $NmF2$ на фоне магнитного возмущения умеренной интенсивности. Так, 21 марта около 12:00 значение $NmF2$ по сравнению с контрольным днем уменьшилось в два раза. Расчеты показали, что модель MSIS-86 не может объяснить уменьшение $NmF2$ только за счет изменения нейтрального состава (параметр p уменьшился лишь на 8 %). Аналогичное несоответствие отмечалось нами при анализе эффектов магнитной бури 25 сентября 1998 г. [10, 29] и другими исследователями [27, 36, 37, 46]. Возможные механизмы формирования отрицательной фазы 21 марта 2003 г. рассмотрены ниже.

Причина аномальной бури. Смена фаз бури произошла примерно с 17:00 до 18:00. Анализ показал, что она сопровождалась необычным поведением высоты $hmF2$ в период захода Солнца: снижение слоя на 50 км с 17:00 до 18:00, а затем подъем слоя почти на 200 км в течение 18:00–19:00 (см. рис. 3, в). В спокойные дни 22–23 сентября 1998 г. [10] и 19 марта 2003 г. (см. рис. 3, в) перепад высоты $hmF2$ при заходе Солнца был значительно меньшим (около 50 км). При этом 20 марта отмечалось быстрое (в течение не более 30 мин) уменьшение $hmF2$ на 40 км. Спустя 15 мин $hmF2$ увеличилась на 90 км на протяжении одного сеанса измерений, т. е. 15 мин (обработка проводилась с 15-минутным накоплением сигнала). Известно (см., например, [32, 33] и др.), что быстрые изменения $hmF2$ (а также и V_z , см. рис. 8, б) могут быть связаны с нестационарными возмущениями магнитосферных электрических полей и проникновением их в средние широты.

Проанализируем необычное поведение $hmF2$. Уменьшение $hmF2$ на 40 км, по-видимому, связано с проникновением в ионосферу над Харьковом

магнитосферного электрического поля с зональной составляющей $E_y \approx -10$ мВ/м, направленной на запад. Такая оценка E_y получена из вариаций $hmF2$ [2]. Последующее увеличение $hmF2$ могли вызвать: регулярное обращение V_{nx} к экватору в период захода, которое дает $\Delta hmF2 \approx 50$ км, как в спокойные даты, дополнительное изменение $\Delta V_{nx} = 25$ м/с, которое произошло в предшествующие часы и явилось одной из обсуждавшихся выше причин начальной положительной фазы. Оно дало подъем слоя $F2$ еще на 20 км. Оставшееся увеличение $hmF2$ на 130 км могло быть вызвано увеличением скорости W за счет электромагнитного дрейфа. Оценка снизу дала величину $\Delta W \approx 80$ м/с (без учета диффузии, которая препятствует выводу слоя $F2$ из состояния диффузационного равновесия), а зональная составляющая поля над Харьковом должна была иметь значение $E_y \approx 20$ мВ/м.

Итак, перепад $hmF2$ вниз на 50 км, а затем вверх на 200 км мог быть связан в значительной степени с проникновением в средние широты нестационарного электрического поля с зональной составляющей, изменяющей направление с запада на восток и имеющей значения $E_y \approx -10$ и $+20$ мВ/м. При этом вариации $hmF2$ коррелировали с изменениями скорости V_z от $+10$ м/с до -35 м/с и далее до $+20$ м/с на высоте 300 км (рис. 8, б) в интервале времени 17:00—19:00 (с запаздыванием около 20 мин). Эффект, по-видимому, был вызван импульсом магнитосферного электрического поля во время суббури, которая сопровождалась увеличением индекса AE и затем спадом его в интервале 17:00—18:00 (см. рис. 2). Дестабилизирующее воздействие магнитосферных электрических полей на поведение параметров ионосферы N_e , $hmF2$ и V_z , а также их возможная связь с индексом AE и B_y -, B_z -компонентами ММП показаны на рис. 13. При $AE = 1200...1500$ нТл оценки напряженности электрического поля в высоких широтах дали значения 80—100 мВ/м [20, 21]. Проникнув в средние широты, электрическое поле магнитосферного происхождения могло достичь там рассчитанной величины $|E_y| = 10...20$ мВ/м и дестабилизировать поведение слоя $F2$ ионосферы [32, 33].

Смена фаз бури произошла в заходный период, когда в спокойный день 19 марта в течение 17:00—18:00 критическая частота f_0F2 снизилась от 7.1 до 6.5 МГц, т. е. величина $NmF2$ уменьшилась на 19 %. В возмущенный день 20 марта f_0F2 уменьшилась от 8.3 до 6.0 МГц. Это соответствовало снижению $NmF2$ в 1.9 раза. Падение $NmF2$ 20 марта сопровождалось, как отмечалось выше, уменьшением $hmF2$ на 50 км (см. рис. 3, в) и изменением

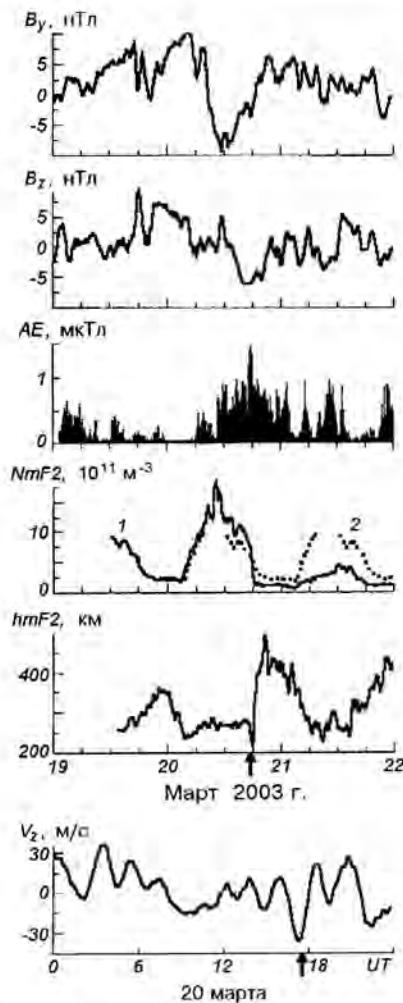


Рис. 13. Вариации B_y и B_z -составляющих ММП, AE -индекса, электронной концентрации $NmF2$ в максимуме области $F2$ (1 — в Харькове, 2 — в контрольный день), высоты максимума $hmF2$ 19—21 марта 2003 г. и вертикальной скорости плазмы V_z во время магнитной бури 20 марта 2003 г. Стрелками отмечено время прохождения импульса электрического поля и его отклика в ионосфере

скорости V_z в указанном интервале времени примерно от -10 до -35 м/с (полагаем, что за счет изменения W на -25 м/с вблизи максимума слоя $F2$). Полагая, что в данном случае можно применить соотношения для параметров максимума слоя $F2$ из работы [19], мы получили, что изменение W на фоне увеличения коэффициента потерь $\beta(O^+)$ почти в пять раз при уменьшении $hmF2$ от 285 до 235 км дало наблюдаемое уменьшение $NmF2$ и могло положить начало отрицательной фазы ионосферной бури.

После резкого подъема слоя $F2$ на 200 км процесс уменьшения $NmF2$ нарастал, достигнув значения 4–5 раз по сравнению с контрольным днем в утренние и дневные часы (03:00–08:00) 21 марта ($Ap = 29$, максимальные значения $Kp = 5$ после полуночи и вблизи полудня). Росту интенсивности отрицательной бури, по-видимому, способствовали эффекты высокоширотного джоулева нагрева атмосферы, вызванного магнитной бурей. Таких эффектов два: перестройка глобальной термосферной циркуляции и изменение состава термосферы [17, 21, 28, 43]. Возмущенная циркуляция обычно формирует в средних широтах начальную, положительную фазу ионосферной бури, если магнитная буря начинается днем, как в нашем случае [17, 28]. Перестройка состава происходит под действием возмущенной циркуляции и начинается позже. Она сопровождается повышением $N(N_2)$ и $N(O_2)$ в высоких и средних широтах, что увеличивает $\beta(O^+)$, ускоряет потери ионов O^+ и способствует дальнейшему углублению отрицательной бури. Эти эффекты, по-видимому, были существенны в ночное время и достигли максимума в утреннем секторе [42], что привело к уменьшению N_e в пять раз.

С восходом Солнца 21 марта на фоне низких значений N_e и малой теплопередачи от электронов к ионам, которая пропорциональна N_e^2 , происходил быстрый нагрев плазмы, T_e к 05:00 достигла дневных значений 2000–3500 К на высотах 250–450 км. При таких условиях в дневное время, по-видимому, включается еще один механизм — колебательного возбуждения молекул $N_2(v)$ [28, 40, 41, 43], который становится существенным при значениях $T_e \geq 1500$ К [2, 3, 41, 47]. Вклад $N_2(v)$ также ускоряет потери ионов O^+ , что на высотах области F ведет к развитию глубокой депрессии N_e .

Квазипериодические колебания $hmF2$. Колебания этой высоты отмечались до начала бури (рис. 3, в), однако их относительная амплитуда не превышала 10 %. 21 марта амплитуда колебаний увеличилась примерно до 20 % вблизи полудня.

Результаты спектрального анализа флюктуаций $hmF2$ показаны на рис. 14. Видно, что самые существенные изменения спектрального состава происходили в период смены фаз ионосферной бури. В течение отрицательной фазы наиболее сильно изменилась амплитуда колебаний с периодом $T = 160$ мин, 21 и 22 марта она увеличилась в 3–8 раз по сравнению с фоновым значением. Амплитуды спектральных составляющих с периодом 96 и 120 мин увеличились до 2 и 1.5 раз соответственно. 23 марта эти эффекты были выражены слабее.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведены результаты наблюдения и моделирования двухфазной ионосферной бури 20–23 марта 2003 г., которая сопровождалась возмущениями параметров термосферы и теплового режима нейтральных и заряженных компонентов верхней атмосферы Земли. Проанализированы возможные механизмы развития бури в свете существующих представлений. Результаты сводятся к следующему.

1. Показано, что вероятной причиной положительной фазы ионосферной бури 20 марта 2003 г. мог быть дрейф слоя $F2$ вверх за счет усиления меридионального ветра V_{nx} к экватору, связанного с высокоширотным джоулевым нагревом термосферы. Оценки на основе результатов измерения вертикальной скорости плазмы V_z дали увеличение V_{nx} на 25 м/с, что привело к наблюдаемому увеличению высоты $hmF2$ примерно на 20 км.

2. Зафиксированы максимальные значения критических частот $f_0 F2$, равные 11.3 МГц 20 марта и 5.8 МГц 21 марта. При этом наблюдалось увеличение $NmF2$ примерно в 1.5 раза во время положительной фазы и уменьшение значений $NmF2$ в пять раз в утренние часы — в течение отрицательной фазы бури.

3. Зарегистрировано необычное в заходный период 20 марта уменьшение $hmF2$ на 50 км в течение 17:00–18:00, за которым последовал подъем слоя $F2$ примерно на 200 км на протяжении следующего часа. Установлено, что необычное поведение $hmF2$ сопровождало переход от положительной к отрицательной фазе бури.

4. Обосновано, что возможной причиной быстрого перепада высоты $hmF2$ и смены фаз бури мог быть импульс электрического поля над Харьковом с зональной составляющей, изменяющей направление с запада на восток и имеющей значения $E_y \approx -10$ и +20 мВ/м. Импульс, по-видимому, связан с проникновением магнитосферного электрического поля в средние широты во время суббури ($AE = 1200$ –1500 нТл).

5. Рассмотрены причины, вызвавшие резкий подъем слоя $F2$ на 200 км вслед за снижением его в заходный период. Показано, что увеличение $hmF2$ могло быть результатом регулярного обращения меридионального ветра V_{nx} к экватору в заходный период, дополнительного его усиления за счет высокоширотного джоулева нагрева термосферы во время магнитной бури, а также дестабилизирующего воздействия импульса электрического поля в ионосфере над Харьковом.

6. Показано, что уменьшение $NmF2$ в 1.9 раза при смене фаз за счет увеличения нисходящей

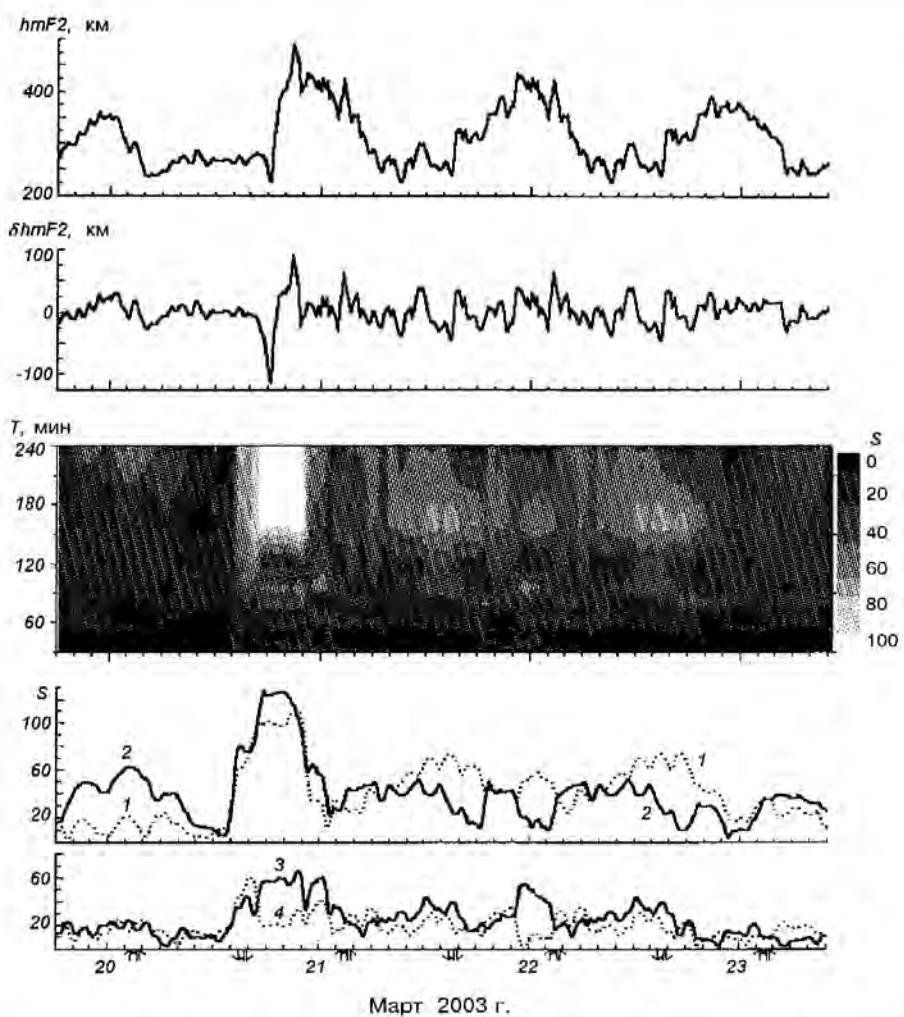


Рис. 14. Вариации высоты $hmF2(hm)$ максимума слоя $F2$, флюктуаций высоты $\delta hm = hm - \langle hm \rangle$ ($\langle hm \rangle$ — скользящее среднее на интервале 360 мин, шаг скольжения — 15 мин), фурье-спектра $S(T, t)$ (интервал обработки 8 ч, шаг скольжения 15 мин) и амплитуды S спектральных составляющих с периодами $T = 160$ (1), 240 (2), 96 (3), 120 мин (4)

скорости переноса плазмы V_z при снижении слоя $F2$ могло положить начало сильной отрицательной ионосферной бури. Дальнейшее развитие депрессии N_e , по-видимому, было связано с изменением нейтрального состава (в том числе со смещением в утренний сектор области возмущенного состава), к которому с восходом Солнца и увеличением температуры T_e до 2000—3500 К мог добавиться также вклад колебательно возбужденных молекул $N_2(v)$ в увеличение потерь ионов O^+ .

7. Обнаружено большое отличие дневных температур электронов T_e во время положительной (1300 К на высоте 300 км) и отрицательной (2400 К) фаз бури. Отмечено увеличение темпера-

туры ионов T_i в дневное время на высотах 250—300 км примерно на 50 К 20 марта и на 100—150 К 21 марта.

8. Расчеты показали, что во время бури температура нейтралов T_n в дневное время увеличилась примерно на 50 К в течение положительной и на 100 К — отрицательной фазы ионосферной бури.

9. Установлено, что модель MSIS-86 дает заниженные значения T_n по сравнению с расчетными величинами в дневное время. В слабо возмущенных условиях на высоте 300 км отличия составляли около 120 К, во время бури — до 150 К 20 марта и до 180 К 21 марта. На основе расчетов T_n по данным радара и по модели MSIS-86 показано, что

в данном цикле измерений высота термопаузы, где атмосфера становится изотермичной, составляла около 300 км.

10. Расчеты теплового режима ионосферы показали, что подвод энергии к электронному газу Q/N_e около полудня во время отрицательной фазы бури (21 марта) превышал значение Q/N_e в течение положительной фазы (20 марта) в 2.5–4 раза, а в слабо возмущенные сутки (22 марта) — до 2 раз. При этом во время отрицательной фазы бури отмечена также наибольшая по модулю величина потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы.

11. Зарегистрированы квазипериодические колебания высоты $hmF2$ во время бури. Самые существенные изменения спектрального состава имели место во время смены фаз ионосферной бури. В течение отрицательной фазы амплитуда колебаний с периодом $T = 160$ мин увеличивалась в 3–8 раз по сравнению с фоновым значением. Колебания, по-видимому, связаны с крупномасштабными возмущениями, генерируемыми высоколатитным джоулевым нагревом термосферы.

Основной итог исследований сводится к тому, что в средних широтах (для Харькова $L \approx 2.0$) магнитная буря даже умеренной интенсивности ($Ap = 29$, $Kp_{max} = 5$) может вызвать глубокое отрицательное ионосферное возмущение, которое приводит к значительным изменениям параметров ионосферы (уменьшению $NmF2$ в 2–5 раз и увеличению T_e до 3500 К), а значит и условий распространения радиоволн.

Авторы благодарны Л. Я. Емельянову, И. Б. Склярову, С. В. Черняеву за проведение измерений.

1. Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И., и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 2002. — № 2. — С. 25–63.
2. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 528 с.
3. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИЭР. — 1969. — 57, № 3. — С. 6–30.
4. Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — 8, № 2. — С. 163–180.
5. Григоренко Е. И. Исследования ионосферы по наблюдениям эффекта Фарадея при некогерентном рассеянии радиоволн // Ионосферные исследования. — М.: Сов. радио, 1979. — Т. 27. — С. 60–73.
6. Григоренко Е. И., Дзюбанов Д. А., Лысенко В. Н. и др. Магнитная, ионосферная и атмосферная бури большой интенсивности в сентябре 1998 года: сравнение результатов

измерений и моделирования // Космічна наука і технологія. — 2003. — 9, № 4. — С. 49–66.

7. Григоренко Е. И., Дзюбанов Д. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Ионосферные и атмосферные эффекты уникальной магнитной бури в сентябре 1998 года: сопоставление результатов наблюдений и моделирования // Современные проблемы физики и высокие технологии: Матер. Междунар. конф., посвященной 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РПФ ТГУ. — Томск. — 2003. — С. 351–354.
8. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдений процессов в ионосфере, сопутствующих геомагнитной буре 25 сентября 1998 года, при помощи радара некогерентного рассеяния в Харькове // Тр. XX Всерос. конф. по распространению радиоволн. — Нижний Новгород, 2002. — С. 56–57.
9. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А. и др. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 1. — С. 4–11.
10. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники. — 2003. — № 9. — С. 57–94.
11. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности теплового режима нейтральной атмосферы во время магнитной бури 25.09.98 // Вестник нац. техн. ун-та «ХПИ». Сб. науч. тр., тем. вып. «Радиофизика и ионосфера». — 2003. — 4, вып. 7. — С. 27–30.
12. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тез. — Кацивели, 2003. — С. 113.
13. Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Колебания электромагнитного поля и движение плазмы в верхней атмосфере, сопровождавшие уникальную геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Сб. науч. тр. Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству. — Владимир, 2003. — Т. 1. — С. 167–170.
14. Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие геокосмической буре 25 сентября 1998 г. // Современные проблемы физики и высокие технологии: Матер. Междунар. конф., посвященной 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РПФ ТГУ. — Томск, 2003. — С. 348–351.
15. Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в ионосфере, сопровождавшие сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Современные проблемы физики и высокие технологии: Матер. междунар. конф., посвященной 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РПФ ТГУ. — Томск, 2003. — С. 344–347.
16. Григоренко Е. И., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в верхней атмосфере и вариации электрического поля в течение уникальной геомагнитной бури 25 сентября 1998 г. // Сб. науч. тр. Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству. — Владимир, 2003. — Т. 1. — С. 164–167.
17. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. — 1985. — 25, № 5. — С. 705–721.
18. Данилов А. Д., Морозова Л. Д., Мирмович Э. Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бур // Геомагнетизм и аэрономия. — 1985. — 25, № 5. — С. 768–772.
19. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы (детерминированный подход). — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 190 с.

20. Кринберг И. А., Ташилин А. В. Ионосфера и плазмосфера. — М.: Наука, 1984.—190 с.
21. Серебряков Б. Е. Исследование процессов в термосфере во время магнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия.—1982.—22, № 5.—С. 776—781.
22. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
23. Таран В. И., Григоренко Е. И. Ионосферно-протоионосферные процессы во время естественных возмущений по данным Харьковского радара некогерентного рассеяния // Сб. тр. первой Украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. — 2001.—С. 119—124.
24. Таран В. И., Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пуляев В. А. Ионосферные эффекты магнитных бурь по наблюдениям на радаре некогерентного рассеяния в Харькове // Информ. технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. науч. тр. ХГПУ.—1999.—Вып. 7, ч. 3.—С. 381—383.
25. Таран В. И., Лысенко В. Н., Григоренко Е. И. Особенности процессов переноса плазмы и ионосферно-протоионосферного взаимодействия во время магнитных бурь // Вестник нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. науч. тр.—2001.—Вып. 4.—С. 261—264.
26. Banks P. M. Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere // Ann. Geophys.—1966.—22.—P. 577—584.
27. Buonsanto M. J. Millstone Hill Incoherent Scatter F Region Observations During the Disturbances of June 1991 // J. Geophys. Res.—1995.—100, N A4.—P. 5743—5755.
28. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms — a Review // Space Sci. Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
29. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the September 25, 1998 magnetic storm from Kharkiv incoherent scatter radar data // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC), Maastricht the Netherlands. 17—24 August 2002. — P. 2280.
30. Dalgarno A., Degges T. C. Electron cooling in the upper atmosphere // Planet. Space Sci.—1968.—16.—P. 125—132.
31. Farley D. T. Faraday rotation measurements using incoherent scatter // Radio Sci.—1969.—4.—P. 143—152.
32. Foster J. C., Rich F. J. Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26.367—26.372.
33. Foster J. C., Cummer S., Inan U. S. Midlatitude particle and electric field effects at the onset of the November 1993 Geomagnetic Storm // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26.359—26.366.
34. Gonzales W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A4.—P. 5771—5792.
35. Hedin A. E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res.—1987.—92, N A5.—P. 4649—4662.
36. Mikhailov A. V., Forster M. Some F2-layer Effects During the January 06–11, 1997 CEDAR Storm Period as Observed with the Millstone Hill Incoherent Scatter Facility // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 249—261.
37. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime Thermosphere Above Millstone Hill during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1997.—102.—P. 17.275—17.282.
38. Mikhailov A. V., Schlegel K. Self-consistent modelling of the daytime electron density profile in the ionospheric F region // Ann. Geophys.—1997.—15.—P. 314—326.
39. Mikhailov A. V., Skoblin M. G., Forster M. Daytime F2-layer positive storm effect at middle and lower latitudes // Ann. Geophys.—1995.—13.—P. 532—540.
40. Pavlov A. V. The role of vibrationally excited oxygen and nitrogen in the ionosphere during the undisturbed and geomagnetic storm period of 6–12 April 1990 // Ann. Geophys.—1998.—16.—P. 589—601.
41. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., Richards P. G. Comparison of models and data at Millstone Hill during the 5–11 June 1991 Storm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—1999.—61.—P. 263—279.
42. Prolss J. W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects // Ann. Geophys.—1993.—11.—P. 1—9.
43. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., Sipler D. P. Ionospheric effects of the March 1990 magnetic storm: Comparison of theory and measurement // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A12.—P. 23.359—23.365.
44. Salah J. E., Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar // Space Res.—1973.—13.—P. 267—286.
45. Salah J. E., Evans J. V., Alcayde D., Bauer P. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Saintin // Ann. Geophys.—1976.—32, fasc. 3.—P. 257—266.
46. Schlesier A. C., Buonsanto M. J. The Millstone Hill Ionospheric Model and its Application to the May 26–27, 1990, Ionospheric Storm // J. Geophys. Res.—1999.—104, N A10.—P. 22.453—22.468.
47. Shunk R. W., Nagy A. F. Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations // Rev. Geophys. Space Phys.—1978.—16, N 3.—P. 355—399.
48. Taran V. I., Grigorenko Ye. I., Kiyashko G. A. The F region ionosphere response on the severe magnetic storm on September 25, 1998 // Космічна наука і технологія. Додаток: Space Plasma physics.—2001.—7, № 2.—С. 42—46.
49. Waldieufel P. Combined incoherent scatter F1 region observations // J. Geophys. Res.—1971.—76.—P. 6995—6999.

ANOMALOUS IONOSPHERIC STORM ON 20—23 MARCH 2003: SOME RESULTS OF MEASUREMENTS AND SIMULATION

Ye. I. Grigorenko, S. A. Pazura, V. I. Taran, L. F. Chernogor

We present our results of observations and simulation of dynamic processes in geospace which accompanied the two-phase ionospheric storm on 20—23 March 2003. The strongest negative phase of the storm can be considered as anomalous one because it was proceeding on the background of moderate geomagnetic disturbance ($A_p = 29$, $K_p = 5$). The principal mechanisms forming the positive and negative ionospheric storm phase development are considered. Particular attention is given to the description of processes accompanying the change of storm phase that occurred during sunset period (about 18.00 UT). A simulation and study of the effects of thermospheric disturbances and also the thermal regime of neutral and charged components of the upper Earth's atmosphere during the storm are conducted. The observations are carried out with the Kharkov incoherent scatter radar.

УДК 550.388+520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, С. А. Пазюра¹, В. И. Таран¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери НАН і МОН України, Харків

²Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

Сильнейшая геокосмическая буря 30—31 мая 2003 г.: результаты измерений и моделирования

Надійшла до редакції 14.10.04

Наведено результати спостереження та моделювання відгуку області F і зовнішньої іоносфери на потужну магнітну бурю 30—31 травня 2003 р. (максимальний індекс $K_p = 8$). Виявлено ефекти глибокого негативного іоносферного збурення, які рідко спостерігаються в іоносфері середніх широт, що розташована глибоко у внутрішній плазмосфері (для Харкова $L \approx 2$). Вони свідчать про зсув головного іоносферного провалу, провал легких іонів та гарячої зони разом з плазмо遵义 на широту Харкова. Моделювання та дослідження ефектів термосферних збурень, а також теплового режиму нейтральних і заряджених компонентів верхньої атмосфери Землі виявили їхні значні зміни під час бурі. Спостереження виконано за допомогою радара некогерентного розсіяння у Харкові.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением работ авторов [2, 7], направленных на исследование отклика верхней атмосферы Земли на магнитную бурю (МБ) 29—31 мая 2003 г. ($A_p = 89, 49, 17$). Наблюдения эффектов бури проводились 30—31 мая в соответствии с международной программой Low/High Latitude. Радар работал в режиме зондирования одиночными 800-мкс импульсами, в диапазоне высот 220—1500 км с высотным разрешением около 120 км.

Расположение харьковского радара НР (геомагнитная широта 45.7° , $L \approx 2.0$) позволяет исследовать эффекты, связанные с процессами ионосферно-магнитосферного взаимодействия глубоко во внутренней плазмосфере. Эти эффекты становятся существенными во время сильных геокосмических возмущений, которые охватывают не только высокие широты, но проникают также в средние широты. К числу таких возмущений относится рассматриваемая сверхсильная магнитная буря. Отдельные результаты наблюдения этой бури описаны в работах [2, 7]. В них показано, что магнитная буря вызвала сильнейшую отрицательную ионосферную бурю (ИБ). Среди эффектов ионосферной бури зарегистрированы: депрессия концентрации электронов N_e и увеличение высоты $hmF2$ максимума

слоя $F2$ во время главной фазы магнитной бури; необычный нагрев плазмы в ночь 29—30 мая, опустошение магнитной силовой трубы, проходящей над Харьковом. Эти эффекты могут быть результатом деформации магнитосферы и редких для средних широт явлений смещения главного ионосферного провала и связанных с ним структур (провала легких ионов, горячей зоны) на широту г. Харькова.

Здесь мы представляем результаты моделирования и исследования эффектов термосферных возмущений, а также теплового режима нейтральных и заряженных компонентов верхней атмосферы Земли во время бури. Пересмотрены также некоторые результаты измерений работы [7]. Они представлены здесь в большем объеме и в более широком диапазоне высот и времени. Это позволило подробнее описать эффекты ионосферной бури по сравнению с выбранными контрольными (магнитоспокойными) днями.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ. ОСОБЕННОСТИ ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ

Сверхсильная магнитная буря 29—31 мая 2003 г. протекала на фоне высокой вспышечной активности Солнца. Результатом рентгеновских вспышек

класса X3.6 и X1.2 в ночь 27—28 мая стали два импульса плотности солнечной плазмы (CME), зарегистрированные спутником NASA/ACE 29 мая в 11:50 и 18:30 UT. Магнитная буря имела внезапное начало 29 мая около 12:25. Главная фаза с минимальным значением индекса $Dst = -131$ нТл развивалась интенсивно с 23:00 29 мая до 03:00 30 мая, после чего началась фаза восстановления, связанная с поворотом составляющей B_z межпланетного магнитного поля (ММП) на север. Индекс Ap имел значения 89, 49 и 17 соответственно 29, 30 и 31 мая. Начало измерений на радаре HP (с 21:00 29 мая) совпало с главной фазой магнитной бури и вторым из трех последовательных индексов $Kp = 8$. На спутнике GOES-8 (W75) были зарегистрированы два всплеска потока протонов с энергией более 10 МэВ. Один из них, усилившийся более чем в 200 раз в результате вспышек в ночь 27—28 мая, наблюдался с 28 по 30 мая. Другой поток был зарегистрирован 31 мая с 04:40 до 14:40. Он был связан со вспышкой класса M9.3, произошедшей в этот день. Его величина увеличилась почти в 70 раз. Основные параметры геокосмической обстановки приведены на рис. 1 и 2.

Оценим энергетику сверхсильной магнитной бури. Энергия бури E_{ms} определяется значением индекса Dst_{min} [29]:

$$E_{ms} = \frac{3}{2} E_M \frac{|D_{st}^*|}{B_0},$$

где $B_0 = 30$ мкТл — значение индукции магнитного поля на экваторе, $E_M \approx 8 \cdot 10^{17}$ Дж — энергия дипольного магнитного поля Земли. Скорректированное значение $D^{*st} = Dst - bp_{sw}^{1/2} + c$. Здесь $b = 5 \cdot 10^5$ нТл/(Дж·м⁻³)^{1/2}, $c = 20$ нТл, $p_{sw} = N_p m_p V_{sw}^2$, N_p и m_p — концентрация и масса протонов, V_{sw} — скорость солнечного ветра. Для сверхсильной бури при $Dst_{min} = -130$ нТл, $N_p = 3 \cdot 10^7$ м⁻³, $V_{sw} = 820$ км/с имеем давление солнечного ветра $p_{sw} \approx 33$ нПа (рис. 2). При этом $D^{*st}_{min} \approx -200$ нТл, $E_{ms} \approx 8 \cdot 10^{15}$ Дж. Энергия этой магнитной бури эквивалентна энергии 2 Мт ТНТ. Если длительность основной фазы $\Delta t = 4$ ч, то мощность бури $P_{ms} \approx 5.6 \cdot 10^{11}$ Вт. Такую мощность потребляют несколько высокоразвитых европейских стран с населением около 200 млн человек.

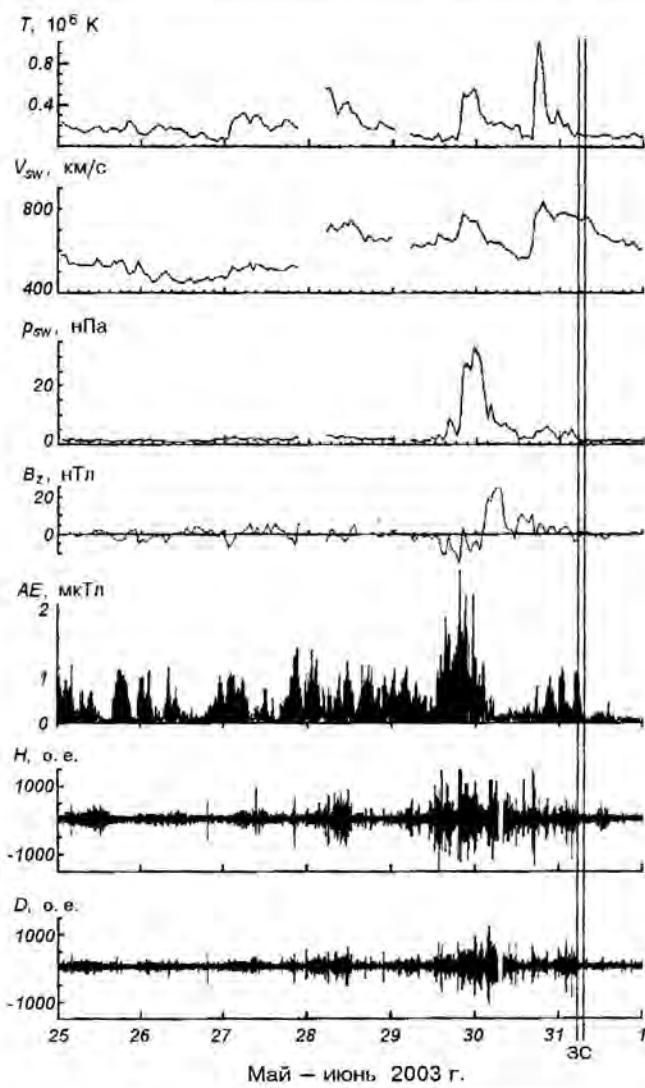
Магнитная буря вызвала интенсивную отрицательную ионосферную бурю. На рис. 3, а показаны вариации критической частоты f_0F2 , полученной из ионограмм станции вертикального зондирования «Базис» в Харькове. Здесь же приведены данные ионосферной станции в Сан-Вито (географические

координаты 40° N, 17° E). Последние привлечены для выбора контрольных (невозмущенных) суток и оценки характера ионосферного возмущения. В качестве контрольных данных взяты усредненные значения f_0F2 за 19 мая ($Ap = 12$, $Kp \leq 4$, $F_{10.7} = 115$) и 20 мая ($Ap = 12$, $Kp \leq 3$, $F_{10.7} = 117$). Этим датам предшествовали три спокойных дня ($Ap = 10$, 9, 9, $Kp \leq 3$). Из рис. 3, а видно, что 30 мая критическая частота f_0F2 отклонялась от своих значений в контрольный день примерно на -50 % ночью и -45 % днем; 31 мая отклонение уменьшилось ночью до -35 %, т. е. ионосферная буря начала затихать.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Вариации геомагнитного поля. На рис. 1 и 2 представлены вариации горизонтальных составляющих геомагнитного поля (H и D в направлениях север — юг и запад — восток соответственно), зарегистрированные магнитометром-флюксметром Харьковского национального университета. Высокое временное разрешение магнитометра позволило уточнить момент начала рассматриваемой магнитной бури — 29 мая в 12:25. Ему соответствовал четкий всплеск флуктуаций составляющих поля. Этому моменту предшествовал приход первого из двух облаков CME, связанных с двумя вспышками класса X в ночь 27—28 мая. Приборами ИСЗ NASA/ACE приход CME был зафиксирован в 11:50. По данным магнитометра-флюксметра был определен также момент реакции геомагнитного поля на приход второго облака CME, он отмечен в 19:00. На спутнике NASA/ACE прохождение этого облака было зарегистрировано в 18:30. С учетом расстояния от Земли до спутника (1.5 млн км) скорости распространения возмущений потоков солнечного ветра, связанных с приходом двух облаков CME, составили около 710 и 830 км/с соответственно. Эти значения скоростей ветра согласуются с данными, приведенными на рис. 2. По показаниям магнитометра-флюксметра во время бури отмечалось увеличение флуктуаций H - и D -составляющих поля в 7—8 и 5—7 раз соответственно по сравнению со спокойным днем 26 мая.

Вариации концентрации электронов. Вариации концентрации $NmF2$ в максимуме слоя $F2$ приведены на рис. 3, б. В спокойный день 19—20 мая они соответствовали характеру регулярного поведения среднеширотной ионосферы в летних условиях средней солнечной активности. Его отличительной чертой было наличие двух максимумов, вблизи полуночи и в заходный период, причем вечерний



Май – июнь 2003 г.

Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра: температуры T , радиальной скорости V_{sw} и динамического давления p_{sw} (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor), B_z -составляющей межпланетного магнитного поля (ММП) (ACE Satellite — Magnetometer), AE -индекса (WDC Kyoto) и составляющих H , D геомагнитного поля (по данным магнитометра-флюксметра Харьковского национального университета) в период 25–31 мая 2003 г.

максимум ($f_0F2 \approx 8.3$ МГц) был сопоставим с дневным (8.5 МГц), что характерно для спада солнечной активности. В возмущенный день 30 мая концентрация $NmF2$ уменьшилась ночью, в течение главной фазы бури, примерно в четыре раза и вблизи полуночи — в три раза (рис. 3, б и 4). Рис. 4 дает наглядную картину глубокой депрессии N_e в диапазоне высот 220–750 км, а также изменения основных параметров ионосферы во время ионосферной бури. Видно, что постепенное восстановле-

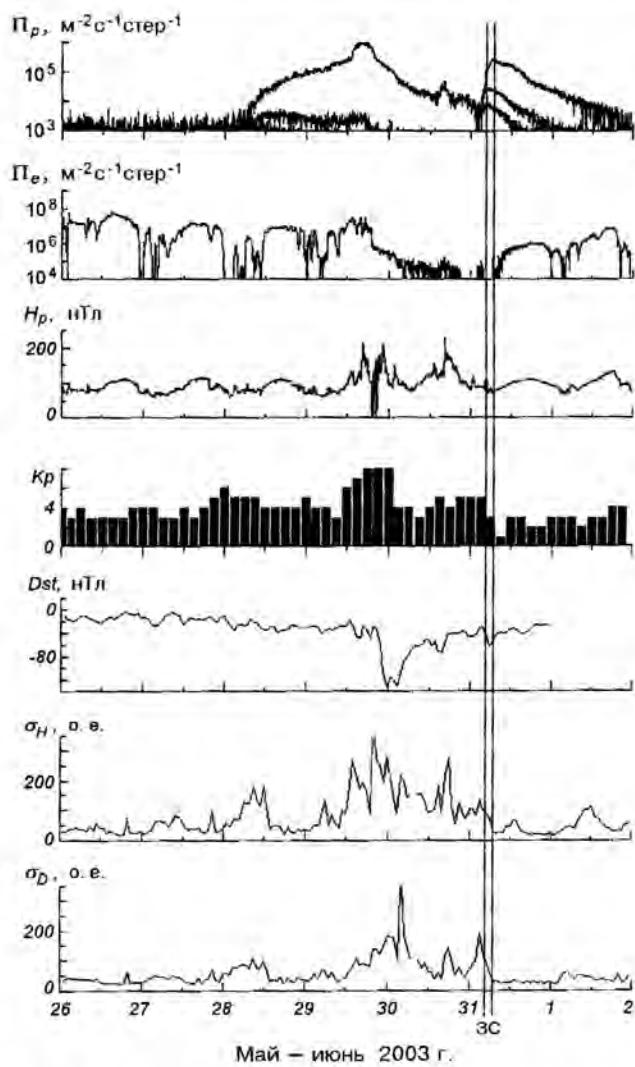


Рис. 2. Временные вариации потоков протонов (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов (ИСЗ GOES-12), H_r -компоненты геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), Kp -индекса (Air Force Weather Agency), Dst -индекса (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) и стандартных отклонений составляющих H , D геомагнитного поля (с часовым усреднением) по данным магнитометра-флюксметра ХНУ в период 26 мая–1 июня 2003 г.

ние N_e началось 30 мая после 08:00 и продолжалось до конца измерений. Уменьшение N_e с постепенным восстановлением отмечалось в диапазоне высот 220–770 км (рис. 5). Однако выше максимума слоя $F2$ вариации N_e были выражены слабее из-за возрастающего влияния процессов диффузии на этих высотах.

Для исследования поведения других параметров ионосферы: электронной концентрации в диапазоне высот, высоты максимума слоя $F2$, температуры

электронов и ионов, ионного состава в период возмущения в качестве контрольных дат были выбраны магнитоспокойные сутки 26—27 мая 1998 г., а для сравнения скорости переноса плазмы — сутки 23—24 июня 1998 г. Эти даты по параметрам гелиофеофизической обстановки аналогичны рассматриваемому периоду (лето, средняя солнечная активность), но находятся на восходящей ветви 23-го солнечного цикла. Их привлечение позволило оценить особенности ионосферной и термосферной бури 29—31 мая 2003 г.

Следует отметить необычное явление, которое наблюдалось 30 мая вблизи восхода Солнца. В спокойный день 26—27 мая 1998 г. в утренние часы с началом процесса фотоионизации в атмосфере критическая частота слоя F2 плавно увеличивалась от $f_0F2 = 3.5$ до 5.6 МГц в интервале времени 02:00—05:00. (Здесь для контрольного дня 26—27 мая 1998 г., чтобы не загромождать рис. 3, а, вместо f_0F2 приведены значения $NmF2 = 1.24 \cdot 10^{10} (f_0F2)^2$ (рис. 3, б), где f_0F2 берется в МГц, а $NmF2$ — в м^{-3}). В возмущенный день 30 мая 2003 г. f_0F2 сначала увеличивалась от 3.0 до 3.8 МГц в интервале времени 02:00—03:15. Затем увеличение сменилось необычным уменьшением f_0F2 до 3.4 МГц на протяжении около часа, после чего f_0F2 снова продолжала увеличиваться (см. рис. 3, а и б). На рис. 3, б и в эти интервалы времени обозначены горизонтальными отрезками. Уменьшение f_0F2 проходило на фоне утреннего снижения слоя F2 ионосферы (рис. 3, в), на которое наложился резкий скачок высоты $hmF2$ вниз и затем вверх (см. ниже).

Вариации высоты максимума слоя F2. Вариации высоты $hmF2$ в контрольный день 26—27 мая 1998 г. и во время ионосферной бури 29—30 мая 2003 г. приведены на рис. 3, в. В спокойный день $hmF2$ изменялась примерно от 270 км днем до 370 км ночью (рис. 3, в). В возмущенный день 30 мая 2003 г. $hmF2$ увеличилась почти на 160 км около местной полуночи, достигнув 530 км, и на 70 км вблизи полудня.

Рассмотрим особенности необычного явления, связанного с упомянутым выше уменьшением f_0F2 в восходный период. Оно протекало на фоне утреннего снижения слоя F2, при котором $hmF2$ в 03:15 достигла 320 км. В 03:45 произошла деформация высотного распределения N_e с расслоением профиля на два слоя и преобладанием нижнего слоя с максимумом на высоте 240 км. Это привело к уменьшению $hmF2$ почти на 80 км. В течение следующих 15 мин концентрация N_e нижнего слоя уменьшилась, и главный максимум области F2

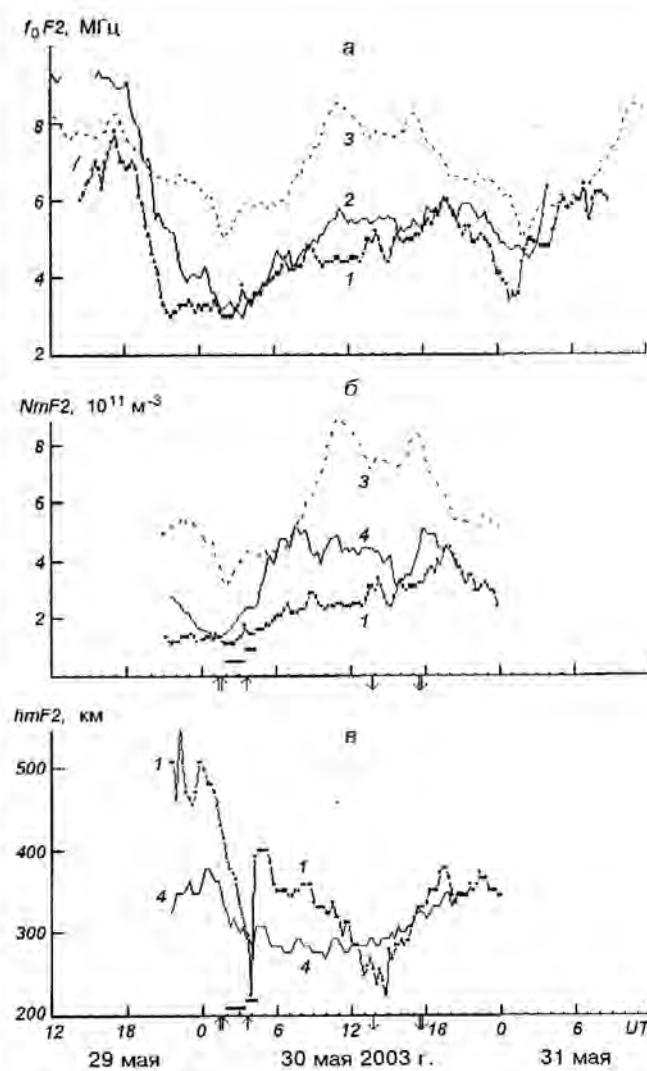


Рис. 3. Вариации параметров слоя F2 29—31 мая: 1 — в Харькове, 2 — в Сан-Вито, 3 — в контрольный день 19—20 мая по данным ионозонда в Сан-Вито, 4 — в магнитоспокойный день 26—27 мая 1998 г. Здесь и далее стрелки обозначают моменты восхода (вверх) и захода (вниз) Солнца на поверхности Земли в Харькове (двойная стрелка) и в магнитоспринтной точке (одинарная)

восстановился на высоте 400 км. Расслоение и деформация профиля N_e , увеличение толщины слоя сохранялись по крайней мере до 05:00. Высотные профили электронной концентрации N_e в последовательные моменты времени (через 15 мин), демонстрирующие необычное поведение ионосферы с 02:00 по 05:00, приведены на рис. 6.

Вариации температуры электронов и ионов. Вариации T_e и T_i в контрольный день 26—27 мая 1998 г. и во время бури 29—30 мая 2003 г.

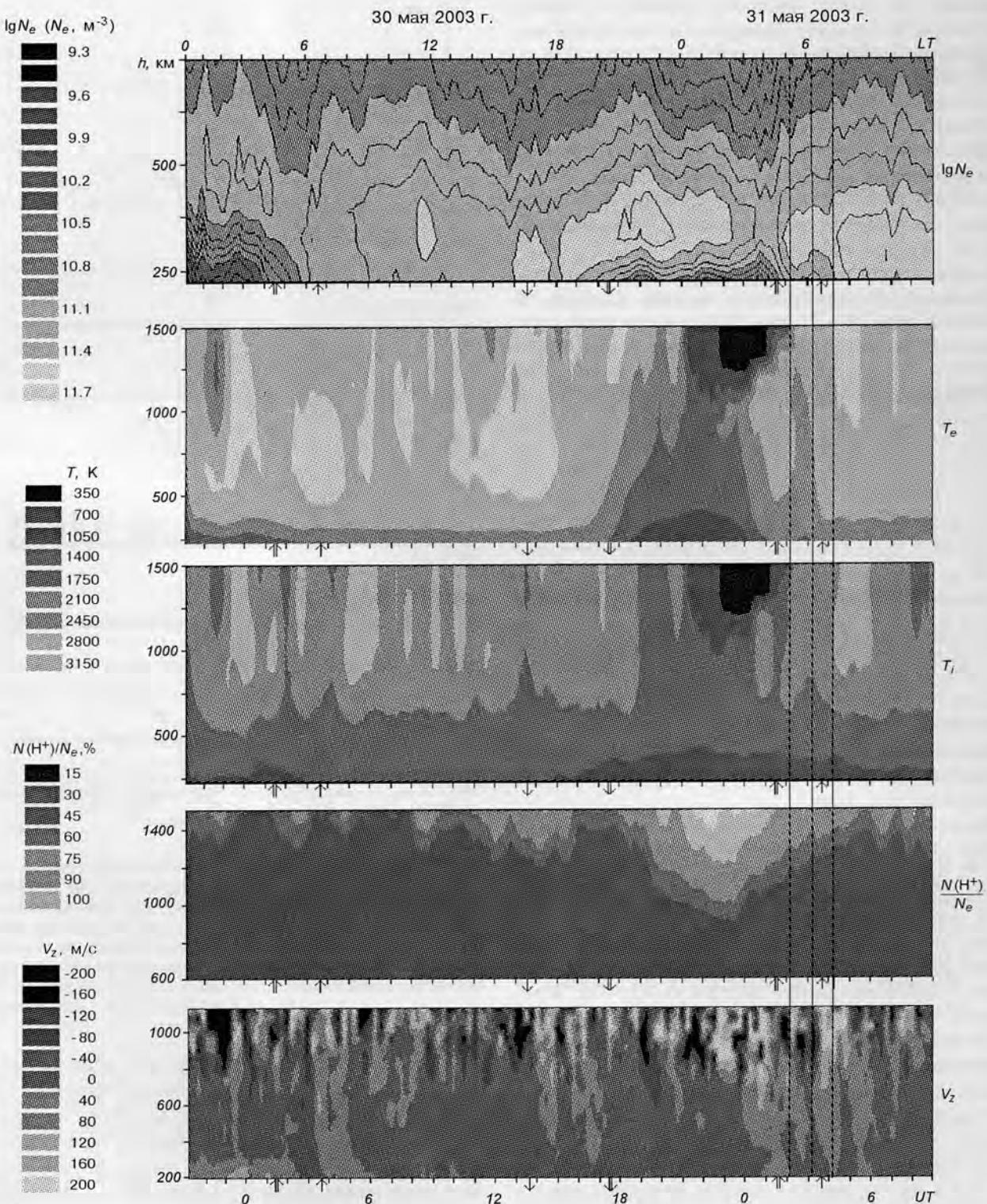


Рис. 4. Вариации параметров ионосферы 29—31 мая 2003 г. по данным харьковского радара НР: логарифм концентрации электронов ($\lg N_e$), температуры электронов и ионов, относительная концентрация ионов водорода $N(H^+)/N_e$, вертикальная составляющая скорости переноса плазмы V_z

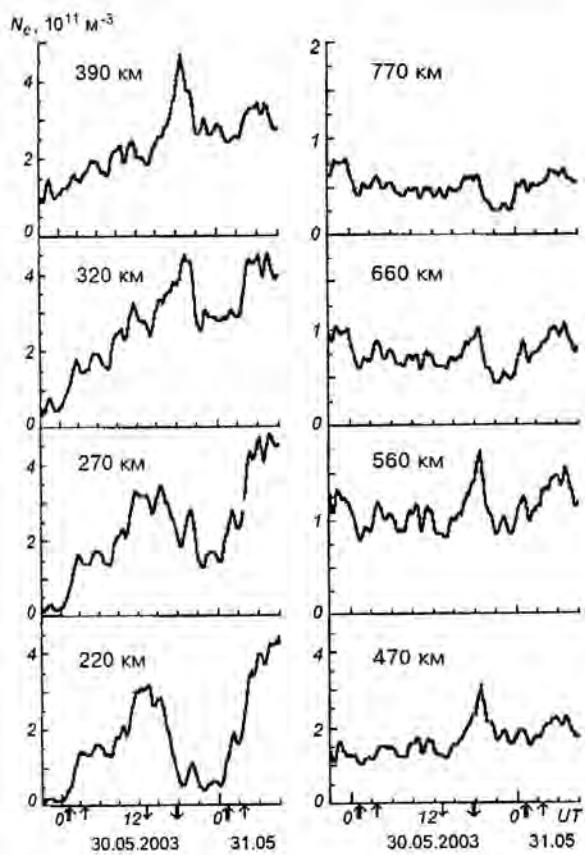


Рис. 5. Вариации электронной концентрации N_e на фиксированных высотах 29—31 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин, шаг скольжения 15 мин)

показаны на рис. 7. Видно, что в спокойный день на высотах примерно 250—700 км температура электронов T_e изменялась от ночных значений около 800 К до 2000—3000 К около полудня, а температура ионов T_i — от 800 К ночью до 1000—2200 К днем. В течение главной фазы магнитной бури, в ночь 29—30 мая, уменьшение N_{mF2} до четырех раз сопровождалось необычным нагревом плазмы: температура T_e превысила 2200—3200 К, а T_i — 1200—2400 К на высотах 320—770 км (рис. 4 и 7). Такое явление в наших широтах наблюдалось крайне редко. На рис. 8 дано сравнение высотных профилей T_e и T_i в ночные и утренние часы спокойных суток 26—27 мая 1998 г. и возмущенных дат 29—30 мая 2003 г. Видно, что во время бури ночью высотные профили T_e и T_i были подобны дневным.

Вариации скорости переноса плазмы. Вариации V_z в возмущенный день 29—30 мая 2003 г. и спокойный день 23—24 июня 1998 г. на разных

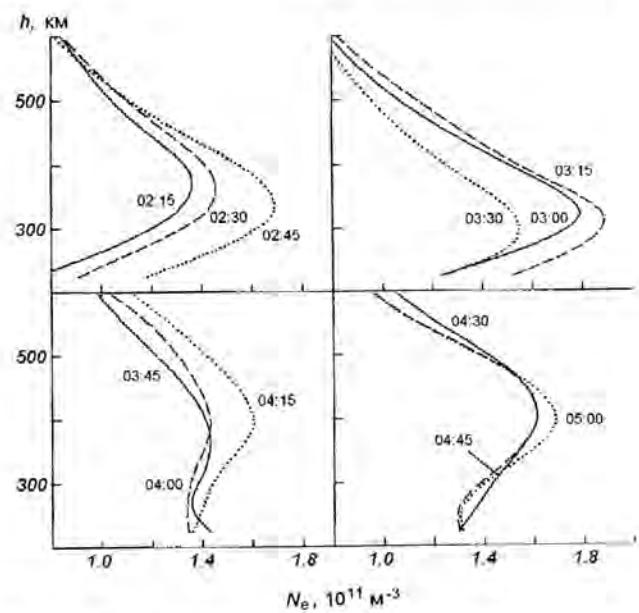


Рис. 6. Высотные профили электронной концентрации N_e в восходящий период возмущенного дня 30 мая 2003 г.

высотах приведены на рис. 9. Видно, что характер суточных вариаций V_z в сравниваемые дни был достаточно близким. Утренний всплеск скорости V_z в спокойный день характеризует регулярные изменения V_z . Он связан с восходом Солнца, когда процессы фотоионизации начинают преобладать над потерями ионов O^+ в остыvшей за ночь атмосфере, и избыток плазмы уносится вверх. В возмущенный день отмечалось увеличение модуля отрицательных значений V_z , а также необычное возмущение V_z в восходящий период (около 02:00—05:00), которое накладывалось на утреннее поведение скорости V_z и изменяло ее знак (рис. 9). Так, около 02:00 скорость V_z в спокойный день составляла 5, 15, 25, 37 и 50 м/с на высотах 300, 400, 500, 600 и 700 км соответственно, а 30 мая на тех же высотах V_z имела значения 2, -10, -13, -20, -13 м/с. В 04:00 в возмущенный день наблюдался положительный всплеск V_z на всех высотах, тогда как в это же время в спокойный день значения V_z в основном были отрицательными. Квазипериодическое возмущение V_z сопутствовало вышеупомянутому нарушению утреннего роста $NmF2$ на фоне резкого уменьшения, а затем увеличения высоты $hmF2$ (рис. 3, б и в).

Вариации ионного состава. Вариации относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ на фиксированных высотах для спокойного и возмущенного дней показаны на рис. 10. Видно, что в

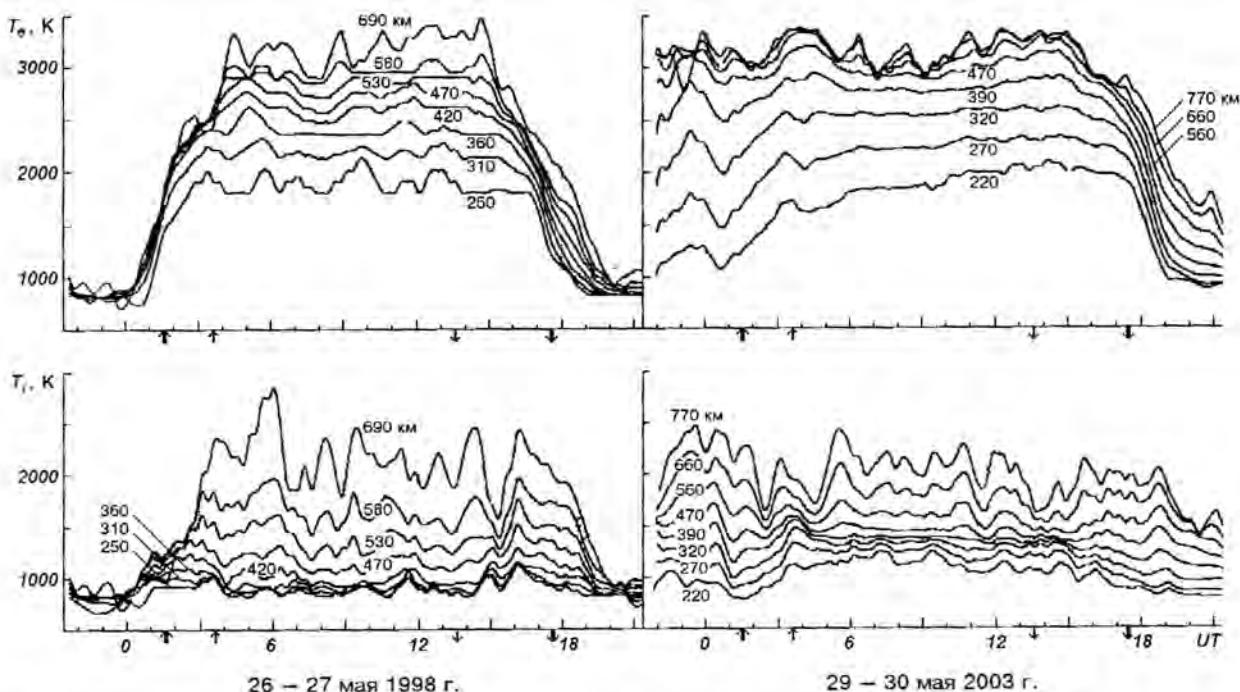


Рис. 7. Вариации T_e и T_i в спокойный день 26–27 мая 1998 г. и возмущенный день 29–30 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

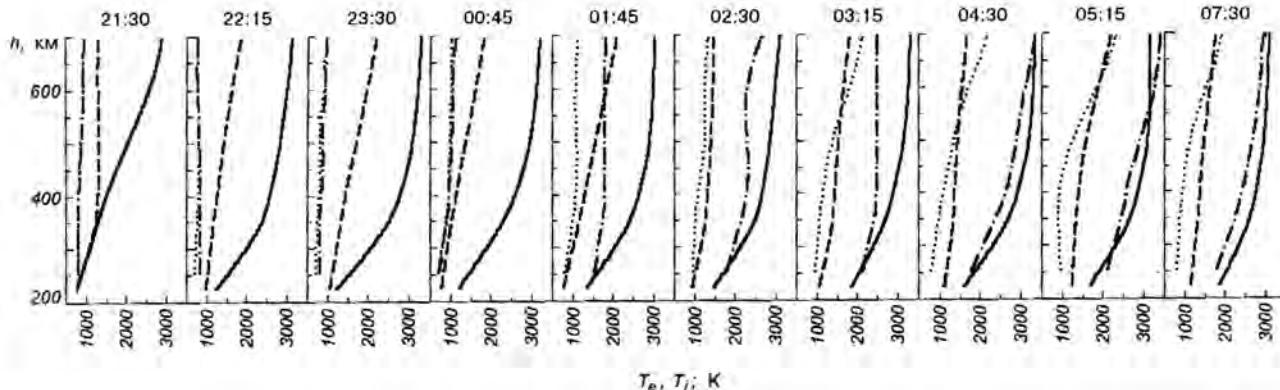


Рис. 8. Сравнение высотных профилей температур T_e и T_i во время магнитной бури 29–30 мая 2003 г. (сплошная линия — T_e , штриховая — T_i) и в спокойные сутки 26–27 мая 1998 г. (штрих-пунктирная — T_e , пунктир — T_i) в почные и утренние часы (время UT)

спокойный день поведение $N(H^+)/N_e$ было типичным для летнего сезона периода средней солнечной активности. Относительная концентрация ионов H^+ нарастала после захода Солнца, достигла наибольшего значения перед восходом Солнца (около 23:00), когда атмосфера наиболее охлаждена, после чего начала уменьшаться. Например, на высоте 800 км максимальное значение $N(H^+)/N_e \approx 0.7$. Особенности регулярных сезонно-суточных и сол-

ечно-циклических вариаций $N(H^+)/N_e$ в ионосфере над Харьковом описаны нами в работах [3, 9, 15].

В возмущенный день поведение $N(H^+)/N_e$ имело сложный характер. Оно, по-видимому, отражало особенности вариаций во время магнитной бури концентрации ионов O^+ , температуры нейтралов, а также потока ионов H^+ на верхней границе и критического потока H^+ . При этом в течение глав-

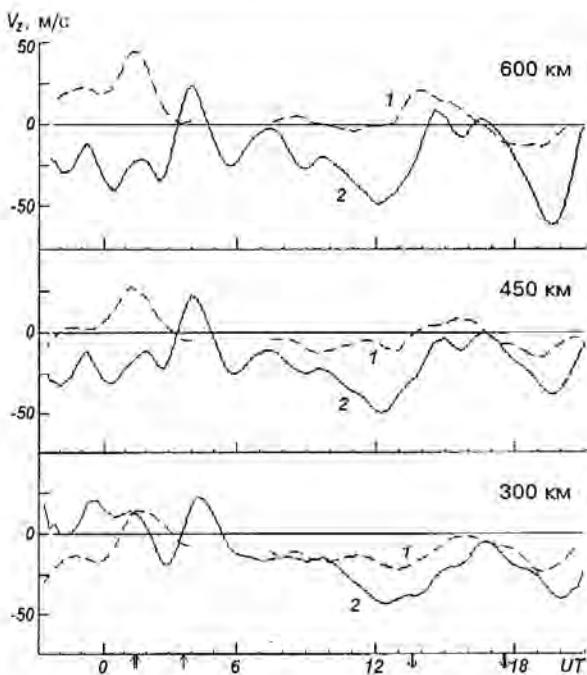


Рис. 9. Вариации скорости V_z : 1 — в спокойный день 23—24 июня 1998 г., 2 — в возмущенный день 29—30 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

ной фазы магнитной бури ночью (около 23:00), например, на высоте 800 км наблюдалось уменьшение $N(H^+)/N_e$ более чем на порядок величины по сравнению со спокойной датой (рис. 4 и 10). Около местного полудня 30 мая на высотах 1200—1500 км отмечалось увеличение $N(H^+)/N_e$ до 0.2—0.7, что превысило ночные значения примерно в 1.2 раза. Значение $N(H^+)/N_e \approx 0.2$ в спокойные сутки наблюдалось днем на высоте около 800 км, т. е. гораздо ниже, чем 30 мая.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, СОПУТСТВОВАВШИХ БУРИ

Концентрация нейтралов. На рис. 11 приведены вариации концентраций основных компонентов нейтральной атмосферы $N(N_2)$, $N(O)$, $N(O_2)$ — молекулярного азота, атомарного и молекулярного кислорода на высоте 300 км в спокойные дни и возмущенные дни 29 и 30 мая 2003 г. В качестве спокойных дней взяты даты 19 и 20 мая 2003 г. (рис. 11, а). Расчет концентрации нейтралов выполнен по модели нейтральной атмосферы MSIS-86 [30]. Дополнительно приводится параметр $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, который в фотохимиче-

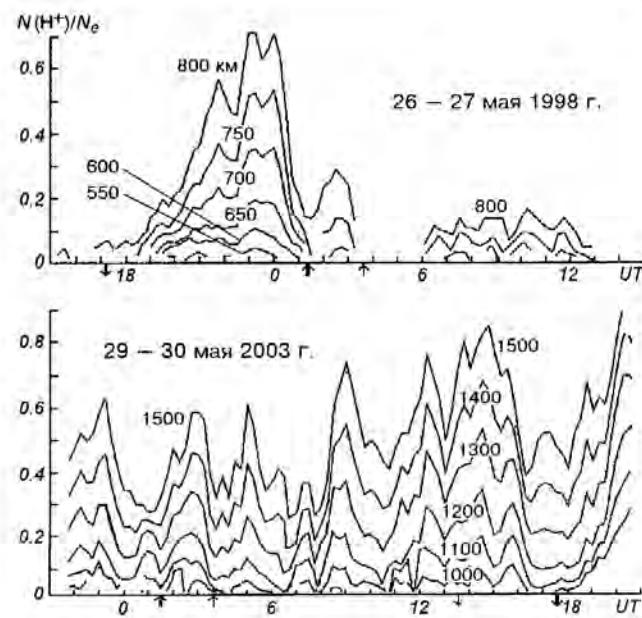


Рис. 10. Вариации относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ в контрольный день 26—27 мая 1998 г. и возмущенный день 29—30 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

ском приближении в стационарных условиях определяет соотношение процессов ионообразования и потерь ионов O^+ и примерно пропорционален $NmF2$.

Во время отрицательной ионосферной бури 30 мая $NmF2$ уменьшилась по сравнению со спокойными датами 19—20 мая в четыре раза ночью и в три раза днем. Посмотрим, как изменился при этом состав нейтральной атмосферы. Например, в дневное время около 08:00 согласно модели (рис. 11, б) концентрация $N(O)$ на высоте 300 км по сравнению с контрольным днем 19—20 мая почти не изменилась, $N(O_2)$ увеличилась примерно в 1.6 раза, а $N(N_2)$ — в 1.4 раза. В результате параметр p уменьшился в возмущенный день примерно в 1.4 раза. Такое изменение нейтрального состава не могло обеспечить уменьшения $NmF2$ в 2.5 раза, которое наблюдалось 30 мая в это время. Оно требует более значительного уменьшения p , чем это следует из модели MSIS-86, либо привлечения дополнительных механизмов, которые будут обсуждаться ниже.

Температура нейтралов и нагрев атмосферы. Температура нейтралов T_n вычислялась по методике [40, 41] на основе уравнения теплового баланса ионного газа [5, 42]:

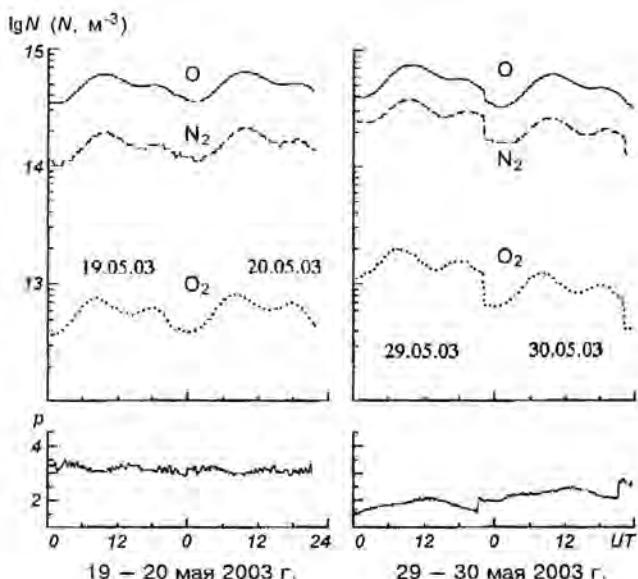


Рис. 11. Вариации концентрации основных компонентов нейтральной атмосферы и параметра $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ на высоте 300 км в контрольные дни 19–20 мая 2003 г. и возмущенные дни 29–30 мая 2003 г. (из расчета по модели MSIS-86)

$$T_i - T_n = \\ = \frac{4.82 \cdot 10^7 N_e (T_e - T_i) T_e^{-3/2}}{6.6 N(N_2) + 5.8 N(O_2) + 0.2 N(O)(T_i + T_n)^{1/2}}$$

В расчете использовались параметры ионосфера N_e , T_e , T_i , измеренные методом НР. Концентрации нейтральных компонентов найдены из модели MSIS-86. Временные вариации T_n 29–31 мая 2003 г. на высотах 220, 270, 320, 390 и 470 км иллюстрирует рис. 12. Здесь же для сравнения приведены данные $T_{n\text{MSIS}}$, рассчитанные по модели MSIS-86, для возмущенных дней 29–31 мая и контрольных спокойных суток 19 мая 2003 г.

Анализ результатов расчета T_n из данных радара и $T_{n\text{MSIS}}$ из модели MSIS-86 обнаружил следующие особенности в поведении T_n .

1. В течение главной фазы магнитной бури в ночь 29–30 мая 2003 г. T_n , отслеживая изменения температуры ионов T_i , увеличивалась с увеличением высоты по крайней мере до 400 км. Это свидетельствовало о нагреве и расширении нейтральной атмосферы.

2. Температура T_n на высоте 270 км 30 мая 2003 г. изменялась от ночных значений около 1150 К до 1250 К вблизи местного полудня.

3. Во время главной фазы магнитной бури ($K_p = 8$), когда наблюдался необычный нагрев

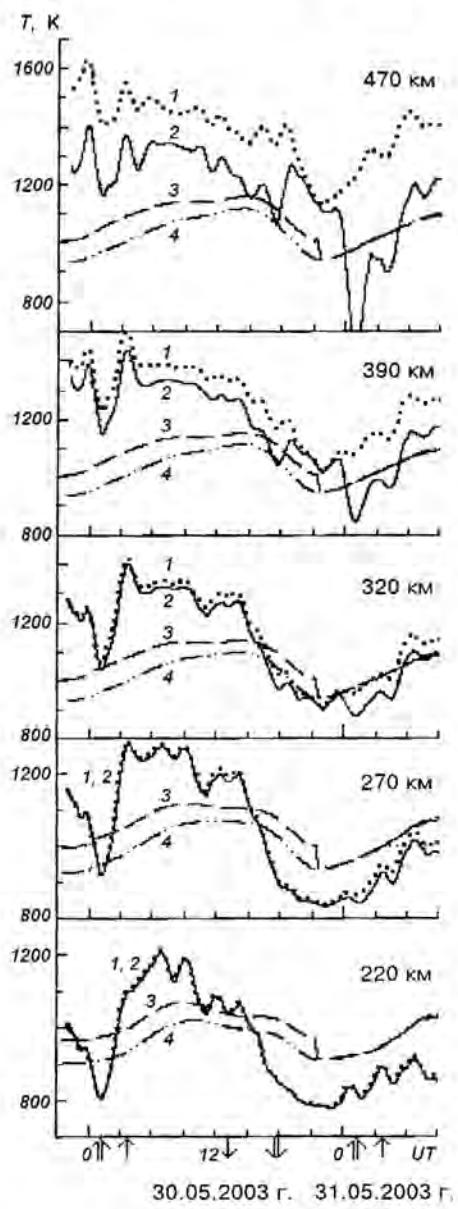


Рис. 12. Измеренные температуры ионов T_i (1) и рассчитанные температуры нейтралов T_n по данным радара НР (2) (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин) и $T_{n\text{MSIS}}$ по модели MSIS-86 (3) во время магнитной бури 29–31 мая 2003 г. Приведены также значения $T_{n\text{MSIS}}$ для спокойного дня 19 мая 2003 г. (4)

плазмы на фоне глубокой депрессии N_e в области F T_n составляла 1000, 1150, 1250, 1350, 1350 К на высотах 220, 270, 320, 390 и 470 км. Для сравнения отметим, что в следующую ночь, во время фазы восстановления ($Ap = 17$, $K_p = 5$), значения T_n уменьшились примерно на 200, 300, 330, 350 и 350 К на этих же высотах.

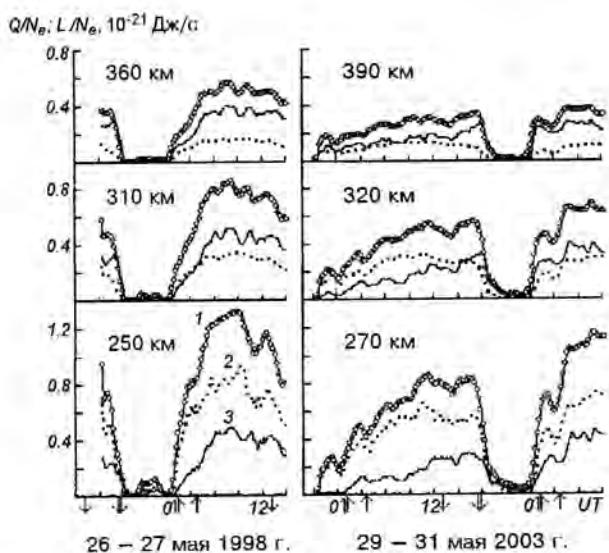


Рис. 13. Вариации скоростей нагрева электронного газа (из расчета на один электрон) Q/N_e (1), теплообмена электронов с атомами кислорода L_e/N_e (2) и ионами L_{ei}/N_e (3) в контрольный день 26—27 мая 1998 г. и во время магнитной бури 29—31 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

4. Вблизи местного полудня температура T_n увеличивалась от 1150 до 1330 К на высотах 220—470 км.

5. Во время главной фазы магнитной бури высота термопаузы, где атмосфера становится изотермичной, увеличилась не менее чем до 400 км, тогда как в спокойный день 19—20 мая 1998 г. она составляла около 300 км.

6. Модель MSIS-86 дает заниженные значения T_n в возмущенный день: 30 мая вблизи местного полудня значения T_n , рассчитанные по данным радара, отличались от модельных значений $T_{n,MSIS}$ на 80—190 К на высотах 220—470 км.

Подвод энергии к электронам. Эта энергия определяется из уравнения теплового баланса. Нагрев тепловых электронов осуществляется в процессе термализации сверхтепловых электронов, который в нижней части ионосферы ($h \geq 300$ —350 км) из-за малости длин их свободного пробега носит локальный характер. На этих высотах основными механизмами охлаждения электронного газа являются кулоновские соударения с ионами и возбуждение уровней тонкой структуры атомов кислорода [5, 42]. Тогда для стационарных условий уравнение баланса энергии электронов в системе СИ можно записать в виде [18, 25]:

$$Q = L_{ei} + L_e,$$

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N_e^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2},$$

$$L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} N_e N(O) (T_e - T_i) T_e^{-1},$$

где Q — относенная к единичному объему мощность, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях со сверхтепловыми электронами, L_{ei} — мощность, теряемая при столкновении электронов с ионами, L_e — мощность, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода.

На рис. 13 приведены результаты расчета энергии Q/N_e , подводимой к электрону в единицу времени, а также составляющих потерь энергии электронного газа в процессе теплообмена с ионами L_{ei}/N_e и нейтралами L_e/N_e . В расчетах использовались значения T_e , T_i и N_e , полученные методом НР. Параметры T_n и $N(O)$ взяты из модели MSIS-86. Представлены данные, полученные в контрольный день 26—27 мая 1998 г. (рис. 13, а) и во время магнитной бури 29—31 мая 2003 г. (рис. 13, б) на близких высотах. Видно, что в разные даты вклад составляющих L_{ei}/N_e и L_e/N_e в процесс охлаждения электронного газа был различным. Например, в спокойный день 26—27 мая 1998 г. вблизи максимума слоя F2 на высоте 250 км около местного полудня ($f_0F2 = 6$ МГц) преобладали потери в процессе неупругого теплообмена электронов с нейтралами L_e/N_e за счет высокой разности температур $T_e - T_i$ при малых значениях N_e , что характерно для условий невысокой солнечной активности ($F_{10.7A} = 106$ ед.). На высоте около 300 км вклад двух механизмов охлаждения электронов, по-видимому, сравнялся. На высоте $h = 360$ км начали преобладать потери энергии электронов L_{ei}/N_e в кулоновских соударениях с ионами.

В возмущенный день 30 мая 2003 г. в условиях сильнейшей отрицательной ионосферной бури и депрессии $N_e f_0F2 \approx 4.5$ МГц вблизи полудня) потери L_{ei}/N_e были малы, они сравнялись со значениями L_e/N_e только на высоте 390 км, что объясняется также нагревом и расширением термосферы, при котором концентрация атомарного кислорода $N(O)$ уменьшается медленно.

В результате вблизи полудня на высотах 250—270 км подвод энергии к электронному газу Q/N_e составлял около $1.3 \cdot 10^{-21}$ Дж/с в спокойный день и $0.8 \cdot 10^{-21}$ Дж/с во время магнитной бури 30 мая 2003 г., т. е. превышал последний в 1.6 раза.

Особенностью теплового режима ионосферы стала значительная величина энергии Q/N_e во время

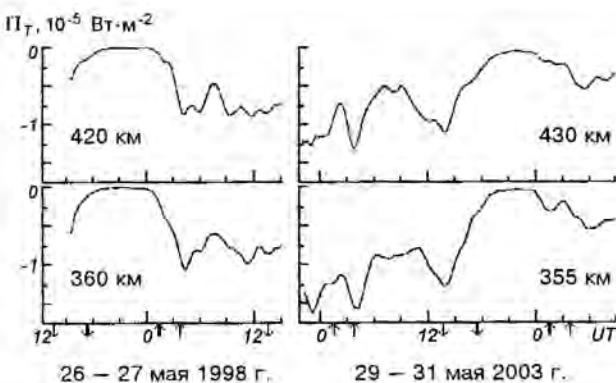


Рис. 14. Вариации потока тепла Π_T , переносимого электронами из протоносферы в ионосферу в контрольный день 26–27 мая 1998 г. и во время магнитной бури 29–31 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

главной фазы магнитной бури, в ночь 29–30 мая (рис. 13, б). На высоте 270 км она составляла около $0.3 \cdot 10^{-21}$ Дж/с, тогда как в спокойный день подвод энергии Q/N_e был близок к нулю. При этом в процессе охлаждения электронного газа основную роль играло, по-видимому, возбуждение тонкоструктурных уровней атомарного кислорода. Потери энергии электронов в кулоновских соударениях с ионами были малы из-за низкой их концентрации.

Потоки тепла, переносимого электронами. Эти потоки характеризуют приток энергии к электронному газу из плазмосферы за счет теплопроводности электронов. Вертикальная составляющая потока тепла равна

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial z},$$

где $\kappa_e = 2.08 k^2 N_e T_e / m v_{ei}$ — коэффициент теплопроводности электронного газа, k — постоянная Больцмана, m — масса электрона, $I = 66.4^\circ$ — наклонение геомагнитного поля, v_{ei} — частота столкновений электронов с ионами. В системе СИ $v_{ei} \approx 5.5 \cdot 10^{-6} N_e T_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N_e^{-1/3})$.

Результаты расчета Π_T на близких высотах в контрольный день 26–27 мая 1998 г. и во время магнитной бури 29–31 мая 2003 г. приведены на рис. 14. Редко наблюдаемой в средних широтах особенностью теплового режима ионосферы стало высокое значение $\Pi_T = -1.6 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² на высоте 355 км в ночь 29–30 мая во время главной фазы магнитной бури (рис. 14, б). В спокойную дату он был близок к нулю. Максимальное значение Π_T 30 мая наблюдалось в утренние часы и составляло около $-1.5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². Вблизи местного полудня $\Pi_T \approx -0.9 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² во время магнитной бури и

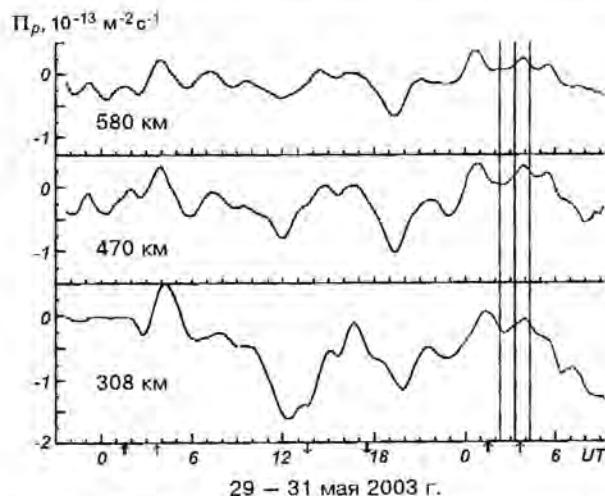


Рис. 15. Вариации потока плазмы Π_p по данным радара НР в Харькове во время магнитной бури 29–31 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

$-0.75 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² в спокойный день. Во время магнитной бури днем Π_T увеличился по сравнению с контрольным днем в среднем в 1.2 раза.

Потоки плазмы. Вертикальный поток плазмы $\Pi_p = N_e V_z$. Он вычисляется по измеренным значениям N_e и V_z . Вариации потока в верхней части области F2 характеризуют процессы ионосферно-протоносферного обмена плазмой и контролируют высотное распределение заряженных частиц. В дневное время Π_p направлен вверх под действием повышенного давления плазмы в области F2 ионосферы. Ночью, когда прекращается действие солнечного источника ионизации и давление плазмы уменьшается, поток направлен вниз и подпитывает F2-слой.

Вариации потока Π_p во время бури 29–31 мая (рис. 15) сохраняли основные черты суточного поведения. К ним относятся восходящий поток во время восхода Солнца и нисходящий в заходный период. Значения Π_p в указанные моменты на высоте 308 км составляли $+0.5 \cdot 10^{13}$ м⁻²с⁻¹ и $-1.2 \cdot 10^{13}$ м⁻²с⁻¹ соответственно. С увеличением высоты величина потока уменьшалась за счет падения N_e . Отличие от регулярного поведения Π_p заключалось в запаздывании утреннего восходящего потока относительно момента восхода Солнца. Запаздывание связано с упомянутым выше квазипериодическим возмущением скорости V_z на фоне необычного нарушения утреннего нарастания $NmF2$ и резкого перепада высоты $hmF2$. Возмущение V_z наложилось на восходящий утренний всплеск скорости и вызвало смену знака V_z .

ОБСУЖДЕНИЕ

Основные проявления и особенности геокосмической бури. Обобщим рассмотренные особенности геокосмической бури и процессы в области F ионосферы, связанные с нею.

1. Сверхсильная магнитная буря ($K_p = 8$) протекала на фоне высокой вспышечной активности Солнца. Магнитная буря началась внезапно около 12:25 UT, минимальное значение $Dst = -131$ нТл наблюдалось в ночь 29—30 мая; 29, 30 и 31 мая индекс Ap был равен 89, 49 и 17 соответственно.

2. Магнитная буря вызвала интенсивную отрицательную ионосферную бурю. Максимальное отклонение критической частоты δf_0F2 составило около -50% в ночь 29—30 мая и -45% днем 30 мая.

3. К числу эффектов бури относится уменьшение электронной концентрации $NmF2$ ночью, в течение главной фазы бури, примерно в четыре раза и вблизи полудня — в три раза. Постепенное восстановление N_e началось 30 мая после 08:00 и продолжалось до конца измерений.

4. Во время главной фазы магнитной бури, в ночь 29—30 мая, высота максимума электронной концентрации $hmF2$ увеличилась на 160 км около местной полуночи, достигнув примерно 530 км, и на 70 км вблизи полудня.

5. Необычный нагрев плазмы отмечался в течение главной фазы магнитной бури. При этом температура электронов в ночь 29—30 мая превысила 2000—3200 К, а ионов — 1200—2400 К на высотах 320—770 км. В спокойных условиях значения ночных температур составляли около 800 К. Такой нагрев в наших широтах наблюдался крайне редко.

6. Вблизи восхода Солнца зарегистрировано необычное явление, связанное с нарушением утреннего нарастания электронной концентрации $NmF2$ на фоне резкого перепада высоты максимума слоя $F2$ вниз — вверх и деформации слоя, которые сопровождались квазипериодическим возмущением скорости V_z .

7. Относительная концентрация ионов водорода $N(H^+)/N_e$ во время главной фазы бури ночью 29—30 мая уменьшилась по сравнению со спокойной датой более чем на порядок.

8. В дневное время $N(H^+)/N_e$ достигла значений 0.2—0.7 на высотах 1200—1500 км и превысила ночные значения в 1.2 раза, тогда как в спокойные сутки днем значения $N(H^+)/N_e$ уменьшились по сравнению с ночными более чем в четыре раза.

Физическое истолкование результатов наблюдений. Сначала обсудим вариации электронной концентрации $NmF2$ в максимуме слоя $F2$. Уменьшение $NmF2$ во время бури в четыре раза ночью и

в три раза днем только в некоторой степени можно объяснить изменением нейтрального состава и уменьшением параметра p . Днем это уменьшение составляло 1.4 раза. Изменение состава, как известно, связано с высокоширотным нагревом термосферы (за счет высыпания энергичных частиц и усиления авроральных токов) и перестройкой глобальной термосферной циркуляции [4, 8, 12]. Кроме изменения состава, следует учесть также вклад других факторов в увеличение скорости потерь ионов O^+ , например колебательное возбуждение молекул $N_2(v)$ [19, 36, 37, 39]. Как известно, этот вклад увеличивается при значениях $T_e \geq 1500$ К [4, 5, 37, 42]. В нашем случае $T_e = 2000...3200$ К, в том числе в ночное время, и роль возбужденных молекул азота должна быть существенна. Кроме того, около полуночи, в течение главной фазы магнитной бури, когда на протяжении трех 3-часовых интервалов индекс $K_p = 8$, весьма вероятно уменьшение $NmF2$ за счет смещения к экватору главного ионосферного провала (ГИП). Об этом косвенно может свидетельствовать максимальное значение индекса авроральной активности, равное 10, которое было зарегистрировано на спутнике NOAA POES примерно с 21:00 29 мая до 03:30 30 мая (<http://solar.sec.noaa.gov/Augusta/index.html>). Значение этого параметра, характеризующего мощность энергичных частиц, вторгающихся в атмосферу аврорального овала, подтверждает возможность смещения в указанный период времени экваториальной границы ГИП до геомагнитных широт 51.0° — 45.0° . Прохождение ГИП во время магнитной бури отмечалось неоднократно, например, на радаре в Миллстоун Хилле ($L = 3.3$). Так, оно наблюдалось в мае 1990 г. при максимальных значениях $K_p = 7$ [20], в июне 1991 г. при $K_p = 7$ [19]. В Харькове, где $L \approx 2.0$, подобное редкое для средних широт явление отмечалось после полуночи во время уникальной бури 25 сентября 1998 г. при $Ap = 121$, $K_p = 7, 8, 9$ [6, 24]. Оно было обнаружено при анализе глобальных карт полного электронного содержания (TEC), построенных по данным навигационной системы GPS [1]. И наконец, следует учитывать, что в реальных условиях во время магнитной бури действуют одновременно несколько факторов, эффекты которых могут накладываться.

Обсудим теперь вариации высоты $hmF2$ максимума слоя $F2$. Измерения на радаре в Харькове показали увеличение $hmF2$ во время бури примерно на 160 км ночью и на 70 км вблизи полудня по сравнению с контрольной датой 26—27 мая 1998 г. Подъем слоя $F2$ в условиях рассматриваемой сверхсильной бури, по-видимому, также объясняется совместным действием ряда факторов [19, 39].

Среди них расширение термосферы и перестройка глобальной термосферной циркуляции за счет усиления высокоширотного источника нагрева нейтрального газа. Результатом возмущения циркуляции является дополнительный меридиональный ветер, направленный из высоких широт к экватору. Ночью он усиливает основную составляющую атмосферной циркуляции, поднимая слой выше, а днем ослабляет ее и препятствует снижению слоя. Возможной причиной увеличения $hmF2$ также может быть смещение к экватору ГИП. Ему сопутствует увеличение $hmF2$, за которым следует депрессия N_e в области F [19, 26, 27, 39].

Наряду с перечисленными причинами рассматривается также возможность вклада в увеличение $hmF2$ эффекта проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты [4, 20, 22, 26, 39] за счет необычно продолжительного (более суток) высыпания протонов и электронов с потоком около $10^8 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{ster}^{-1}$. В результате высыпания повышается проводимость нижележащей ионосфера, закорачивающей экранирующее поле поляризации (II систему продольных токов) [4, 21, 28]. Следовательно, однозначная интерпретация увеличения $hmF2$ действием только одного источника возмущения затруднена, поскольку эффекты разных источников сходны. В случае преобладания эффектов электрических полей оценка сверху E_y по величине изменения $hmF2$ дала максимальные значения поля, примерно равные 25 мВ/м ночью и 20 мВ/м днем.

Исходя из значений AE в течение главной фазы магнитной бури, можно оценить напряженность электрического поля E магнитосферного происхождения в высоких широтах [10, 12]. Так, ночью 29–30 мая при $AE = 2000\ldots2500$ нТл напряженность поля E могла усилиться до 120–150 мВ/м. В средних широтах она могла достичь значения 25 мВ/м. Кроме того, зная величину $Bz = -15$ нТл и радиальной скорости солнечного ветра $V_{sw} \approx 700$ км/с во время главной фазы магнитной бури, получим напряженность межпланетного электрического поля $E_y = -V_{sw}Bz \approx -10$ мВ/м. По оценке [35] этой величины E_y достаточно, чтобы усилить магнитосферную конвекцию и вызвать высокую геомагнитную активность, характеризуемую приведенными выше значениями индексов AE и Dst .

Увеличение высоты $hmF2$ во время магнитной бури по сравнению с контрольным днем 26–27 мая 1998 г. наблюдалось от момента включения радара вблизи местной полуночи и до 13:00 UT (рис. 3, б). Как отмечалось выше, на фоне утреннего снижения слоя $F2$ зарегистрирован резкий перепад высоты $hmF2$ вниз — вверх вблизи восхода Солнца, кото-

рый составил около 160 км. Это необычное явление сопровождалось нарушением утреннего нарастания $NmF2$ (рис. 3, б), квазипериодическим возмущением скорости V_z (рис. 9) и деформацией профиля N_e (рис. 6). По-видимому, такие события также могли стать результатом наложения эффектов от различных источников в условиях геомагнитных возмущений [21]. К их числу можно отнести эффекты крупномасштабных термосферных возмущений, включая перестройку состава термосферы с увеличением содержания тяжелых компонентов (O_2 и N_2). Оно ведет к уменьшению концентрации N_e в районе максимума слоя $F2$ и расслоению профиля. Необходимо учитывать также усиление меридионального ветра к экватору за счет высокоширотного джоулева нагрева термосферы во время магнитной бури, которое влияет на высотное распределение концентрации заряженных компонентов. Деформация профиля N_e может быть связана также с прохождением перемещающихся ионосферных возмущений, обусловленных распространением внутренних гравитационных волн во время суббури [4, 21, 34, 35]. Наконец, быстрые изменения высоты $hmF2$, V_z и $NmF2$ могут быть вызваны нестационарностью магнитосферных электрических полей и их проникновением в средние широты [26, 27]. Так, увеличение $hmF2$ примерно на 90 км в течение 03:30–04:00 (без учета изменения $hmF2$ за счет расслоения профиля N_e) могло быть вызвано импульсом электрического поля над Харьковом с зональной составляющей $E_y \approx 20$ мВ/м, направленной на восток.

В магнитосфере этим событиям предшествовали высокая суббуровая активность вблизи полуночи 29–30 мая, а также поворот Bz к северу и резкий спад динамического давления солнечного ветра около 02:00.

Обратимся к вариациям T_e и T_i . В течение главной фазы магнитной бури наблюдался необычный нагрев плазмы. При этом температура электронов в ночь 29–30 мая превысила 2000–3200 К, а ионов — 1200–2400 К на высотах 300–800 км. Такое явление в наших широтах наблюдалось крайне редко, так как в спокойных условиях ночью $T_e \approx T_i \approx 800$ К.

Известно, что увеличение T_e во время бури объясняется рядом причин. Среди них джоулев нагрев, связанный с проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты, высыпание энергичных частиц, которые приводят к увеличению ионосферных динамо-токов, и уменьшение охлаждения электронов при низких значениях N_e [4, 19]. О наличии этих факторов свидетельствовали высокая суббуровая активность в ночь 29–

30 мая, которая сопровождалась усилением ауроральных электроструй и высокими значениями индекса $AE = 2000\ldots2500$ нТл. Усиление потоков энергичных частиц (протонов и электронов) регистрировалось на спутниках GOES-8 и GOES-12 на протяжении более суток (рис. 1 и 2).

Увеличение T_e объясняется теми же процессами джоулевой диссипации ионосферных токов, которые вызвали увеличение T_e . Определенный вклад может вносить также фрикционный нагрев за счет трения о нейтральный газ ионов, быстро движущихся под действием электрических полей [19, 39]. Перечисленные эффекты, которые мы наблюдали, например, в течение бури 25 сентября 1998 г., могут объяснить нагрев плазмы на несколько сотен кельвин [6, 13, 24].

Во время рассматриваемой бури ночью температура плазмы увеличивалась более чем на 1000 К. Столь необычный нагрев плазмы, по-видимому, мог быть связан все с тем же смещением к экватору главного ионосферного провала, а вместе с ним приближением к Земле плазмопаузы и «горячей зоны», в которой температура плазмы повышена до нескольких тысяч кельвин. Приток тепла из горячей зоны вдоль силовых линий магнитного поля за счет теплопроводности электронов вызывает нагрев плазмы в F2-области, где часть тепла расходуется, например, на возбуждение колебательных уровней молекул N_2 . Последнее, как отмечалось выше, также ускоряет потери ионов O^+ и способствует дальнейшему уменьшению электронной концентрации в F2-слое. Смещению главного ионосферного провала и горячей зоны на меньшие L -оболочки, по-видимому, способствовала высокая геомагнитная активность, при которой в ночь 29—30 мая зарегистрированы подряд три 3-часовых периода со значением индекса $K_p = 8$.

Далее обсудим особенности необычного квазипериодического возмущения скорости V_z в восходящий период. Отметим, что вариации V_z коррелировали с изменением высоты $hmF2$ с небольшим опережением (около 30 мин). Кроме того, наблюдалось запаздывание максимума возмущения V_z при уменьшении высоты. Так, на высотах 600, 300 и 200 км максимум был зарегистрирован в 02:40, 02:50 и 03:15 соответственно. Отметим также, что изменения V_z опережали вариации N_e приблизительно на 50 мин. Можно предположить, что возмущения V_z , $hmF2$ и N_e имели общую физическую природу. Их источником мог быть импульс электрического поля над Харьковом, связанный с проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты во время бури [26—28]. Рис. 16 иллюстрирует

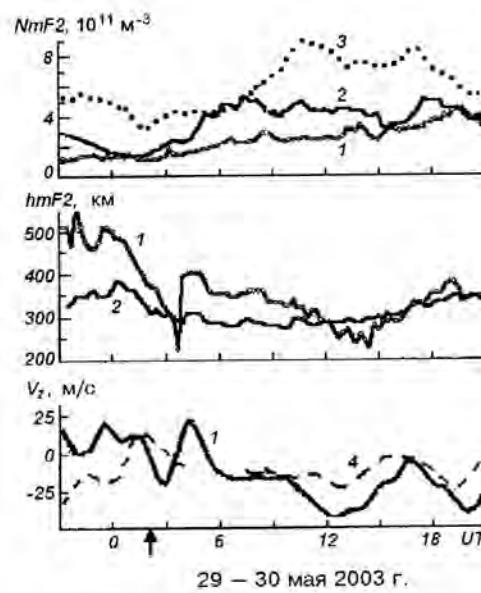
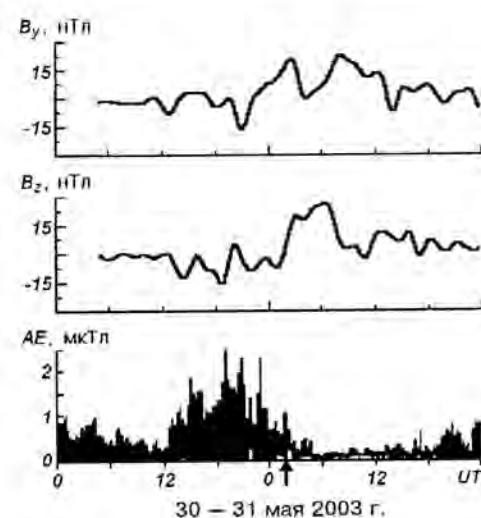


Рис. 16. Вариации B_y -, B_z -составляющих ММП, AE -индекса, а также параметров $NmF2$, $hmF2$ и V_z : 1 — во время магнитной бури 29—30.05.03, 2 — в магнитоспокойный день 26—27.05.98 в Харькове, 3 — в контрольный день, 4 — 23—24.06.98. Стрелкой отмечено время прохождения импульса электрического поля и его отклика в ионосфере

дестабилизирующие эффекты магнитосферных электрических полей в поведении параметров N_e , $hmF2$ и V_z ионосферы средних широт, а также их возможную связь с индексом AE и компонентами ММП. Следует учесть также вклад в величину запаздывания возмущения на разных высотах процессов образования, потерь и переноса плазмы.

Обсудим вариации относительной концентрации ионов H^+ . Особенностью поведения ионного состава во внешней ионосфере во время магнитной бури явилось уменьшение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ в течение главной фазы бури в ночь 29—30 мая более чем на порядок величины по сравнению со спокойной датой. Это уменьшение, по-видимому, связано с опустошением магнитной силовой трубы, проходящей над Харьковом, за счет деформации магнитосферы и смещения главного ионосферного провала вместе с провалом легких ионов в средние широты во время бури [4, 10, 17, 38]. Подобный эффект наблюдался нами, например, во время магнитной бури 18—19 февраля 1999 г. ($Ap = 54$, $K_p = 7$), когда ионы H^+ были зарегистрированы на высотах ниже 1000 км только после полуночи, и концентрация их была в 1.5 раза ниже, чем в спокойный день [14].

Днем 30 мая на высотах 1200—1500 км отмечалось увеличение $N(H^+)/N_e$ до значений 0.2—0.7, которое превысило ночные значения примерно в 1.2 раза. Увеличение $N(H^+)/N_e$ днем свидетельствовало о начавшейся стадии наполнения геомагнитной силовой трубы после главной фазы магнитной бури (фаза восстановления магнитной бури началась около 03:00) и постепенном росте концентрации ионов H^+ . В то же время в спокойный день значение $N(H^+)/N_e \approx 0.2$ наблюдалось примерно на высоте 800 км, т. е. гораздо ниже, чем 30 мая. Это значит, что днем $N(H^+)/N_e$ не достигла уровня, который предшествовал началу магнитной бури. Этого и следовало ожидать, поскольку процесс наполнения магнитных силовых трубок протекает медленно с характерным временем, пропорциональным L^4 [4, 10, 17]. В работе [11] показано, что время наполнения трубы до величины $N(H^+)$ в максимуме профиля порядка 80 % от предельного стационарного значения составляет около 10 ч для $L \approx 2.5$. Для $L \approx 2$ оно близко к 4 ч.

Обратимся к вариациям температуры нейтралов. Расчеты показали, что в течение главной фазы магнитной бури ($Ap = 89$, $K_p = 8$), когда наблюдался необычный нагрев плазмы на фоне глубокой депрессии N_e в области F , на высотах 220—470 км $T_n \approx 1000$ —1350 К. В следующую ночь, во время фазы восстановления магнитной бури ($Ap = 17$, $K_p = 5$), на этих же высотах значения T_n уменьшились до 800—1000 К.

Увеличение T_n в период бури вызывают ряд процессов [32]. Один из них связан с высокоширотным нагревом термосферы за счет джоулевой диссипации магнитосферных электрических полей и высыпающихся энергичных частиц в авроральной

зоне. Перенос нагретого нейтрального газа из высоких широт к экватору осуществляется за счет усиления меридиональной скорости термосферного ветра. Такой перенос тепла является нелокальным источником нагрева среднеширотной термосферы [8, 12, 32]. Другой процесс связан с проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты и высыпанием энергичных частиц из магнитосферы. В этом случае нагрев нейтральной атмосферы носит локальный характер [32]. При этом существенную роль может играть трение нейтрального газа за счет ион-нейтрального трения [19]. Последний обусловлен разностью скоростей нейтрального ветра и $E \times B$ -дрейфа ионов. Он может привести к увеличению T_n во время бури на нескольких сотен кельвин [19, 23, 33]. Кроме того, нагрев T_n может быть результатом притока тепла из горячей зоны плазмосферы.

Во время главной фазы магнитной бури 30 мая высота термопаузы увеличилась не менее чем до 400 км, тогда как в спокойный день 19—20 мая 1998 г. она составляла около 300 км. Это свидетельствует о нагреве и расширении нейтральной атмосферы.

Теперь обсудим вариации потоков тепла. Подвод энергии к электронному газу Q/N_e и поток тепла Π_T , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу, характеризуют особенности теплового режима разных областей ионосферы. Температура электронов в области F ионосферы определяется процессами нагрева, охлаждения и переноса потока тепла. Уравнение теплового баланса электронного газа в стационарных условиях имеет вид [5, 42]:

$$\sin^2 I \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + \sum Q_e - \sum L_e = 0,$$

где $\sum Q_e$ — скорость нагрева тепловых электронов фотоэлектронами, $\sum L_e$ — суммарные потери энергии при упругих и неупругих столкновениях тепловых электронов с ионами и нейтралами.

В нижней части ионосферы ($h \leq 300$ км) длина свободного пробега сверхтепловых электронов гораздо меньше приведенной высоты нейтральной атмосферы, и они теряют свою энергию непосредственно в области образования. Здесь имеет место локальный нагрев тепловых электронов в процессе кулоновского взаимодействия с фотоэлектронами. Подвод энергии Q/N_e к электронному газу в этом случае рассчитывался из условия баланса нагрева тепловых электронов и потерь их энергии в упругих и неупругих столкновениях с ионами и нейтралами (атомами O).

В верхней части области F член с дивергенцией потока тепла Π_T начинает преобладать над осталь-

ными членами уравнения теплового баланса электронов. Тепло переносится в ионосферу из плазмосферы за счет теплопроводности электронного газа. Накопление тепла в плазмосфере происходит за счет термализации в ней сверхтепловых электронов, убегающих из места своего образования (ниже максимума слоя F) во внешнюю ионосферу.

Расчеты показали, что в возмущенный день вблизи полудня значение Q/N_e уменьшилось по сравнению со спокойным днем 26—27 мая 1998 г. почти в 1.6 раза (рис. 13). Уменьшение локального нагрева электронного газа привело к увеличению потока энергии, переносимой фотоэлектронами из области F вдоль магнитных силовых линий в плазмосферу. Избыточная энергия, переносимая фотоэлектронами, вызывает дополнительный нагрев плазмосферы и объясняет увеличение теплового потока Π_T в возмущенный день. Оно составляет примерно 1.2 раза по сравнению со спокойным днем (рис. 14). Эти результаты согласуются с другими данными [31, 33]. Они соответствуют также представлениям о взаимодействии процессов, контролирующих тепловой баланс ионосферы и плазмосферы во время бури [4, 10, 16].

Особенностью теплового режима ионосферы в период главной фазы магнитной бури (в ночь 29—30 мая) является увеличение значений скорости нагрева электронного газа Q/N_e и потока тепла Π_T , переносимого из плазмосферы за счет теплопроводности электронов. В спокойный день эти значения близки к нулю. Такое явление связано с необычным нагревом плазмы в ночное время, когда в течение главной фазы магнитной бури температуры T_e и T_i достигли практически дневных величин.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Представлены результаты наблюдения и компьютерного моделирования поведения внешней ионосферы и протоносферы над Харьковом во время сверхсильной магнитной бури 29—31 мая 2003 г. ($Ap = 89, 49, 17$), вызвавшей сильнейшую отрицательную ионосферную бурю. Результатом бури явились редкие для средних широт изменения структуры, динамики и теплового режима верхней атмосферы Земли, которые сводятся к следующему.

1. Выявлено значительное (до четырех раз) уменьшение электронной концентрации в области F ионосферы и необычный нагрев плазмы (ионов и электронов) до 2400—3200 К в течение главной фазы магнитной бури (в ночь 29—30 мая, $K_p = 8$). Одной из причин таких изменений могла быть

деформация магнитосферы, сопровождаемая, по-видимому, смещением главного ионосферного провала в средние широты, а также горячей зоны вместе с плазмопаузой на меньшие L -оболочки. Результатом необычного нагрева плазмы могло быть увеличение вклада колебательного возбуждения молекул $N_2(v)$ в ускорение реакции потерь ионов O^+ и уменьшение N_e в слое $F2$.

2. Зарегистрировано увеличение высоты $hmF2$ максимума слоя $F2$, которое в главную фазу бури достигло 160 км. В качестве одной из причин подъема слоя $F2$, наряду с эффектами расширения термосферы, усиления меридиональной скорости термосферного ветра к экватору и смещения к экватору главного ионосферного провала, рассматриваются эффекты проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты за счет продолжительного (более суток) усиления потоков протонов и электронов, которые имели значение около $10^8 \text{ м}^{-2}\text{s}^{-1}\text{ст}^{-1}$. Высыпания энергичных частиц могли привести к повышению проводимости нижележащей ионосферы, закорачивающей экранирующее поле поляризации. Оценка сверху зональной составляющей электрического поля E_y над Харьковом по величине изменения $hmF2$ дала максимальные значения поля 25 мВ/м ночью и 20 мВ/м днем.

3. Обнаружено уменьшение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ более чем на порядок величины ночью, в течение главной фазы бури, по сравнению со спокойной датой. Это уменьшение, вероятно, связано с опустошением магнитной силовой трубы, проходящей над Харьковом. Оно могло быть результатом смещения в средние широты главного ионосферного провала и провала легких ионов за счет усиления электрического поля магнитосферной конвекции.

4. Отмечено увеличение $N(H^+)/N_e$ до значений 0.2—0.7 на высотах 1200—1500 км в дневное время 30 мая, когда имела место уже фаза восстановления магнитной бури (она зарегистрирована с 03:00). Увеличение $N(H^+)/N_e$ свидетельствовало о начавшейся стадии наполнения геомагнитной силовой трубы после главной фазы магнитной бури и постепенном увеличении концентрации ионов H^+ . Сравнение со спокойной датой показало, что 30 мая дневное значение $N(H^+)/N_e$ не достигло уровня, который предшествовал началу магнитной бури.

5. Зарегистрировано необычное квазипериодическое возмущение скорости V_z в восходящий период на фоне нарушения утреннего нарастания $NmF2$, резкого перепада высоты $hmF2$ вниз — вверх и деформации слоя. Эти события могли стать резуль-

татом наложения эффектов от различных источников в условиях геомагнитных возмущений. Одним из них могло быть проникновение в средние широты импульса электрического поля с составляющей $E_y \approx 20$ мВ/м, направленной на восток. Его источником в магнитосфере мог стать наблюдавшийся резкий поворот B_z -составляющей ММП с юга на север и изменение динамического давления солнечного ветра.

6. Расчеты показали, что в течение главной фазы магнитной бури, в ночь 29–30 мая ($Ap = 89$, $K_p = 8$), когда наблюдался необычный нагрев плазмы на фоне глубокой депрессии N_e в области F , температура T_n составляла 1000–1350 К на высотах 220–470 км. В следующую ночь, во время фазы восстановления магнитной бури ($Ap = 17$, $K_p = 5$), значения T_n уменьшились на 200–350 К на этих же высотах. Нагрев термосферы привел к ее расширению и росту высоты термопаузы не менее чем до 400 км в течение главной фазы бури; в спокойный день ее высота составляла около 300 км.

7. Установлено на основе расчетов, что в возмущенный день вблизи полудня скорость нагрева электронного газа Q/N_e уменьшилась по сравнению со спокойным днем в 1.6 раза. Это привело к увеличению потока тепла Π_T в 1.2 раза. Особенностью теплового режима ионосферы во время главной фазы магнитной бури (в ночь 29–30 мая) стало увеличение значений Q/N_e и потока тепла Π_T , переносимого из плазмосферы за счет теплопроводности электронов. В спокойных условиях эти значения в ночное время близки к нулю. Данная интерпретация этих эффектов в свете представлений о взаимодействии процессов, контролирующих тепловой баланс ионосферы и плазмосферы во время бури.

8. Сверхсильная геокосмическая буря вызвала целый комплекс процессов, сопутствовавших возмущениям плазмы, электрических и магнитных полей в различных областях околосземного пространства. Эффекты этих возмущений, накладываясь друг на друга, создавали сложную и динамическую картину поведения параметров геомагнитного поля, ионосферы и термосферы.

Авторы благодарны Л. Я. Емельянову, В. Н. Лысенко и И. Б. Склярову за проведение измерений.

1. Афраймович Э. Л., Косогоров Е. А., Леонович Л. А., Пирог О. М. Глобальная картина крупномасштабных ионосферных возмущений во время магнитной бури 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и астрономия.—2002.—42, № 4.—С. 491–498.

2. Боговский В. К., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я. и др. Особенности вариаций параметров ионосферы во время геокосмической бури 30 мая 2003 года // Сб. тез.: Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям. — Кацивели, Крым, 2003.—С. 142.
3. Боговский В. К., Григоренко Е. И., Таран В. И. Солнечно-циклические вариации концентрации ионов водорода во внешней ионосфере // Космична наука і технологія. Додаток до журналу.—2003.—9, № 2.—С. 164–172.
4. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
5. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИЭР.—1969.—57, № 3.—С. 6–30.
6. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники.—2003.—№ 9.—С. 57–94.
7. Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года. // Космична наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 12–25.
8. Дашилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и астрономия.—1985.—25, № 5.—С. 705–721.
9. Кияшко Г. А., Григоренко Е. И. Особенности высотно-временного распределения ионов водорода над Харьковом // Вестник ХГПУ.—2000.—103.—С. 45–47.
10. Кринберг И. А., Таццили А. В. Ионосфера и плазмосфера. — М.: Наука, 1984.—190 с.
11. Саенко Ю. С., Клименко В. В., Намгаладзе А. А. Исследование процессов наполнения и опустошения плазменных трубок с учетом инерции ионов // Геомагнетизм и астрономия.—1982.—22, № 6.—С. 948–952.
12. Серебряков Б. Е. Исследование процессов в термосфере во время магнитных возмущений // Геомагнетизм и астрономия.—1982.—22, № 5.—С. 776–781.
13. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и астрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659–666.
14. Таран В. И., Григоренко Е. И. Ионосферно-протоионосферные процессы во время естественных возмущений по данным Харьковского радара некогерентного рассеяния // Сб. тр. первой Украинской конференции по перспективным космическим исследованиям. — 2001.—С. 119–124.
15. Таран В. И., Григоренко Е. И., Кияшко Г. А. Особенности поведения ионов водорода во внешней ионосфере над Харьковом в период высокой солнечной активности // Вестник нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт». Сб. науч. тр.—2001.—Вып. 4.—С. 258–260.
16. Эванс Дж. Температура нейтральных и заряженных частиц в магнитосфере // Солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1968.—С. 292–352.
17. Bailey G. J., Moffett R. J., Murphy J. A. Calculated diurnal variations of O^+ and H^+ at mid-latitudes. II. Sunspot maximum results // J. Atmos. Terr. Phys.—1979.—41.—P. 471–482.
18. Banks P. M. Charged particle temperatures and electro-thermal conductivity in the upper atmosphere // Ann. Geophys.—1966.—22.—P. 577–584.
19. Buonsanto M. J. Millstone Hill Incoherent scatter F region observations during the disturbances of June 1991 // J. Geophys. Res.—1995.—100, N A4.—P. 5743–5755.
20. Buonsanto M. J. A case study of the ionospheric storm dual effects // J. Geophys. Res.—1995.—100, N A12.—P. 23.857–23.869.
21. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms — a Review // Space Sci.

- Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
22. Buonsanto M. J., Gonzalez S. A., Pi X., et al. Radar Chain Study of the May, 1995 Storm // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*—1999.—61.—P. 233—248.
23. Buonsanto M. J., Pohlman L. M. Climatology of neutral exospheric temperature above Millstone Hill // *J. Geophys. Res.*—1998.—103, N A10.—P. 23.381—23.392.
24. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the September 25, 1998 magnetic storm from Kharkiv incoherent scatter radar data // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, Programme, Poster Presentations Maastricht Exhibition and Congress Centre (MECC), Maastricht the Netherlands. 17—24 August 2002. P. 2280.
25. Dalgarno A., Degges T. C. Electron cooling in the upper atmosphere // *Planet. Space Sci.*—1968.—16.—P. 125—132.
26. Foster J. C., Rich F. J. Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.*—1998.—103.—P. 26.367—26.372.
27. Foster J. C., Cummer S., Inan U. S. Midlatitude particle and electric field effects at the onset of the November 1993 Geomagnetic Storm // *J. Geophys. Res.*—1998.—103.—P. 26.359—26.366.
28. Gonzales C. A., Kelley M. C., Behnke R. A., et al. On the latitudinal variations of the ionospheric electric field during magnetospheric disturbances // *J. Geophys. Res.*—1983.—88, N A11.—P. 9135—9144.
29. Gonzales W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // *J. Geophys. Res.*—1994.—99, N A4.—P. 5771—5792.
30. Hedin A. E. MSIS-86 thermospheric model // *J. Geophys. Res.*—1987.—92, N A5.—P. 4649—4662.
31. Mahajan K. K., Pandey V. K. Model of electron temperature in the topside ionosphere for low and medium solar activity conditions // *J. Geophys. Res.*—1980.—85.—P. 213—216.
32. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime thermosphere above Millstone Hill during severe geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.*—1997.—102.—P. 17.275—17.282.
33. Mikhailov A. V., Fürster M. Some F2-layer Effects during the January 6—11, 1997 CEDAR storm period as observed with the Millstone Hill incoherent scatter facility // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*—1999.—61.—P. 249—261.
34. Mishin E., Foster J. C., Potekhin A. P., et al. Ionospheric perturbations caused by quasi-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm // EOS Trans. AGU, 81 N 48, Fall Meeting, F 947, San Francisco, USA, 2000.
35. Mishin E., Foster J. C., Rich F. J., Taran V. Prompt ionospheric response to short period solar wind variations during the magnetic cloud event Sep 25, 1998 // EOS Trans. AGU, 82 No. 20. Spring Meeting, S 291, San Francisco, USA, May 15, 2001.
36. Pavlov A. V. The role of vibrationally excited oxygen and nitrogen in the ionosphere during the undisturbed and geomagnetic storm period of 6—12 April 1990 // *Ann. Geophys.*—1998.—16.—P. 589—601.
37. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., Richards P. G. Comparison of models and data at Millstone Hill during the 5—11 June 1991 storm // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*—1999.—61.—P. 263—279.
38. Richards P. G., Torr D. D. Seasonal, diurnal and solar cyclical variations of the limiting H⁺ flux in the Earth's topside ionosphere // *J. Geophys. Res.*—1985.—90, N A6.—P. 5261—5268.
39. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., Sipler D. P. Ionospheric effects of the March 1990 magnetic storm: Comparison of theory and measurement // *J. Geophys. Res.*—1994.—99, N A12.—P. 23.359—23.365.
40. Salah J. E., Evans J. V. Measurements of thermospheric temperature by incoherent scatter radar // *Space Res.*—1973.—13.—P. 267—286.
41. Salah J. E., Evans J. V., Alcayd D., Bauer P. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Saintin // *Ann. Geophys.*—1976.—32, fasc. 3.—P. 257—266.
42. Shunk R. W., Nagy A. F. Electron temperature in the F region of the ionosphere: theory and observations // *Rev. Geophys. Space Phys.*—1978.—16, N 3.—P. 355—399.

THE SEVERE GEOMAGNETIC STORM ON 30—31 MAY 2003: RESULTS OF MEASUREMENTS AND SIMULATION

Ye. I. Grigorenko, S. A. Pazura, V. I. Taran, L. F. Chernogor

We present some results of observations and simulation of the F region and topside ionosphere response to the 30—31 May 2003 severe geomagnetic storm (maximum index $K_p = 8$). Effects of well-pronounced negative ionosphere disturbance are revealed which are rarely observed in the midlatitude ionosphere concerning to the inner plasmasphere ($L = 2$ for Kharkov). They point to the convection of the midlatitude trough, light ion trough and hot zone together with the plasmapause up to the latitude of Kharkov. Our simulation and study of the effects of thermospheric disturbances as well as the thermal regime of neutral and charged components of the upper Earth's atmosphere showed their significant changes during the storm. The observations are carried out with the Kharkov incoherent scatter radar.

УДК 537.591.15

І. І. Залюбовський, В. М. Карташев, В. Е. Ковтун,
А. В. Лебедев, О. К. Минко, Е. С. Шматко

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

Собственное электрическое поле избыточного заряда электронно-фотонных ливней и метод его детектирования на больших расстояниях

Надійшла до редакції 27.09.04

Зроблено короткий тематичний огляд наукових досліджень, що проводяться в галузі фізики космічних променів в Харківському національному університеті ім. В. Н. Каразіна з середини 1960-х рр. Методом математичного моделювання вирішено задачу про формування в точці спостереження імпульсу електричного поля рівномірно і релятивістськи рухомим надмірним негативним зарядом електронно-фотонної зливи, що розвивається в повітрі або галіті. Проведено математичне моделювання процесу реєстрації електричного поля приймальними пристроями. Показано, що власне електричне поле електронно-фотонної зливи надвисокої енергії може служити альтернативним об'єктом детектування в реальному експерименті.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования физики космических лучей в Харьковском национальном университете развиваются с 1965 г. Они начались с экспериментального обнаружения эффекта когерентного радиоизлучения широких атмосферных ливней [4, 5], теоретически предсказанного Г. А. Аскаряном [2, 3]. Дальнейшее изучение этого эффекта как самостоятельно, так и совместно с Московским государственным университетом помогло харьковским исследователям освоить экспериментальные ядерно-физические методы физики космических лучей и дополнить их радиофизическими методами, ранее в ней практически не применявшимися [6, 11, 12, 32, 37]. На основе этих двух важнейших методов расширились возможности решения новых задач.

Путем использования метода детектирования атмосферных ливней, приходящих под большими зенитными углами, был исследован энергетический спектр атмосферных мюонов в интервале энергий 0.1—30 ТэВ [8—10]. Полученные результаты были новыми и расширили знания о рождении и взаимодействии атмосферных мюонов в области сверхвысоких энергий.

Знание традиционных радиофизических методов позволило направить исследования в область физики солнечно-земных связей. Объектом исследования были выбраны крупномасштабные солнечно-земные физические процессы, начинающиеся на Солнце, продолжающиеся в гелиосфере и магнитосфере и заканчивающиеся триггерными высыпаниями заряженных частиц из внутреннего радиационного пояса в атмосферу Земли. Полученные данные стали основой для создания физической модели развития солнечно-земных триггерных процессов, которая еще проверяется и уточняется в современных исследованиях [1, 7, 15—19, 22, 24, 27, 33, 34].

Накопленные данные о рождении и развитии ливней заряженных частиц сверхвысоких энергий позволили трансформировать исследования в сферу поиска новых методов их детектирования. А затем ставить задачи о регистрации γ -квантов и нейтрино сверхвысоких энергий, которые рождаются в окрестности локальных галактических объектов, таких как Сверхновые и пульсары, а в атмосфере в веществе Земли образуют электронно-фотонные ливни. В стадии разработки находится направленный метод регистрации γ -квантов сверхвысоких энергий с использованием высокочастотного радио-

излучения широких атмосферных ливней [28] и радиоголографический метод детектирования сверхэнергичных космических заряженных частиц [29]. Практически завершена разработка магнитоиндукционного метода регистрации электронно-фотонных ливней, который можно использовать для детектирования космических частиц и нейтрино сверхвысоких энергий в атмосферном воздухе и больших толщах природных конденсированных диэлектрических сред, таких как пресная вода, лед и галит [21, 26, 35].

В настоящей работе рассматривается задача о формировании импульса электрического поля равномерно и релятивистски движущимся избыточным отрицательным зарядом электронно-фотонного ливня, развивающегося в атмосферном воздухе или галите (NaCl), а также проводится математическое моделирование процесса его регистрации приемными устройствами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Электронно-фотонный ливень развивается в процессах тормозного излучения электронов (позитронов) и образования электронно-позитронных пар тормозными γ -квантами. Эти процессы оставляют ливень электрически нейтральным, следовательно, он не должен обладать собственными электрическими и магнитными полями. В работе [2] Г. А. Аскарьян указал, что в результате аннигиляции позитронов на лету и вовлечения комптоновских и β -электронов в ливневую лавину в электронно-фотонных ливнях возникает избыточный отрицательный заряд. Дальнейшие исследования подтвердили этот вывод. Ситуация кардинально изменилась, и появилась возможность детектирования ливня не только традиционными методами, регистрируя энерговыделение заряженных частиц за счет ионизации или интенсивность их оптического черенковского излучения в прозрачных средах, но и путем фиксации быстрых изменений его собственных электрического или магнитного полей в точке наблюдения.

Дифференциальный энергетический спектр относительного электронного избытка в электронно-фотонном ливне приближенно может быть представлен как $s(x)F_{ex}(E)$. Здесь $s(x)$ — возрастной параметр ливня, зависящий от глубины x его развития (см. ниже) и $F_{ex}(E)$ — собственно энергетический спектр относительного избытка электронов при $s = 1$ [35]. На рис. 1 показан дифференциальный энергетический спектр относительно избытка электронов в максимуме развития ливня ($s = 1$) в воздухе и галите, который взят из работы [35]. Численные

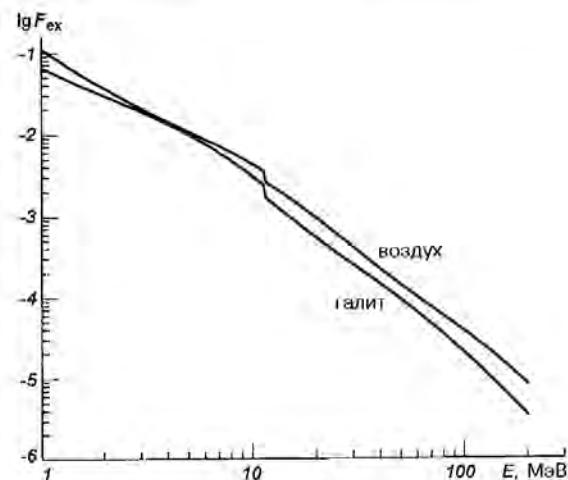


Рис. 1. Дифференциальные энергетические спектры относительного избытка ливневых электронов в воздухе и галите. Интегральный относительный избыток электронов с кинетической энергией $E \geq 1$ МэВ равен соответственно 20 % и 15 % в максимуме развития ливней

значения этих спектров будут использованы в дальнейших вычислениях.

Электронно-фотонный ливень представляет собой релятивистский сжатый тонкий азимутально-симметричный диск, состоящий из релятивистских электронов, позитронов и γ -квантов, который движется в среде практически со скоростью света в вакууме. Число частиц и γ -квантов в нем непрерывно изменяется по мере увеличения толщины x пройденного вещества. Зависимость полного числа заряженных частиц от толщины x (каскадная кривая) описывается аппроксимацией Грейзена трехмерной структурной функции Нишимуры и Каматы [13]:

$$N(x) = \frac{0.31}{\sqrt{\ln(E_0/E_{cr})}} \exp\left[\frac{x}{x_0}(1 - 1.5\ln s)\right], \quad (1)$$

$$s = 3x/x_0 + 2x_0 \ln(E_0/E_{cr}).$$

Здесь $x \geq 0$ — текущая толщина вещества, s — возрастной параметр, x_0 — радиационная длина для электронов, позитронов и γ -квантов в веществе, в котором развивается ливень (в воздухе $x_0 = 37.1 \text{ г}/\text{см}^2$, в галите $x_0 = 22.2 \text{ г}/\text{см}^2$); E_{cr} — критическая энергия, при которой средние потери энергии электронов на ионизацию и на тормозное излучение равны (в воздухе $E_{cr} = 81 \text{ МэВ}$, в галите $E_{cr} = 36.2 \text{ МэВ}$); E_0 — первичная энергия электрона либо γ -кванта, образовавшего ливень ($E_0 \gg E_{cr}$). Полное число частиц $N(x)$ достигает максимума, когда $s = 1$, а $x = x_{\max} = x_0 \ln(E_0/E_{cr})$:

$$N(x_{\max}) = N_{\max} = \frac{0.31}{\sqrt{\ln(E_0/E_{cr})}} \cdot \frac{E_0}{E_{cr}}. \quad (2)$$

Радиальное относительно оси ливня распределение плотности числа заряженных частиц в ливневом диске (число частиц, отнесенное к единичной площадке) также принято описывать аппроксимацией Грейзена [13]

$$\rho(r, x) = \frac{0.443 s^2 (1.9 - s)}{2\pi r_m^2} \left(\frac{r}{r_m} \right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_m} \right)^{s-4.5} N(x), \quad (3)$$

в которой R — текущее расстояние частиц от оси ливня, $r_m = E_s x_0 / (E_{cr} \rho_{sub})$ — радиус Мольер, $E_s = 21$ МэВ, ρ_{sub} — плотность вещества (плотность воздуха на уровне моря при нормальных условиях $\rho_{air} = 1.225 \cdot 10^{-3}$ г/см³, плотность галита $\rho_{NaCl} = 2.165$ г/см³), $r_m = 78.9$ м для воздуха на уровне моря и $r_m = 5.95$ см для галита.

Электронно-фотонный ливень с энергией выше 100 ТэВ, развивающийся в атмосферном воздухе, называется широким атмосферным ливнем. Он имеет особенности своего развития, связанные с тем, что первичными частицами для него в подавляющем большинстве случаев являются космические протоны или ядра. В первых ядерных взаимодействиях они дают начало ядерно-каскадному процессу, в котором в каждом первом и последующих взаимодействиях сохраняются первичные частицы, унося в среднем половину своей энергии, и происходит множественное каскадное рождение π^- , π^+ - и π^0 -мезонов. Каждый из π^0 -мезонов очень быстро распадается на два γ -кванта, которые дают начало парциальным электронно-фотонным ливням. Поэтому широкий атмосферный ливень (ШАЛ) представляет собой суперпозицию парциальных ливней и подпитывается ядерно-каскадным процессом почти на протяжении всего пути своего развития и затухания. По этой причине его каскадная кривая и число частиц в максимуме не могут быть рассчитаны по формулам (1, 2). Для уровня моря экспериментальным путем была найдена связь полного числа частиц с энергией первичной частицы ШАЛ [20]:

$$E_0 = (7.7 \pm 2.5) \cdot 10^{17} \left(\frac{N}{10^8} \right)^{0.86 \pm 0.06}, \quad (4)$$

в которой E_0 вычисляется в эВ, а $N \geq 10^8$.

Радиальное распределение плотности числа заряженных частиц ШАЛ описывается с использованием двух возрастных параметров s . На периферии распределения возрастной параметр изменяется с

толщиной x пройденного пути так же, как и для электронно-фотонного ливня (см. формулу (1)). На малых и средних расстояниях s остается близким к единице в широком интервале x из-за непрерывного обновления частиц за счет ядерно-каскадного процесса. Поэтому радиальную плотность числа частиц ШАЛ описывают видоизмененной аппроксимацией Грейзена, которая для энергии $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ ($N \geq 10^9$) и уровня моря имеет вид [20]:

$$\rho(r) = \frac{1.6}{2\pi r_m^2} \left(\frac{r}{r_m} \right)^{-1} \left(1 + \frac{r}{r_m} \right)^{-2.6} N. \quad (5)$$

СОБСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ШАЛ

Продольный релятивистский ток избыточных электронов ШАЛ создает в воздухе на уровне моря, на расстоянии R от его оси напряженность электрического поля, которая выражается интегралом

$$\tilde{E}_t(t, R) = 3 \cdot 10^4 \int_{E_{min}}^{E_0} dE \int_0^\infty dr \int_0^{2\pi} F_{ev}(E) \rho(r) \times \tilde{E}_s(t, R) \cos \alpha d\varphi_r, \quad (6)$$

$$\tilde{E}_s(t, R) = \frac{e(1 - \beta^2)}{\varepsilon_{air} L^2 (1 - \beta^2 \sin^2 \theta)^{3/2}},$$

$$\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{mc^2}{E + mc^2} \right)^2},$$

$$\sin \theta = \sqrt{1 - [\beta c(t - \tau)/L]^2},$$

$$L = \sqrt{R^2 + r^2 - 2rR \cos \varphi_r + [\beta c(t - \tau)]^2},$$

$$\tau = \frac{n_{air}}{c} \sqrt{R^2 + r^2 - 2rR \cos \varphi_r}.$$

Здесь $\tilde{E}_s(t, R)$ — напряженность электрического поля равномерно движущегося электрона в воздухе [30], e — заряд электрона, β — отношение скорости частицы к скорости света в вакууме, mc^2 и E — соответственно энергия покоя и кинетическая энергия электрона, θ — угол между направлением скорости частицы и направлением ее электрического поля [35], $\varepsilon_{air} \approx 1$ — диэлектрическая проницаемость воздуха, L — расстояние от точки наблюдения до ливневого электрона в момент времени t [35], φ_r — азимутальный угол радиуса-вектора ливневого электрона, τ — время распространения в среде электрического поля от ливневого электрона до точки наблюдения, совпавшей с плоскостью ливневого диска [35], $n_{air} = \sqrt{\varepsilon_{air}} \approx 1$, $\cos \alpha = (R - r \cos \varphi_r)/L$ —

проектирующий косинус, в котором угол α отсчитывается между вектором напряженности электрического поля ливневого электрона и радиусом-вектором, направленным в плоскости ливневого диска от его оси до точки наблюдения. $E_{\min} = 1$ МэВ. Функции $F_{ex}(E)$ и $\rho(r)$ (см. [35] и формулу (5)) определены ранее. Коэффициент $3 \cdot 10^4$ осуществляется переход к системе единиц СИ, поэтому $E(t, R)$ выражается в единицах В/м.

СОБСТВЕННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННОГО ЛИВНЯ В ГАЛИТЕ

В конденсированных плотных средах, таких как галит, длина развития и деградации ливня исчисляется несколькими метрами, поэтому вычисление напряженности поля отнесено к точке наблюдения, через которую проходит плоскость ливневого диска в максимуме своего развития. По этой же причине в точке наблюдения, находящейся на большом расстоянии от оси ливня, временной профиль импульса поля формируется не столько за счет релятивистских эффектов, сколько зависимостью каскадной кривой от времени. Поэтому начиная с некоторого расстояния форма импульса поля перестает видоизменяться и приблизительно повторяет временной профиль каскадной кривой. С учетом изложенного изменяется подынтегральное выражение в (6), куда сомножителем дополнительно вводится возрастной параметр $s(x)$, ε_{air} и n_{air} заменяются на $\varepsilon_{NaCl} = 5.6$ и $n_{NaCl} = 2.3664$ в области радиочастот, плотность числа частиц $\rho(r)$ заменяется на $\rho(r, x)$ согласно (3), а $x \rightarrow x'$ и представляется функцией текущего времени t :

$$x' = \left(\frac{x_0}{\rho_{NaCl}} \right) \ln \left(\frac{E_0}{E_\sigma} \right) + \beta c(t - \tau).$$

В результате для вычисления электрического поля в галите получаем несколько иной интеграл:

$$\tilde{E}(t, R) = 3 \cdot 10^4 \int_{E_{\min}}^{E_0} dE \int_0^\infty r dr \int_0^{2\pi} s(t) F_{ex}(E) \times \\ \times \rho(r) \tilde{E}(t, R) \cos \alpha d\phi, \quad (7)$$

в котором исходной для $\rho(r, t)$ служит формула (3). Следует заметить, что поле (7) не лежит в плоскости ливневого диска, а составляет с нею угол 65° . На рис. 2, а и 3, а показаны результаты расчетов по формулам (6) и (7) напряженности собственного электрического поля ШАЛ и ливня в галите.

ТЕХНИКА РЕГИСТРАЦИИ

Детектирование собственного электрического поля электронно-фотонных ливней в галите и ШАЛ в воздухе наиболее эффективно осуществлять с помощью линейных вибраторных антенн с широкой полосой пропускания. Последняя необходима для формирования достаточно короткого выходного импульса напряжения на клеммах антенны. Вибратор должен обладать также минимальной геометрической длиной при прочих равных условиях, так как импульс напряжения на его клеммах возникает после прохождения электрического поля вдоль оси его обоих плеч. На наш взгляд, такой антенной может быть широкополосный одинарный квадрат, который можно представить как два синфазных полуволновых вибратора, находящихся на расстоянии $\lambda_0/4$ друг от друга (λ_0 — резонансная длина волны в вакууме). Действующая длина одинарного квадрата $l_a = 2\lambda_0/\pi$, а входное сопротивление $R_{in} = 120$ Ом. Выбор резонансной (рабочей) частоты одинарного квадрата $f_0 = c/\lambda_0$ осуществляется в пределах спектрального распределения импульсов напряженности электрического поля ливней на больших расстояниях. В принципе оптимизация рабочей частоты с целью получения импульсов напряжения с максимальной амплитудой и минимальной длительностью невозможна. Причина в том, что максимальные амплитуды спектральных составляющих соответствуют низким частотам, для которых, во-первых, габариты одинарного квадрата становятся слишком большими и, во-вторых, нельзя обеспечить достаточно широкую его полосу пропускания. На рис. 2, б и 3, б приведены спектральные распределения импульсов напряженности электрического поля, изображенных на рис. 2, а и 3, а. Опираясь на результаты расчетов спектральных распределений напряженности электрического поля, можно привести возможные параметры одинарных квадратов. Для регистрации ШАЛ: $f_0 = 2$ МГц, $2\Delta f/f_0 = 0.5$ — относительная полоса пропускания, сторона квадрата между осями вибраторов $l_0 = 38$ м, диаметр вибратора $d = 4.8$ м. Для регистрации ливней в галите: $f_0 = 50$ МГц, $2\Delta f/f_0 = 0.5$, диаметр вибратора $d = 0.19$ м, сторона квадрата между осями вибраторов $l_0 = 1.52$ м. Структурные схемы радиочастотных трактов представлены на рис. 4. Размеры одинарного квадрата в галите приведены для случая, когда он помещен во внутреннюю воздушную полость. Электрическое поле в воздушной полости по сравнению с полем в галите (см. (7)) больше в $\varepsilon_{NaCl} = 5.6$ раза, так как в ней практически нет влияния поляризации среды. В

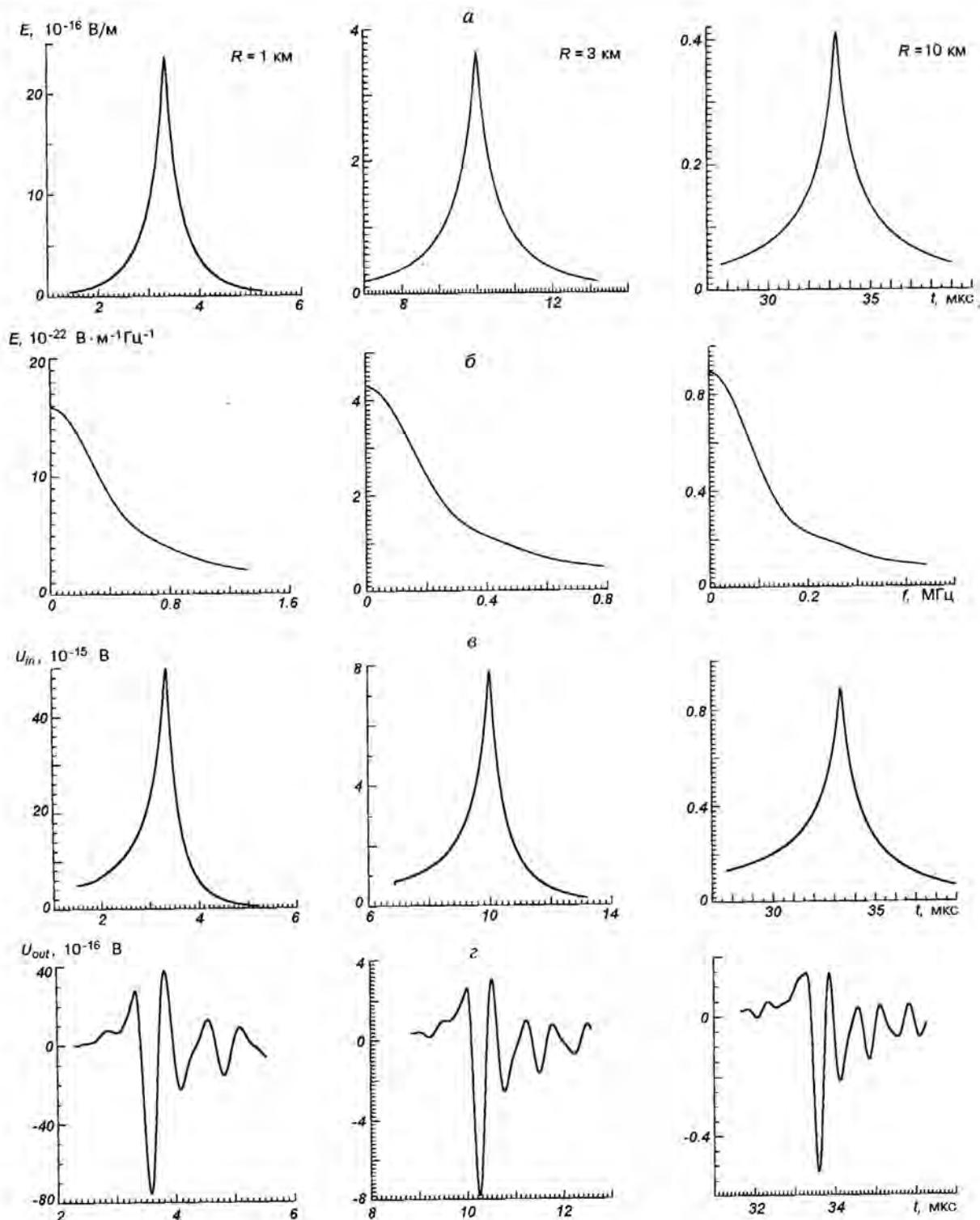


Рис. 2. Напряженность электрического поля на одну частицу ПАЛ, модуль спектрального распределения импульсов напряженности электрического поля ПАЛ, входные и выходные импульсы напряжения на клеммах одинарного квадрата, рассчитанные на одну частицу ПАЛ

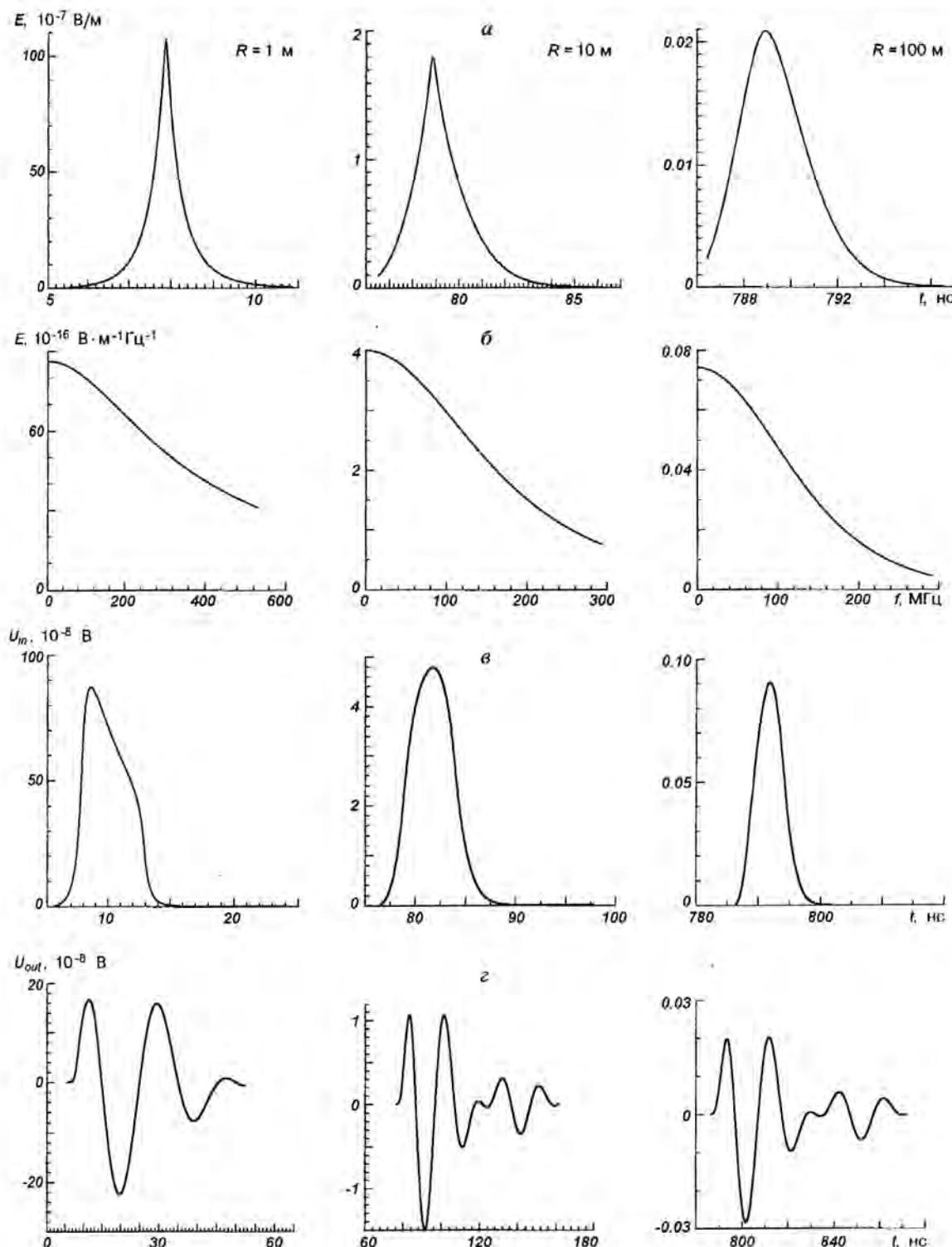


Рис. 3. Напряженность электрического поля электронно-фотонного ливня с энергией $E_0 = 10^8$ МэВ в галите, модуль спектрального распределения импульсов напряженности, входные и выходные импульсы напряжения на клеммах одинарного квадрата. Предполагается, что антенна вмонтирована в галит без воздушного промежутка.

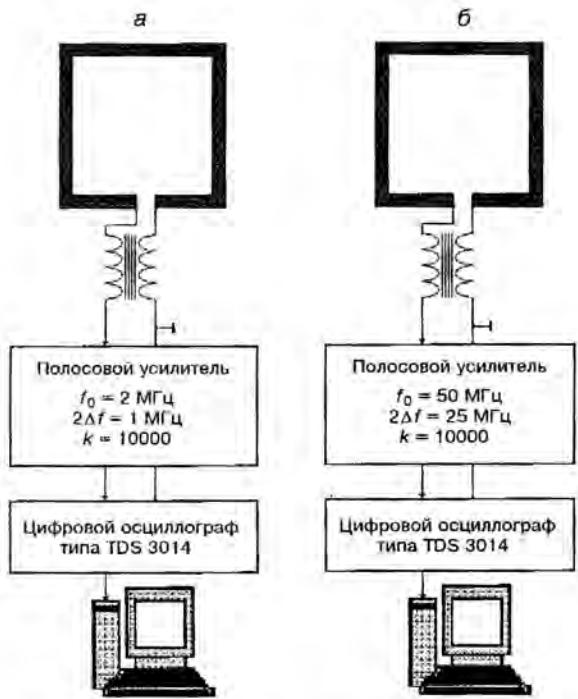


Рис. 4. Структурные схемы радиочастотных трактов для регистрации собственной напряженности электрического поля ливней:
а — для ШАЛ, б — для ливней в галите

том случае, когда эта антенна вмонтирована в галит без воздушного промежутка, ее габариты уменьшаются в $n_{\text{NaCl}} = 2.3664$ раза вследствие сокращения резонансной длины волны, и составят $l_0 = 0.64$ м, $d = 0.08$ м. Резонансная частота при этом изменяться не будет.

Антенны, имеющие входное сопротивление $R_{in} \approx 120$ Ом, соединены с усилителями через широкополосные симметрирующие трансформаторы Рутрофа [36] с волновым сопротивлением 120 Ом. Усилители вместе с трансформаторами должны крепиться непосредственно на одинарных квадратах. Амплитудное детектирование сигналов не предусматривается. В реальном эксперименте возможно его введение в целях борьбы с помехами от радиовещательных станций, так как в этом случае удобно применить фильтрацию полезных импульсов на фоне амплитудной модуляции звуковой частоты. Выходной сигнал по линии передачи поступает на окончательную регистрацию, где происходит запись информации на жесткий диск компьютера.

Диаграмма направленности вибраторных антенн пропорциональна косинусу пространственного угла (в расчетах он полагается равным нулю) между

осью вибратора и направлением электрического поля ливня. Максимум чувствительности совпадает с направлением оси вибратора, в отличие от случая приема радиоволн, при котором он сдвинут на угол $\pi/2$ и лежит в перпендикулярной плоскости.

входной и выходной импульсы напряжения на клеммах антennы

Импульс напряженности электрического поля ливня, прежде чем вызвать ток в вибраторе и выделяться на его клеммах в виде импульса напряжения, должен пройти по его длине. Этот процесс описывается сверткой напряженности электрического поля $E(t, R)$ с элементом действующей длины двойного вибратора $I_a dt / t_0$, где $I_a = 2\lambda_0/\pi$ — его действующая длина, $t_0 = l_0/c$ — время прохождения полем его геометрической (резонансной) длины l_0 . $\lambda_0 = c/f_0$. На относительно малых, сравнимых с длиной вибратора расстояниях следует учитывать изменение напряженности электрического поля как $E(t, R) \propto R^{-2}$. Таким образом, входной импульс напряжения равен

$$U_{in}(t, R) = \frac{2R^2}{\pi I_a f_0 t^2} \int_{t-t_0}^t E[(t-t'), R] dt', \quad (8)$$

в котором $t' \leq t$. В среде галита длина волны $\lambda'_0 = \lambda_0/n_{\text{NaCl}}$, длина вибратора $I'_0 = l_0/n_{\text{NaCl}}$, и фазовая скорость распространения электрического поля $c' = c/n_{\text{NaCl}}$, поэтому коэффициент перед интегралом (8) не изменяется, если резонансная длина вибратора l_0 определена в воздухе. На рис. 2, в и 3, в показаны входные импульсы напряжения на клеммах антенн, вызванные ШАЛ и электронно-фотонным ливнем в галите.

Входной импульс напряжения, прежде чем появиться на клеммах антенн как выходной импульс, должен пройти через ее резонансный колебательный контур. Математическое моделирование этого процесса состоит в вычислении свертки входного импульса $U_{in}(t, R)$ с импульсной характеристикой резонансного колебательного контура антennы $h(t)$

$$U_{out}(t, R) = \int_0^t U_{in}(t', R) \cdot h(t - t') dt'. \quad (9)$$

$$h(t) = \frac{\sin[\pi(f_{+1} - f_{-1})t]}{t} \cos[\pi(f_{+1} + f_{-1})t],$$

Здесь f_{-1} и f_{+1} — соответственно нижняя и верхняя частоты среза частотной характеристики антennы

В рамках структурной схемы, изображенной на рис. 4, $f_{-1} = 1.5$ МГц, и $f_{+1} = 2.5$ МГц (вариант а) и $f_{-1} = 37.5$ МГц, и $f_{+1} = 62.5$ МГц (вариант б). Результат вычисления свертки (9) показан на рис. 2, г и 3, г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде всего следует заметить, что обозрение расчетных выходных данных, показанных на рис. 2, г и 3, г, не дает повода для большого оптимизма. Тем не менее, предлагаемый метод детектирования ливней в воздухе и галите в области сверхвысоких энергий может оказаться весьма полезным.

Детектирование широких атмосферных ливней. На частоте 2 МГц уровень атмосферных помех в течение суток в случае приема полуволновым вибратором изменяется от 1 мкВ/МГц до 20 мВ/МГц [14]. Это значит, что регистрация ШАЛ возможна только после прохождения утреннего и до наступления вечернего терминаторов, так как средние волны в дневное время испытывают сильное поглощение в D-слое при отражении от E-слоя ионосферы, и сигналы помех и радиостанций распространяются только в зоне прямой видимости. Исключением являются высокие широты в зимние месяцы, для которых характерно слабое поглощение ионосферных волн в дневные часы. Устанавливая порог детектирования по напряжению на клеммах одинарного квадрата 7 мкВ, приведем данные о ШАЛ, которые можно зарегистрировать на больших расстояниях от оси (таблица).

Полное число N частиц на уровне моря, энергия E_0 и максимальное расстояние R от оси ШАЛ при их детектировании по собственному электрическому полю

N	$E_0, \text{ эВ}$	$R, \text{ м}$
10^8	$7.7 \cdot 10^{17}$	300
10^9	$5.6 \cdot 10^{18}$	1000
10^{10}	$4 \cdot 10^{19}$	3000
$3 \cdot 10^{10}$	10^{20}	5000

Ясно, что обсуждаемый метод может быть применен только на действующих экспериментальных установках ШАЛ, таких как Якутская (Российская Федерация) и AGASA (Япония) или на строящихся: ШАЛ-1000 (Российская Федерация), Pierre Auger (США, Аргентина). Цель использования этого ме-

тода — альтернативное измерение полного числа частиц ШАЛ. Оно основывается на пропорциональности амплитуды регистрируемого сигнала числу частиц ШАЛ и обратной ее пропорциональности квадрату расстояния от оси. Появляется независимый дополнительный метод измерения полного числа частиц ШАЛ, который легко реализовать в установках, где определяются координаты следа его оси в плоскости расположения ионизационных детекторов и ее угловые координаты, то есть зенитный и азимутальный углы. В тех случаях, когда ось ливня проходит за пределами расположения экспериментальной установки, и ее координаты с достаточной точностью не определяются, метод позволяет найти расстояние до оси ШАЛ по запаздыванию регистрируемого импульса собственного электрического поля относительно момента времени детектирования частиц. Надо сказать, что антенна, регистрирующая поле ШАЛ, будет регистрировать и его когерентное радиоизлучение (обзор механизмов радиоизлучения ШАЛ можно найти в монографии [31]). Однако регистрируемые импульсы радиоизлучения и импульсы от собственного электрического поля будут разделены во времени и каждый из них будет содержать информацию о ШАЛ.

Детектирование электронно-фотонных ливней в галите. Ливни в галите вызываются атмосферными мюонами и космическими нейтрино сверхвысоких энергий. Месторождения галита расположены под достаточно толстыми слоями почвы. Уровень космических, атмосферных и антропогенных помех в них достаточно низок, следовательно, регистрация собственного электрического поля ливня будет происходить в благоприятных фоновых условиях. Энергетический порог детектирования ливней — не ниже 10^{15} эВ. Поскольку детектирование ливней в галите ионизационными детекторами практически невозможно, а глубина их зарождения и направление их развития произвольны, то датчики собственного электрического поля должны быть собраны в вертикальные гирлянды. Расстояние между датчиками в гирлянде несколько больше или порядка размеров датчика, а расстояние между гирляндами определяется заданной пороговой энергией детектирования ливней. Датчики в гирлянде располагаются в трех взаимно-перпендикулярных плоскостях для определения угловых координат осей ливней и полной напряженности электрического поля (или напряжения на клеммах антенны), а сигналы должны появиться по крайней мере в двух гирляндах. В таком случае по амплитудам сигналов и их относительному запаздыванию становится возможным определение угловых и пространственных координат осей ливней и полного

числа частиц в них. В Закарпатской области Украины расположено Солотвинское массивное месторождение галита, в толще которого сооружена низкофоновая лаборатория Института ядерных исследований НАН Украины [25]. Это один из наиболее перспективных солевых рудников на Земле, в котором можно проводить исследование энергетических спектров атмосферных мюонов и космических нейтрино сверхвысоких энергий. Сам солевой рудник выполняет функцию гигантской мишени для их электромагнитных и электрослабых взаимодействий.

Антенны, собранные в гирлянды, помимо собственных электрических полей ливней будут регистрировать когерентное черенковское радиоизлучение их электронного избытка, а также когерентное радиоизлучение изменяющегося во времени избыточного электронного тока частиц. Импульсы радиоизлучения и электрического поля имеют разные геометрические условия регистрации в пространстве, они разделены во времени и имеют различные оптимальные спектральные диапазоны. Более детальной информацией об этих излучениях авторы не владеют, так как аналогичные изложенным здесь расчеты для этих механизмов радиоизлучения в галите не проводились.

Настоящая статья является расширенным вариантом доклада, прочитанного на международной научной конференции «Каразинские естественно-научные студии» (14–16 июня 2004 г., Харьков, Украина), посвященной 200-летию основания Харьковского императорского университета [23].

1. Абросимов А. Т., Гусев А. А., Дудник А. В. и др. Динамика захваченных частиц и спорадического радиоизлучения Земли после вспышки 20 ноября 1986 г. // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1991.—55, № 10.—С. 1915—1919.
2. Аскарьян Г. А. Избыточный отрицательный заряд электронно-фотонного ливня и когерентное излучение от него // Журн. эксперим. и теор. физ.—1961.—41, № 2.—С. 616—618.
3. Аскарьян Г. А. Когерентное радиоизлучение от космических ливней в воздухе и плотных средах // Журн. эксперим. и теор. физ.—1965.—1, № 1.—С. 9—15.
4. Боршковский И. А., Воловик В. Д., Кобизской В. И. и др. Измерение поляризации когерентного радиоизлучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) // Письма в Журн. эксперим. и теор. физ.—1966.—3.—С. 186.
5. Боршковский И. А., Воловик В. Д., Шматко Е. С. Измерение когерентного радиоизлучения широких атмосферных ливней // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1966.—30, № 10.—С. 1705.
6. Вернов С. Н., Христиансен Г. Б., Залюбовский И. И. и др. Наблюдение радиоизлучения широких атмосферных ливней // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1968.—32.—С. 467—469.
7. Власенко В. П., Залюбовский И. И., Карташев В. М. и др. Перспективы исследования солнечно-земных связей // Космічна наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 7—19.

8. Воловик В. Д., Залюбовский И. И., Иванов А. Д. и др. Установка для изучения горизонтальных атмосферных ливней. Первые результаты // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1973.—37, № 7.—С. 1421—1426.
9. Воловик В. Д., Залюбовский И. И., Иванов А. Д. и др. Энергетический спектр μ -мезонов и атмосферные ливни под большими зенитными углами // Письма в Журн. эксперим. и теор. физ.—1976.—24, вып. 7.—С. 443—446.
10. Воловик В. Д., Залюбовский И. И., Иванов А. Д. и др. Расширенная установка для регистрации горизонтальных атмосферных ливней // Приборы и техника эксперимента.—1977.—№ 2.—С. 45—48.
11. Воловик В. Д., Залюбовский И. И., Левченко В. Н. и др. Спектральное распределение радиоизлучения ШАЛ // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1974.—38.—С. 1013—1016.
12. Воловик В. Д., Залюбовский И. И., Шматко Е. С. Особенности спектрального распределения радиоизлучения широких атмосферных ливней // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1976.—40.—С. 1026—1032.
13. Грейзен К. Широкие атмосферные ливни // Физика космических лучей / Под ред. Дж. Вильсона. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958.—Т. 3.—С. 7—141.
14. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. — М.: Связь, 1965.—400 с.
15. Дудник А. В., Залюбовский И. И., Карташев В. М. и др. Высокоскоростной поток солнечного ветра, зарегистрированный в средних широтах 1—3 апреля 1985 г. по околоземному спорадическому радиоизлучению // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1988.—52, № 12.—С. 2457—2459.
16. Дудник А. В., Карташев В. М., Лазарев А. В. и др. Спорадические радиовсплески как проявление солнечной активности в околоземном космическом пространстве // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1982.—51, № 10.—С. 1839—1841.
17. Дудник А. В., Карташев В. М., Лазарев А. В. и др. Суточный ход спорадического радиоизлучения околоземного космического пространства // Геомагнетизм и аэрономия.—1988.—28, № 5.—С. 733—737.
18. Дудник А. В., Карташев В. М., Лазарев А. В. и др. О механизме околоземного спорадического радиоизлучения, вызванного космическими лучами солнечных изолированных вспышек // Проблемы ядерной физ. и космич. лучей.—1989.—Вып. 31.—С. 9—13.
19. Дудник А. В., Карташев В. М., Лазарев А. В. и др. Околоземное спорадическое радиоизлучение, вызванное космическими лучами изолированных солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэрономия.—1990.—30, № 1.—С. 132—134.
20. Дьяконов М. Н., Егоров Т. А., Ефимов Н. Н. и др. Космическое излучение предельно высокой энергии. — Новосибирск: Наука, 1991.—251 с.
21. Залюбовский И. И., Карташев В. М., Ковтун В. Е. и др. Магнитоиндукционный эффект электронно-фотонных ливней, развивающихся в больших толщах льда // Радиофизика и радиоастрономия.—2002.—7, № 3.—С. 254—264.
22. Залюбовский И. И., Карташев В. М., Ковтун В. Е. и др. Всплески потока быстрых нейтронов на поверхности Земли как завершение процесса высapsulation энергичных протонов из зон захваченной радиации // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 106—110.
23. Залюбовський І. І., Карташев В. М., Ковтун В. С. та інш. Новий метод детектування електронно-фотонних злив, які розвиваються в природних конденсованих діелектричних середовищах // Каразінські природознавчі студії: Матеріальні науко-техн. конф. 14–16 червня 2004 р., Харків. — Харків: Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, 2004.—С. 49.—(Секція 1. «Фізика та астрономія». Підсекція «Прикладна фізика»).

24. Залюбовский И. И., Карташев В. М., Шматко Е. С. Установка для исследования спорадического радиоизлучения ионосферы Земли // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1982.—46, № 9.—С. 1749—1751.
25. Здесенко Ю. Г., Крашивянский Б. Н., Куц В. Н. и др. Изучение фонов сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов в подземной низкофоновой лаборатории ИЯИ АН УССР.—Киев, 1985.—(Препринт КИЯИ—85—28).
26. Карташев В. М., Ковтун В. Е., Шматко Е. С. Магнитоиндукционный метод детектирования широких атмосферных ливней предельно высоких энергий // Радиофизика и радиоастрономия.—1999.—4, № 1.—С. 61—68.
27. Карташев В. М., Лазарен А. В., Сорока Д. В. и др. Всплески синхротронного радиоизлучения электронов, высывающихся из внутреннего радиационного пояса Земли // Радиофизика и радиоастрономия.—1997.—2, № 2.—С. 165—174.
28. Карташев В. М., Шматко Е. С. Метод наблюдения космических гамма-квантов сверхвысоких энергий посредством регистрации импульсов когерентного радиоизлучения широких атмосферных ливней // Радиофизика и радиоастрономия.—1997.—2, № 2.—С. 165—174.
29. Карташев В. М., Шматко Е. С. Радиоголографический метод определения ядерного состава потока первичных космических частиц сверхвысоких энергий // Радиофизика и радиоастрономия.—1998.—3, № 3.—С. 299—311.
30. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. — М: Наука, 1988.—510 с.
31. Филоненко А. Д. Радиоэмиссия каскадных ливней и детектирование космических лучей сверхвысоких энергий. — Луганск: Изд-во Восточноукраинского нац. ун-та им. В. Даля, 2002.—280 с.
32. Borshkovskiy I. A., Volovik V. D., Zalyubovskiy I. I., et al. On the pulse shape of the radio emission of extensive air showers // Acta phys. hung.—1970.—29, N 3.—P. 757—761.
33. Dudnik A. V., Zalyubovskiy I. I., Kartashov V. M., et al. Sporadic radio emission connected with a definite manifestation of Solar activity in the near Earth space // Proc. Int. Conf. Cosmic Rays, La Jolla.—1985.—5.—P. 538—541.
34. Dudnik A. V., Zalyubovskiy I. I., Kartashov V. M., et al. Near Earth space sporadic radio emission burst occurring during sunrise // Proc. Int. Conf. Cosmic Rays, La Jolla.—1985.—5.—P. 542—547.
35. Kartashov V. M., Kovtun V. E., Minko O. K., et al. Possibility to detect cosmic particles and neutrino of super-high energies in atmospheric air and condensed media using magnetoinductive method // Вісник Харк. ун-ту. Сер. Ядра, частинки, поля.—2004.—№ 628, вип. 2 (24).—С. 23—34.
36. Ruthroff C. L. Some broad-band transformers // Proc. IRE.—1959.—47.—P. 1337—1342.
37. Vernov S. N., Kristiansen G. B., Abrosimov A. T., et al. Detection of radio emission from extensive air showers with a system of single half-wave dipoles // Can. J. Phys.—1968.—46 S.—P. 241—242.

SELF-ELECTRIC FIELD OF THE ELECTRON-PHOTON SHOWER EXCESS CHARGE AND THE TECHNIQUE FOR ITS DETECTION AT LONG DISTANCES

*I. I. Zalyubovsky, V. M. Kartashov, V. E. Kovtun,
A. V. Lebedev, O. K. Minko, E. S. Shmatko*

The paper presents a brief topical survey on scientific researches carried out in cosmic ray physics since the 1960s at the V. N. Karazin Kharkiv National University. Based on a technique of mathematical simulation, we solved the problem on the generation of an electric field pulse in the point of an observation using an excess negative charge moving uniformly and relativistically in the electron-photon shower developed in the air or halite. The process of electric field detection with some detectors is simulated. It is illustrated that the self-electric field of the electron-photon shower of super-high energy can serve as an alternative object to be detected in a real experiment.

УДК 629.78+550.388.1

М. А. Леонов

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Національний антарктичний науковий центр МОН України, Київ

Особливості часової структури даних, отриманих в моменти інжекцій електронів в магнітосферному експерименті Г60С

Надійшла до редакції 16.12.05

Описується часова структура телеметричних даних у моменти інжекцій електронних пучків тривалості 0.6 с з максимальною енергією 6.3 кеВ та струмом 0.5 А у висотному ракетному магнітосферному експерименті Г60С. Основна їхня особливість — наявність стрибкоподібних змін та флюктуацій багатьох фізичних параметрів під час інжекцій (затримані флюктуації). На висотній ділянці траєкторії на висотах 300...1500 км стрибкоподібні зміни та флюктуації потоків електронів на лічильники Гейгера та потенціалу контейнера, з борту якого проводилася інжекція, проявлялися через час $\Delta T_1 = 0.05\ldots 0.5$ с від початку інжекції. Спостерігається антикореляція часу затримки ΔT з густинною нейтрального газу поблизу контейнера, а також кореляція ΔT_1 зі швидкістю руху контейнера поперек магнітного поля поблизу апогею.

Вступ

В роботах [1, 3–8, 11, 13, 15] описано висотний магнітосферний експеримент Г60С з інжекцією електронних пучків, проведений за допомогою ракети «Вертикаль» в районі Волгограда 18 вересня 1981 року з борту висотного контейнера, котрий в кінці активної ділянки польоту був відокремлений від ракетного двигуна. Під час експерименту інжектувалися квазіпрямокутні та трикутні імпульси з тривалістю близько 0.6 с та середнім періодом слідування 5.3 с (рис. 1). Максимальна енергія інжекції у прямокутному імпульсі становила 6.3 кеВ, а струм — 0.5 А.

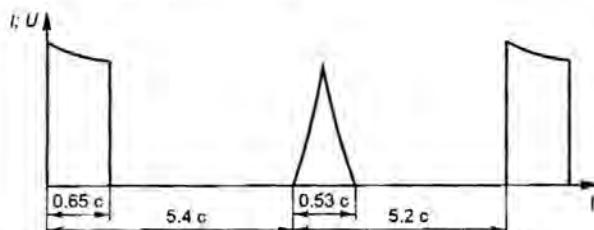


Рис. 1. Циклограмма інжекцій пучків електронів у ракетному експерименті Г60С

Експеримент Г60С залишається унікальним і досить багатима характеристиками [14]. Він вирізняється найбільшою з усіх ракетних експериментів висотою 1514 км. Тому характерний час перебування контейнера на силовій геомагнітній лінії був дуже великий порівняно з орбітальними апаратами. Траєкторія польоту була близька до прямовиснотої точки падіння знаходилась лише на 60 км на схід від точки старту. Верхня половина траєкторії була освітлена Сонцем, а нижня — знаходилась в тіні Землі (рис. 5). Велика висота зумовила широкий діапазон зміни характеристик навколошнього середовища.

Нижче будуть описані деякі особливості часової структури даних, отриманих трьома лічильниками Гейгера типу СБТ-9 та вимірювачами потенціалу контейнера під час інжекції електронних пучків.

ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОТОКІВ ЕЛЕКТРОНІВ ТА ПОТЕНЦІАЛУ КОНТЕЙНЕРА

Три лічильники Гейгера СБТ-9, обладнані коліматорами з полем зору діаметром 10° , були розташовані на відстані 0.75 м від поверхні контейнера

на відкидній штанзі (штанга G на рис. 2), орієнтований на північ (приблизно 15° в горизонтальній площині на захід від географічного меридіану). Лічильники СБТ-9 сформально реєструють електрони з енергіями вище $10\ldots30$ кеВ. Для нижчих енергій ефективність реєстрації зменшується на кілька порядків.

Потенціал контейнера вимірювався чотирма датчиками. На відкидній штанзі (рис. 2), орієнтованій на південь, були розташовані датчики P_2 , P_3 та P_4 . На протилежній штанзі G , орієнтованій на північ, був датчик P_1 . Всі дані потенціалу записувались на запам'ятовувальний пристрій. В роботі використано дані, отримані найбільш віддаленим датчиком P_4 , розташованим на відкидній штанзі на відстані 3.2 м від поверхні контейнера.

Лічильник G_R був направлений в горизонтально-му напрямку вздовж штанги G . Завдяки своїй орієнтації (рис. 2) він був здатний реєструвати не тільки електрони з близької зони інжекції, але й енергійні електрони радіаційного поясу, які рухаються з нижньої півсфери (після магнітного відбиття або атмосферного розсіювання) вгору по геомагнітній лінії.

Лічильники G_z і G_N були направлені відповідно в зеніт і надир та були здатні реєструвати інтенсивні потоки іоносферних (нейтралізуючих) електронів.

Таким чином, внаслідок просторової орієнтації сигнал горизонтального лічильника G_R повинен морфологічно відрізнятись від сигналів G_z і G_N . Лічильники G_z і G_N здатні реєструвати головним чином низькоенергетичні електрони, поведінка яких зумовлена процесами у «ближній» зоні інжекції, оскільки вони орієнтовані всередині конусу втрат. Сигнал же лічильника G_R може бути зумовлений сумою потоків часток як з «ближньої», так і «далньої» зони.

ОСОБЛИВОСТІ ДАНИХ ВІД ЛІЧИЛЬНИКІВ ГЕЙГЕРА ТА ПОТЕНЦІАЛУ КОНТЕЙНЕРА ПІД ЧАС ІНЖЕКЦІЙ

В ході експерименту Г60С лічба від лічильників G_z і G_N спостерігалась винятково лише під час інжекцій. Швидкість лічби не перевищувала $2000\ldots2500$ с^{-1} , що відповідало потокам часток $(5\ldots6) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. У паузах між інжекціями лічильники мовчали протягом майже всього часу експерименту.

Основна особливість даних під час інжекції — це наявність стрибкоподібної зміни та появи флюктуацій багатьох фізичних параметрів через час $\Delta T_1 = 50\ldots500$ мс після початку інжекції. Час інжекцій

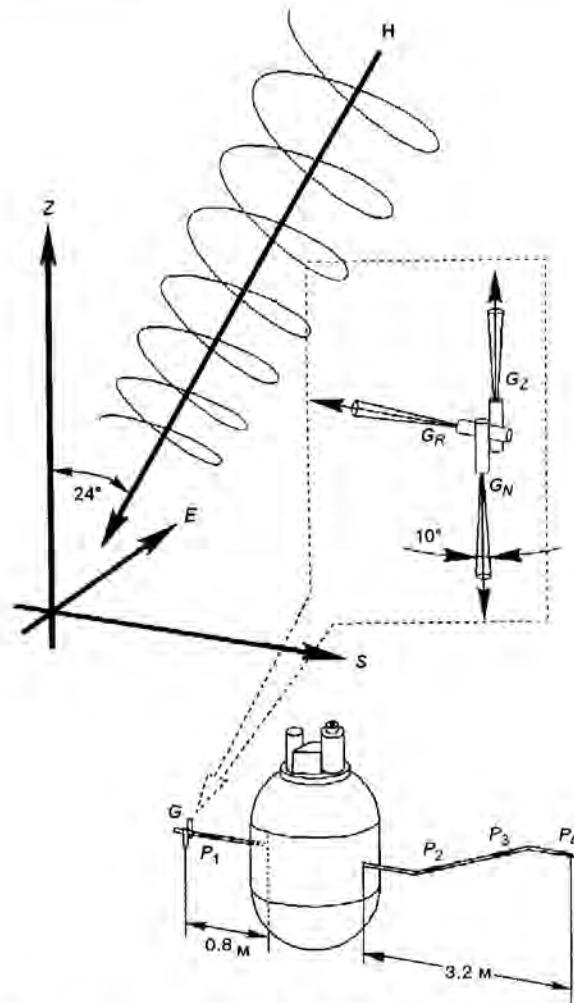


Рис. 2. Просторова орієнтація лічильників Гейгера G_R , G_z і G_N та датчиків потенціалу P_1 — P_4 в експерименті Г60С

поділяється на два інтервали, що чітко вирізняються (рис. 3):

1) інтервал ΔT_1 характеризується відносною стабільністю потенціалу контейнера та потоками на лічильники Гейгера. Потоки знизу — постійні в часі й малі за величиною. Поток зверху у переважній більшості випадків немає. В декількох інжекціях, однак, зареєстровані поодинокі імпульси із зеніту лічильником G_z ;

2) інтервал ΔT_2 характерний помітною стрибкоподібною зміною (середній рівень потоку знизу збільшується у 2...4 рази й перевищує потік зверху у 1.5...2 рази). Протягом інтервалу ΔT_2 реєструються неперервні флюктуації, одиничні або повторні сплески.

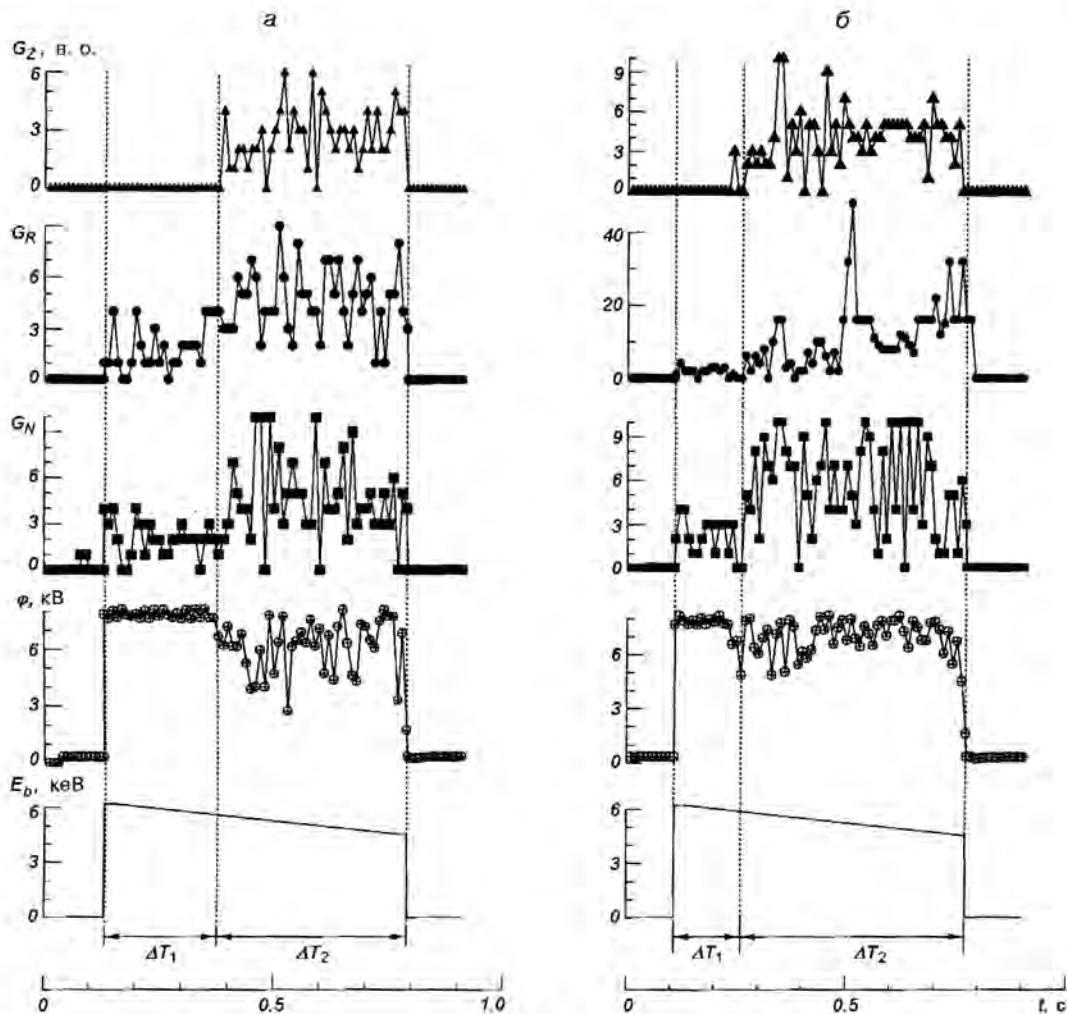


Рис. 3. Типова часова структура потоків G_R , G_Z і G_N часток (у відносних одиницях), зареєстрованих лічильниками Гейгера відповідно з горизонтального напрямку, зверху і знизу, та потенціалу φ контейнера: а — інжекція № 59, б — № 63. На нижньому графіку — енергія E_b інжектованого електронного пучка

Дані від горизонтального лічильника G_R під час інжекцій за структурою не відрізняються від даних G_Z та G_N . Потік з горизонтального напрямку часто майже не відрізняється від потоку знизу, якщо при цьому відсутня інтенсивна лічба в паузах. Однак при інтенсивній лічбі у паузах горизонтальний потік дуже збільшується (очевидно, за рахунок розсіяння електронів, що висипаються), і тоді співвідношення потоку протягом ΔT_2 до потоку протягом ΔT_1 змінюється у великих межах.

Приклади такої часової залежності потоків часток та потенціалу контейнера представлени на рис. 3 під час прямокутних інжекцій № 59 ($T_{cr} = 447$ с, $H = 1200$ км) та № 63 ($T_{cr} = 468$ с, $H = 1242$ км). Трикутні імпульси інжекції не розглядалися, ос-

кільки в них важче фіксувати початок скачка та флюктуацій. Найчіткіше стрибкоподібна часова структура проявляється в інтервалі стартового часу $T_{cr} = 336\ldots597$ с ($H = 930\ldots1430$ км висхідної ділянки), коли контейнер вийшов із тіні Землі (рис. 4).

Стрибкоподібна структура з поділом часу інжекції на періоди ΔT_1 і ΔT_2 (назовемо їх «затриманими флюктуаціями») проявляється також і в сигналах інших пристрій. Але найбільш надійно таку структуру можна прослідкувати за даними потенціалу контейнера.

Вперше стрибки потенціалу проявляються на висхідній ділянці ($T_{cr} = 171\ldots221$ с, $H = 355\ldots553$ км) під час проходження іоносферного шару F_2 . Різкі

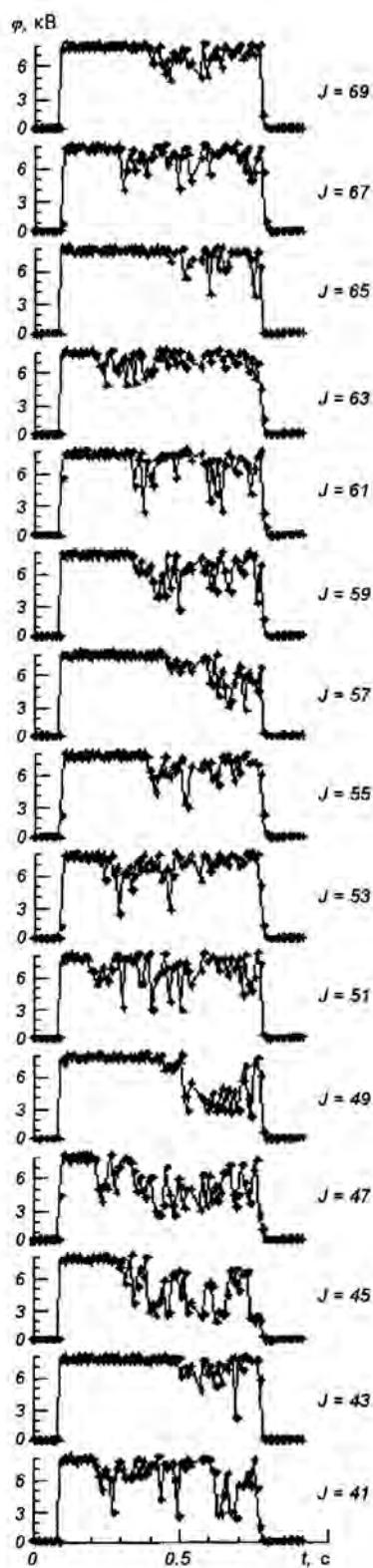


Рис. 4. Потенціал контейнера під час інжекцій електронних пучків (№№ 41...69) на інтервалі висот 930...1430 км висхідної ділянки траєкторії

зменшення частоти прояву структури $\Delta T_1 - \Delta T_2$ збігається з моментом виходу контейнера з шару F_2 .

Поблизу апогею ($H = 1450\ldots1514$ км) знову посилюються збої телеметрії, але стрибок добре помітний у більшості інжекцій. На низхідній ділянці при послабленні збоїв на висотах 1450...1000 км стрибки проявляються менш виразно.

Зміну часу затримки ΔT_1 протягом експерименту показано на рис. 5.

Прояв структури $\Delta T_1 - \Delta T_2$ корелює зі змінами сигналу вакуумметра. На низхідній ділянці частота появи та виразність прояву затриманих флюктуацій зменшуються із зменшенням густини газу поблизу контейнера. Це дає підставу припускати взаємодію електронів (інжектованого пучка та/або нейтралізуючого потоку) з плазмою та нейтральним газом поблизу контейнера.

НЕЙТРАЛЬНИЙ ГАЗ ПОБЛИЗУ КОНТЕЙНЕРА

Про наявність нейтрального газу та зміни його густини з часом можна робити висновки, аналізуючи та зіставляючи у комплексі:

- дані бортового іонізаційного манометра;
- частоту пробоїв високої напруги живлення каналів помножувачів та електростатичних аналізаторів у приладі «Ушба»;
- зменшення інтенсивності світіння за вимірами фотометра ДФ-1 в паузах між інжекціями після виходу з тіні Землі протягом всього експерименту (рис. 10 в роботі [11] та рис. 2 в роботі [11]);
- особливості високовольтних пробоїв у електронній гарматі;
- особливості даних від трьох лічильників Гейгера.

На рис. 5 (верхній графік) у залежності від номера інжекції представлено значення величини P у телеметричних одиницях, котра є приблизно пропорційною до густини атмосфери. Протягом експерименту тиск нейтрального газу поблизу контейнера змінювався приблизно таким чином.

Висхідна ділянка (до інжекції № 118). Від відокремлення ракетного двигуна й до виходу контейнера з тіні Землі (висоти 900...1000 км висхідної ділянки) реєструється максимальний сигнал на рівні обмеження (тобто, тиск перевищує 2.7 мПа). В інтервалі висот 1200...1400 км висхідної ділянки реєструється повільний вихід із «зашкалювання» і зниження тиску до рівня 1.3 мПа. На висотах 1450...1500 км спостерігається зниження тиску до рівня 1 мПа. Але поблизу апогею ($H = 1505\ldots1514$ км) спостерігається різке підвищення тиску до рівня обмеження 2.7 мПа.

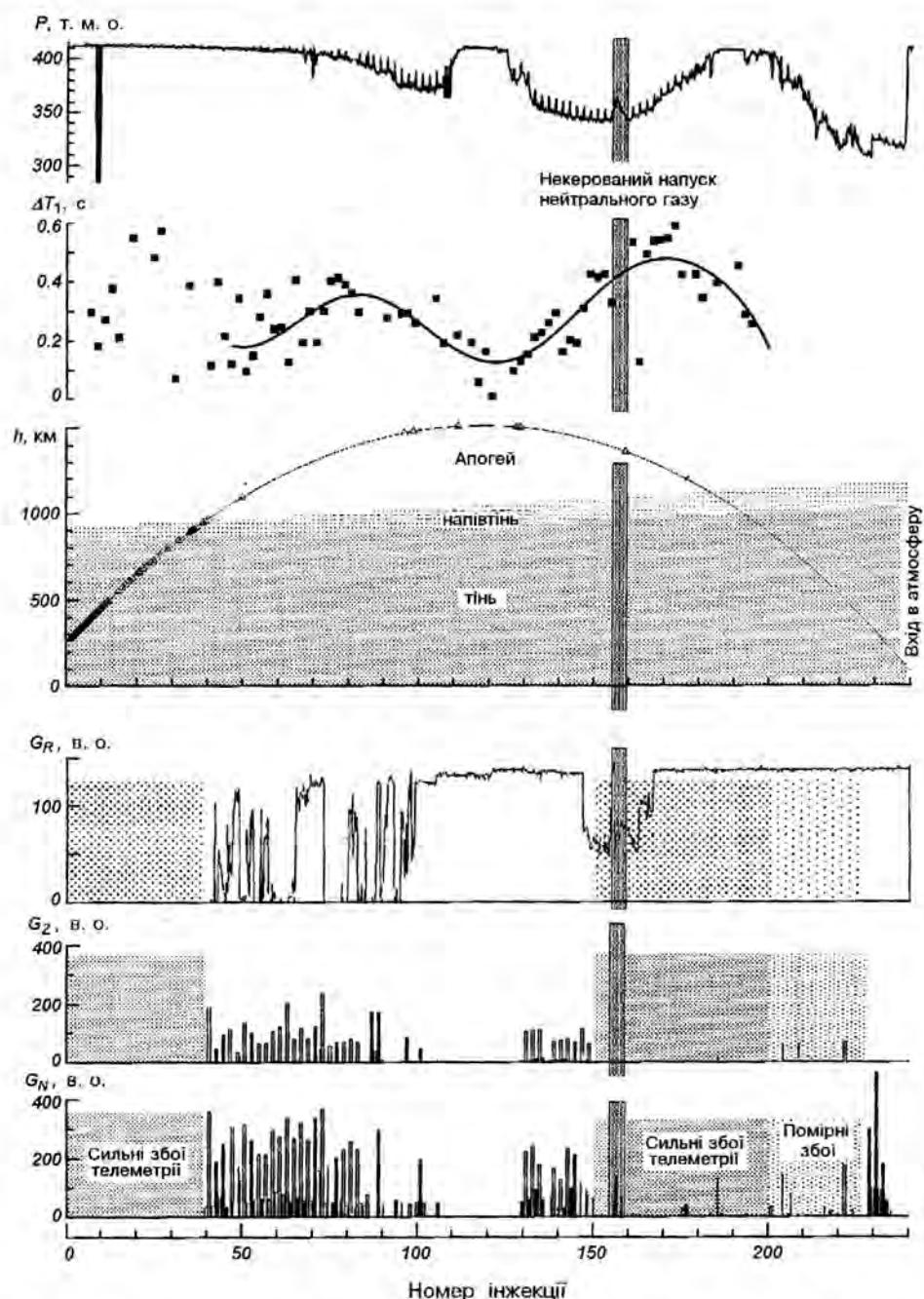


Рис. 5. Зміни вимірюваних параметрів під час експерименту Г60С як функції від номера інжекції: тиск P нейтрального газу (в телеметричних одиницях); час затримки ΔT_1 ; висота h контейнера (супільна лінія), а також моменти високовольтних пробів у приладі «Ушба» (трикутники); потоки G_R , G_Z і G_N часток (у відносних одиницях). Старт ракети — 21 год 59 хв 58 с, падіння — 22 год 23 хв 42 с за московським літнім часом

Низхідна ділянка (після інжекції № 118). В апогеї «зашкалювання» продовжує спостерігатись майже до інжекції № 125 (падіння від $H = 1514$ км до $H = 1505$ км).

На висотах 1500...1400 км зареєстровано зниження тиску до 0.9 мПа. На цьому фоні чітко віддається локальне короткочасне підвищення тиску, которое припадає на інжекції №№ 156...159.

викликане спонтанним спрацюванням інжектора газу [8]. На висотах 1400...1100 км спостерігається повільне підвищення тиску до 1.3 мПа (до рівня «зашкаловання»). В інтервалі висот 1100...850 км тиск тримається на рівні приблизно 1.3 мПа. Після $H = 850$ км тиск знову повільно зменшується. На висотах $H = 250$ км зафіксовано найнижчий тиск в експерименті 0.86 мПа, після чого починається дуже різке підвищення тиску, пов'язане зі входом контейнера в атмосферу.

Додаткову інформацію про наявність нейтрально-го газу поблизу контейнера в експерименті Г60С можна знайти в роботі [8].

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Інтерпретація телеметричних даних у зв'язку з можливістю розрядних процесів поблизу контейнера на висотах $H > 160$ км потребує детальніших оцінок густини нейтрального газу поблизу контейнера. Приведені дані свідчать, що у формуванні мікроатмосфери поблизу контейнера помітно відрізняються:

- початковий період експерименту, коли нейтральна атмосфера створюється ракетним двигуном, а також газовиділенням з приладів та кабелів на зовнішній платформі (час від моменту відокремлення ракетного двигуна і до $T_{cr} = 300\ldots330$ с);
- період, коли нейтральна мікроатмосфера створюється головним чином через газовиділення із самого контейнера (після $T_{cr} = 330$ с).

Висока частота високовольтних пробоїв у вимірювальних приладах та частота збоїв телеметрії на початку експерименту вказують на те, що контейнер перебував у густій мікроатмосфері, зумовленій газовиділенням із відокремленого ракетного двигуна до моменту виходу з тіні Землі.

З виходом із тіні пов'язане різке зниження густини мікроатмосфери, про що свідчать різке зниження частоти високовольтних пробоїв у вимірювальних приладах та частоти збоїв телеметрії. Основним фактором зниження густини після виходу з тіні могла бути іонізація нейтралів сонячною радіацією та захоплення утворених іонів магнітним полем Землі при великій швидкості руху контейнера поперек магнітного поля (0.8...1.2 км/с).

Після віddalenня двигуна на значну відстань від контейнера починає гррати більшу роль власне виділення газу з самого контейнера, зовнішніх кабелів та приладів. Поблизу апогею, де вертикальна швидкість контейнера дуже мала (від 300 до 0 м/с на висотах 1505...1514 км), спостерігається збіль-

шення напруги сигналу вакуумметра до рівня «зашкалу» при наближенні контейнера до апогею.

Різке зменшення частоти високовольтних пробоїв у приладі «Ушба» відразу ж після виходу з тіні Землі, симетрія сигналу вакуумметра відносно апогею показують, що густина мікроатмосфери контейнера залежить також і від швидкості руху контейнера поперек магнітного поля.

Короткочасне локальне підвищення тиску (котре збігається з інжекціями № 156...159 на висотах 1382...1359 км) та помітне (у 2-3 рази) зниження потоку енергійних електронів на горизонтальний лічильник Гейгера (на висотах 1440...1300 км), очевидно, були викликані спонтанним спрацюванням інжектора нейтрального газу. Оцінки тривалості випуску стиснутого газу з інжектора нейтрального газу [8] збігаються з тривалістю часу, коли реєструвалось зниження потоку енергійних електронів на горизонтальний лічильник Гейгера.

Таким чином, з приведених телеметричних даних можна бачити, що концентрація нейтрального газу безпосередньо поблизу контейнера була вищою від фонової іоносферної. Вона визначалась виділенням газу, прийдом із інжектора газу та самого контейнера, і отже, сильно залежала від радіальної відстані від контейнера.

Характерний розмір мікроатмосфери поблизу контейнера та його зміни протягом експерименту можна оцінити на основі даних бортового вакууметра, використовуючи технічні характеристики інжектора нейтрального газу, а також дані експериментів «Вертикаль-4» та «Вертикаль-6» [4]. Неперевну масову витрату газу інжектором газу можна оцінювати величиною 0.1...1.0 г/с (при можливому максимумі 5...10 г/с лише під час спонтанного спрацювання інжектора газу в інжекціях №№ 156...159). Оскільки контейнер був наповнений азотом, а інжектор газу був заправлений сухим стиснутим повітрям, то можна вважати, що середня молекулярна вага нейтрального газу поблизу контейнера становила 28. Звідси грубі оцінки характерного розміру мікроатмосфери L контейнера на рівні концентрації нейтрального газу $N_0 = 10^{10}\ldots10^{11} \text{ см}^{-3}$ дають значення $L = 30\ldots100$ м для пауз між інжекціями електронних пучків. Тобто, область, де концентрація нейтрального газу могла бути на межі запалювання розряду, визначалась швидкістю виділення газу і була просторово обмежена. Додатковий нейтральний газ міг появлятись під час роботи електронної гармати при десорбції внаслідок бомбардування зовнішньої поверхні контейнера та приладів електронами нейтралізації.

Стрибкоподібна зміна потенціалу та інших параметрів протягом інжекцій, а також поява флуктуацій в інтервалі часу ΔT_2 на освітленій частині траекторії (інжекції №№ 50..170) дають підстави припускати можливість розрядних процесів, котрі супроводжують інжекцію електронних пучків та нейтралізацію корпусу контейнера. Рис. 5 показує, що в цьому інтервалі експерименту між часом ΔT_1 та густинou нейтрального газу поблизу контейнера існує негативна кореляція.

Відомо [2], що ефективний переріз взаємодії з нейтральним газом є більшим для надтеплових електронів, ніж для електронів з енергією інжекції. Процеси розряду (або на його межі) можливі не тільки на електронах інжектованого пучка. Результати проведених експериментів [10, 16] дають підстави розрізняти такі потоки електронів:

- інжектований пучок електронів (включно з областю віртуального катода);
- потоки іоносферних електронів нейтралізації вздовж геомагнітної лінії;
- пояс електронів (іоносферних та вторинних), які за певних умов можуть утворювати кільцевий потік навколо космічного апарату та дрейфувати у схрещених $E \times B$ - полях [12].

Модель інжектованого пучка з віртуальним катодом розглядалась в багатьох роботах (наприклад, [10]). В них припускається, що далі за областью віртуального катода інжектовані електрони мають низькі енергії, оскільки основна втрата енергії пучка повинна відбуватись на шляху від інжектора до просторового заряду віртуального катода. Але переважно в експериментальних даних про просторовий розподіл інжектованих електронів за енергіями на користь такої моделі немає.

Більш імовірними здаються процеси взаємодії надтеплових іоносферних електронів струму нейтралізації (які рухаються вздовж геомагнітної лінії) з нейтральним газом поблизу контейнера. Концентрація нейтрального газу N_0 була відносно високою поблизу контейнера Г60С і різко зменшувалась з відстанню. З іншого боку, при наявності електричного поля контейнера густина потоку нейтралізуючих електронів (та вторинних електронів, вибитих з поверхні) повинна збільшуватись при наближенні до контейнера, як і густина газу. Результати експерименту «Exo-7» [16] також схиляють до думки, що в експерименті Г60С затримані флуктуації могли бути викликані саме електронами струму нейтралізації.

Процесами, які супроводжували інжекцію електронів при наявності нейтрального газу поблизу космічного апарату, могли бути пучково-плазмовий розряд (ППР) та розряд у схрещених $E \times B$ - полях.

Класичний ППР на нейтральній незбурений атмосфері був зареєстрований наприкінці експерименту Г60С на низхідній ділянці траєкторії нижче 160 км [1].

В роботі [9] запропоновано феноменологічну модель ППР у околі ракети, котра інжектує електрони. Розвиток ППР проходить через початкову стадію (попереднє накопичення плазми) та стаціонарний розряд. На початковій стадії при інжекції електронів у нейтральний газ за рахунок ударної іонізації відбувається накопичення теплових електронів до рівня критичної концентрації. Далі за рахунок модуляційної нестійкості плазми відбувається розігрів плазми, котра залучає до розряду нейтральний газ. Стационарний розряд може існувати, якщо виконується умова Таунсенда: швидкість народження електронів у розряді повинна бути не меншою від швидкості іхньої втечі з області розряду. На висхідній ділянці до апогею ($T_{cr} = 336\ldots597$ с, $H = 930\ldots1430$ км) вихід плазми з області розряду згідно з [9] міг визначатись швидкістю руху контейнера поперек магнітного поля, а поблизу апогею ($T_{cr} = 692\ldots822$ с, $H = 1500\ldots1514$ км) — коефіцієнтом амбіополярної дифузії.

Згідно з даними [9] верхня межа запалювання ППР відповідає висотам $H_{max} = 160\ldots180$ км (до концентрації газу $N_0 > 2 \cdot 10^{10}$ см⁻³), а вище H_{max} процес взаємодії електронного пучка з плазмою повинен носити характер сплесків протягом всього експерименту. На відміну від [9], умови експерименту Г60С вирізняються наявністю нейтральної мікроатмосфери поблизу контейнера, щільність якої була достатньо високою і, крім того, могла додатково збільшуватись у часі за рахунок десорбції газу внаслідок бомбардування нейтралізуючими електронами. Тобто, характеристики мікроатмосфери згідно з [9] були достатніми, щоб режим початкової стадії ППР під час інжекції міг мати місце, принаймні в інтервалі часу $T_{cr} = 336\ldots597$ с ($H = 930\ldots1430$ км висхідній ділянки).

Отже, в експерименті Г60С могли бути передумови для виникнення розряду в релаксаційному режимі (неперервні сплески) або принаймні на межі його запалювання.

Зареєстровані величини часу затримки ΔT_1 між початком імпульсу інжекції електронних пучків та початком флуктуацій потенціалу контейнера по сути виявляють залежність затримки ΔT_1 від густини нейтрального газу поблизу контейнера протягом експерименту Г60С. Ця залежність цікава як експериментальний факт, котрий відображає особливості процесу нейтралізації в умовах низької густини нейтрального газу поблизу космічного тіла, що інжектує пучки електронів.

1. Балебанов В. М., Гагуа Т. И., Клос З. и др. Особенности плазменных процессов, возникающих в зоне инжекции пучка электронов с высотного зонда. Исследование пучково-плазменного разряда. — М., 1983.—38 с.—(Препринт / АН СССР, Ин-т космических исследований; № 781).
2. Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров С. А. Основы физики плазмы. — М.: Атомиздат, 1977.—384 с.
3. Кирага А., Клос З., Кочмарев Л. Ю. и др. Исследование в условиях лаборатории основных характеристик пучково-плазменного разряда, возникающего в ракетных экспериментах. — М., 1981—42 с.—(Препринт / АН СССР, Ин-т космических исследований; № 617).
4. Кочнев В. А., Истомин В. Г. Результаты масс-спектрометрических измерений состава верхней атмосферы на ракетах «Вертикаль-4» и «Вертикаль-6». — М., 1984—24 с.—(Препринт / АН СССР, Ин-т космических исследований; № 945).
5. Кулиничский Б. Д., Леонов Н. А., Манагадзе Г. Г. и др. Ускоритель электронов на емкостных накопителях для активных экспериментов в космосе. — М., 1983.—18 с.—(Препринт / АН СССР, Ин-т космических исследований; № 860).
6. Леонов М. А. Бортовий прискорювач електронів на накопичувачах-емностях: основні співвідношення та оцінки // Космічна наука і технологія.—1996.—2, № 5/6.—С. 46—52.
7. Леонов М. А. Бортовий прискорювач електронів на накопичувачах-емностях: особливості // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 5/6.—С. 84—91.
8. Леонов М. А. Бортовий прискорювач електронів на накопичувачах-емностях: експеримент Г60С // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 2/3.—С. 78—86.
9. Мишин Е. В., Ружин Ю. Я., Телегин В. А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989.—264 с.
10. Denig W. V., Maynard N. C., Burke W. J., Machlum B. N. Electric field measurements during supercharging events on the MAIMIK rocket experiment // J. Geophys. Res.—1991.—96, N A3.—P. 3601—3610.
11. Friedrich M., Riedler W., Torkar K. M., et al. Potential observations of an electron-emitting rocket payload // Adv. Space Res.—1988.—8, N 1.—P. (1)192—(1)196.
12. Kellogg P. J., Monson S. J. Charging and cross-field discharge during electron accelerator operation on a rocket // J. Geomagn. and Geoelec.—1988.—40.—P. 1257—1267.
13. Klos Z., Zbyszynski Z., Managadze G. G., et al. Some features of RF emissions observed by an electron-emitting rocket payload // Adv. Space Res.—1988.—8, N 1.—P. (1)119—(1)122.
14. Szuszczewicz E. P. Controlled electron beam experiments in space and supporting laboratory experiments: a review // J. Atmosphere and Terrestrial Phys.—1985.—47, N 12.—P. 1189—1210.
15. Torkar K. M., Friedrich M., Riedler W., et al. Collection of data obtained from the rocket flight G-60-S. — Graz, April 1985, IWF 8501.
16. Winckler J. R., Malcolm P. R., Arnoldy R. L., et al. ECHO 7: An electron beam experiment in the magnetosphere // EOS (Transactions, American Geophysical Union).—1989.—70, N 25.—P. 657, 666—668.

PECULIARITIES OF TEMPORAL STRUCTURE OF DATA OBTAINED DURING ELECTRON BEAM INJECTION PULSES IN THE MAGNETOSPHERIC EXPERIMENT G60S

M. A. Leonov

The temporal structure of the telemetry data in the high-altitude magnetospheric experiment G60S is described. The electron beams injected from the payload with scientific instrumentation had a current of 0.5 A, an energy 6.3 keV and a duration of 0.6 s. The main feature is so-called delayed fluctuations or appearance of jump changes and fluctuations in many physical parameters during injections. On the upleg of trajectory at altitudes of 300...1500 km, discontinuous changes and the fluctuations took place in signals of potential of the container and also in flows of electrons to Geiger counters after ΔT_1 0.05...0.5 s from the beginning of injection. The anticorrelation of the delay time ΔT_1 and the density of neutral gas in the vicinity of the container as well as the correlation of the time ΔT_1 and the velocity of the container across geomagnetic field are observed.

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9: 520.86

А. М. Гоков, О. Ф. Тирнов, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Экспериментальное исследование реакции среднеширотной D-области ионосферы на рентгеновские и оптические вспышки

Надійшла до редакції 11.11.2004

За допомогою радара часткових відбиттів досліджено реакцію D-області іоносфери на спалахи рентгенівського випромінювання (XRA) і оптичні спалахи на Сонці. Встановлено, що через 15–25 хв після XRA відбуваються зміни параметрів частково відбитих сигналів, радіошумів і електронної концентрації з характерною тривалістю близько 15–30 хв. Наводиться фізичне тлумачення результатів спостережень.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки сопровождаются увеличением интенсивности оптического, рентгеновского и короткулярного излучений и в значительной мере определяют состояние космической погоды. Влияние этих явлений на D-область ионосферы неоднократно изучалось [3–8, 10–12, 14, 16], однако подавляющая часть исследований относится к высоколатитной нижней ионосфере. Влияние рентгеновских и оптических вспышек на среднеширотную D-область ионосферы изучалось эпизодически, чего недостаточно для решения задач прогнозирования и моделирования проявлений космической погоды в нижней ионосфере. В связи с этим есть необходимость в продолжении экспериментальных исследований среднеширотной ионосферы с целью решения практических задач радиосвязи, радионавигации и др. В последние годы подобные процессы успешно исследуются в рамках международных и национальных программ типа Interball, Global Change Research Programs, CEDAR, Living with a Star.

Целью нашей работы являются экспериментальные исследования влияния вспышек рентгеновского излучения (XRA) и слабых оптических вспышек (FLA) на характеристики радиошумов и частично отраженных радиосигналов, а также на параметры среднеширотной D-области ионосферы.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Зондирование нижней ионосферы проводилось в 1990–2003 гг. с помощью радара частичных отражений (ЧО) в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (ХНУ) [15]. Исследовался диапазон высот 45–109 км или 60–102 км с шагом по высоте 3 км вблизи г. Харькова ($\varphi = 49.5^\circ$ N, $\lambda = 36.3^\circ$ E). Рабочая частота радара составляла 2.31 МГц. Основные параметры радара следующие: рабочие частоты $f = 1.5–4.5$ МГц, импульсная мощность передатчика $P \approx 150$ кВт, длительность импульсов $\tau = 25$ мкс, частота повторения $F = 1–100$ Гц, коэффициент усиления антенны $G \approx 40–150$. Амплитуды $A_{so,x}(z, t)$ смеси ЧО-сигнала и радиошума обычной и необычной поляризаций (индексы o , x соответственно) после оцифровки записывались на магнитный носитель (здесь z — высота над поверхностью Земли, t — время). На их основе создан банк экспериментальных данных ХНУ. Для выделения частично отраженного сигнала на фоне шумов перед излучением каждого зондирующего импульса осуществлялось 2–6 выборок шума в полосе частот 50 кГц. Оценки средних значений интенсивностей ЧО-сигналов $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ и шумов $\langle A_{nx,no}^2 \rangle$ осуществлялись по 60 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая

Сведения об экспериментах и вспышках

Дата	Тип вспышки	Начало, момент максимума и конец вспышки, UT	Время наблюдений, UT
XRA			
21.02.1997 г.	B1.3	10:15—10:19(max)—10:29	06:10—13:00
18.03.1998 г.	M1.0	10:50—11:12(max)—11:44	07:20—14:08
25.03.1998 г.	C1.2	11:45—11:49(max)—11:54	08:34—13:40
25.03.1998 г.	C5.3	12:31—12:35(max)—12:44	08:34—13:40
23.12.1998 г.	M1.1	08:13—08:16(max)—08:21	08:07—10:15
23.12.1998 г.	C5.0	11:57—12:06(max)—12:13	11:22—14:25
13.01.1999 г.	B4.6	08:32—08:35(max)—08:37	08:00—14:48
13.01.1999 г.	C1.0	12:38—12:49(max)—12:52	08:00—14:48
12.02.1999 г.	C1.7	09:52—09:56(max)—10:13	09:07—14:03
12.02.1999 г.	C2.0	10:44—10:49(max)—10:53	09:07—14:03
18.04.2001 г.	C1.2	18:13—18:21(max)—18:27	07:04—23:55
FLA			
25.03.1998 г.	SF	11:46—11:48(max)—11:51	08:34—13:40
13.11.1998 г.	SF	08:12—08:19(max)—08:26	08:28—10:36
14.01.1999 г.	SN	09:55—10:15(max)—11:17	08:00—14:00
15.01.1999 г.	SF	10:41—11:15(max)—11:20	08:24—14:22
10.02.1999 г.	SF	13:37—13:43(max)—14:00	10:03—14:30
12.02.1999 г.	SF	12:17—12:23(max)—12:32	09:07—14:03
12.02.1999 г.	SF	12:42—12:44(max)—12:51	09:07—14:03
08/09.06.2001 г.	ERU	02:13—02:14(max)—02:23	20:39—04:06
08/09.06.2001 г.	ERU	07:57—07:58(max)—08:04	07:07—10:33

погрешность этих оценок не превышала 10 %.

Для всех экспериментов на интервалах усреднения в 10 или 5 мин вычислялись высотно-временные зависимости $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$ и $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$. По полученным профилям $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z)$ находилось их отношение $R(z) = \langle A_x^2 \rangle / \langle A_o^2 \rangle$, используемое далее для получения высотных профилей электронной концентрации $N(z)$ по методике дифференциального поглощения на основе алгоритма регуляризации [1]. При получении $N(z)$ -профилей использовалась модель профиля $v(z)$ частот столкновений электронов с нейтральными молекулами, приведенная в работе [13].

Профили $N(z)$ вычислялись на интервалах усреднения в 10 или 5 мин с погрешностью, не превышающей 30 и 50 % соответственно.

Для анализа из банка экспериментальных данных ХНУ были отобраны регистрация ЧО-сигналов, полученные во время 11 вспышек рентгеновского излучения и 9 оптических вспышек. Рассмотрены события, когда рентгеновские вспышки не сопровождались оптическими. Длительность регистраций составляла десятки минут — часы до и после вспышек. Данные о вспышках получены по интернету в WDC-A и по URL: www.solar.sec.noaa.gov. Сведения об экспериментах и вспышках приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Анализ экспериментальных данных показал, что для обоих типов событий имеют место характерные особенности поведения ЧО-сигналов, радиошумов и концентрации электронов. Опишем их подробнее, используя данные, полученные в нескольких характерных экспериментах.

Рентгеновские вспышки. Рассмотрим результаты наблюдений, выполненных 13.01.1999 г., 21.02.1997 г., 25.03.1998 г. и 18.03.1998 г. во время вспышек рентгеновского излучения.

На рис. 1—4 приведены примеры наблюдаемых высотно-временных вариаций $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$, $R(z, t)$ и $N(z)$.

В первом эксперименте примерно через 24 мин после начала XRA почти во всей D-области ($z = 72$ —87 км) интенсивности $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ увеличились в единицы-десятки раз; в 5—9 раз увеличилась и интенсивность радиошумов $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$ с запаздыванием на 15—17 мин относительно $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$; значения R увеличивались в 3—7 раз. Длительности этих процессов были примерно одинаковыми и составляли 10—12 мин. Электронная концентрация на высоте 84 км в течение примерно 10 мин увеличилась на 40—50 % с последующим резким

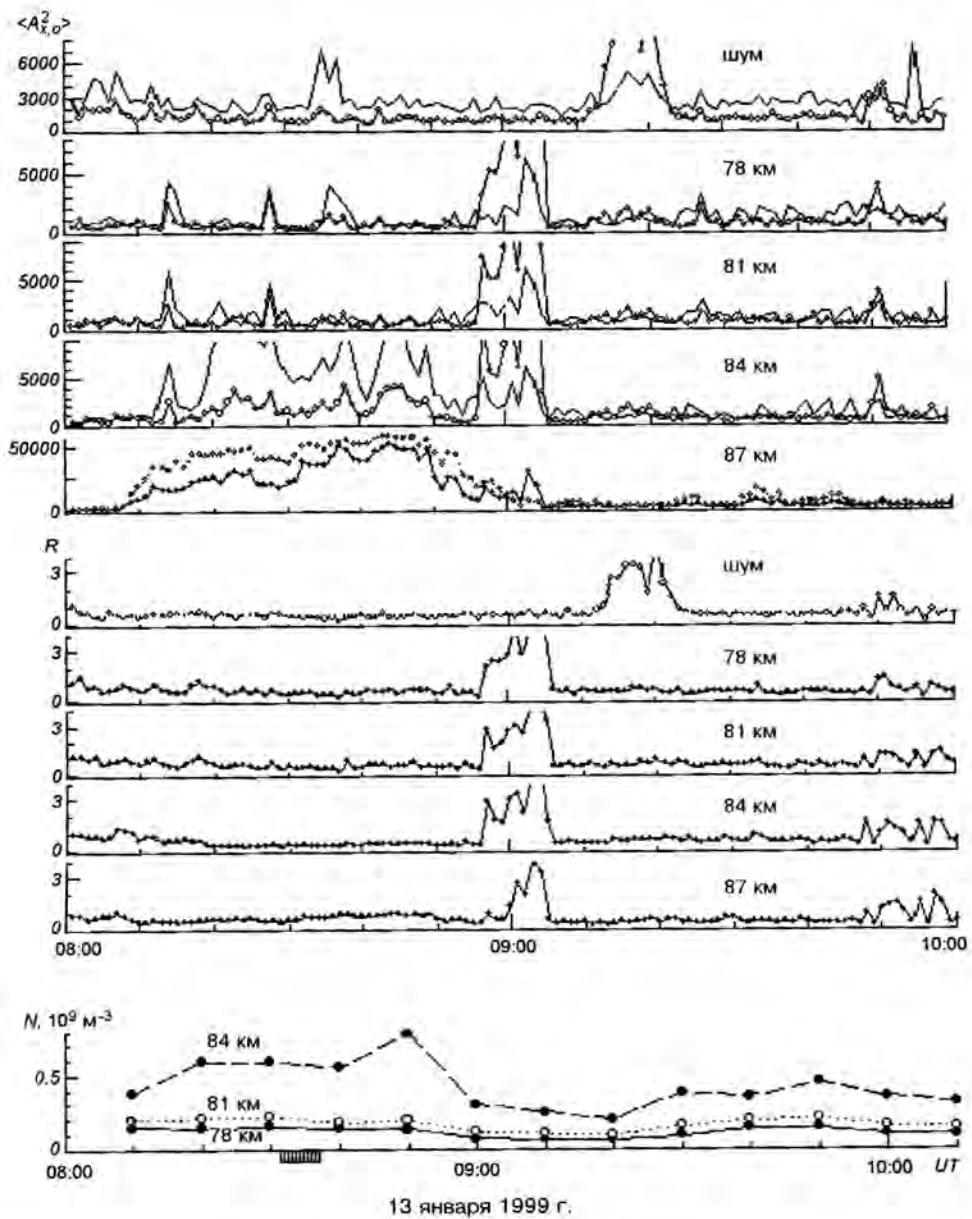


Рис. 1. Высотно-временные вариации $\langle A_{x,y}^2(z, t) \rangle$, $R(z, t)$ и $N(z, t)$, полученные в эксперименте 13.01.1999 г. в период вспышки рентгеновского излучения класса B4.6. Время вспышки здесь и далее отмечено заштрихованной областью

уменьшением в течение получаса. Ниже 84 км имело место только отмеченное выше уменьшение значений N .

В эксперименте 21.02.1997 г. отчетливых изменений $\langle A_{x,0}^2 \rangle$, $\langle A_{nx,0}^2 \rangle$, связанных с XRA, не обнаружено, за исключением небольшого увеличения $\langle A_{x,0}^2 \rangle$ длительностью 15–20 мин на высотах 81–84 км через 20–22 мин после начала XRA. В тоже время

наблюдалось отчетливое увеличение интенсивностей радиошумов $\langle A_{nx,nm}^2 \rangle$ длительностью 10 мин с запаздыванием на 10 мин относительно $\langle A_{x,0}^2 \rangle$ и увеличение значений R в 1.5–3.5 раза. Концентрация электронов в интервале высот 81–90 км возросла на 50–100 % примерно через 10–20 мин после начала XRA. Возмущение N продолжалось примерно 30–40 мин.

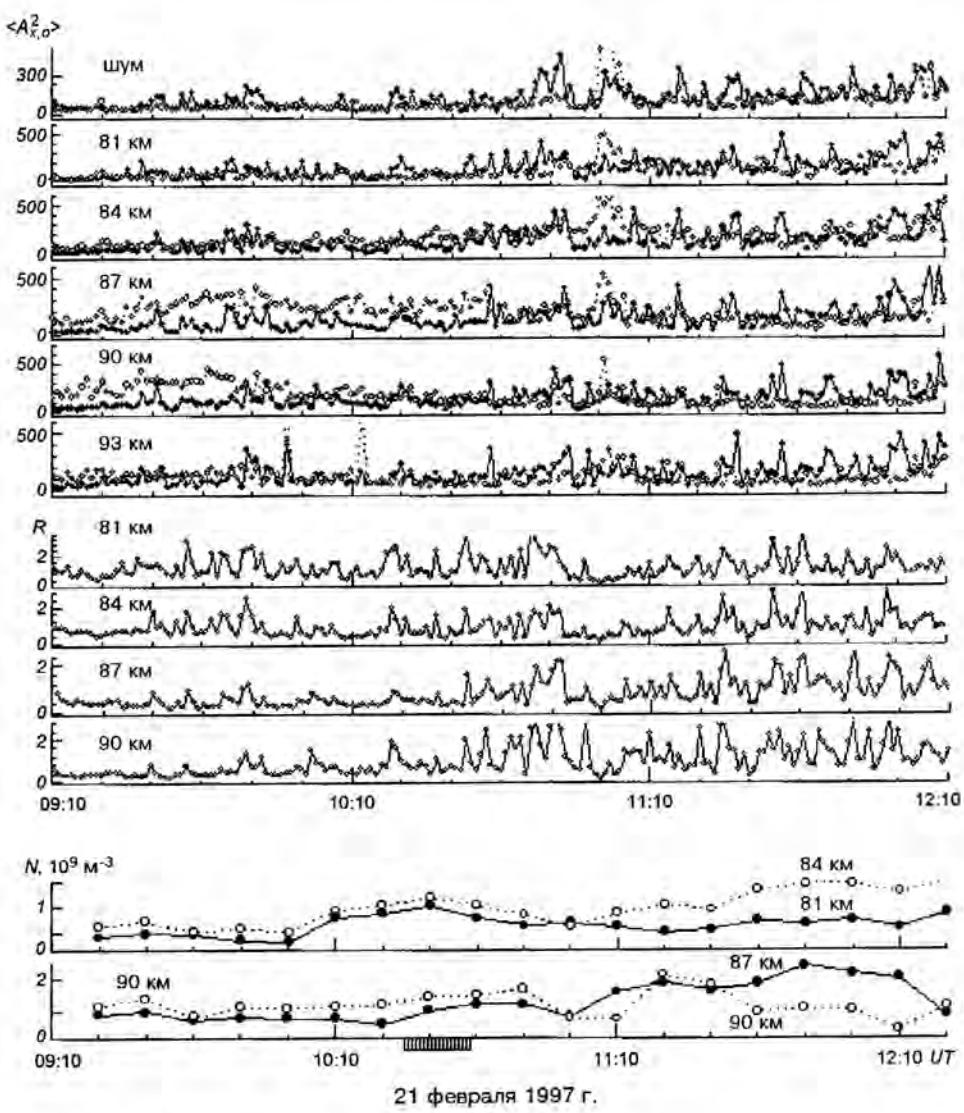


Рис. 2 То же, что и на рис. 1 для вспышки класса B1.3 21.02.1997 г.

В третьем эксперименте примерно через 17—18 мин после XRA интенсивности $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ в интервале высот 81—90 км увеличивались в 20—30 раз в течение 10—15 мин, после чего на высотах 81—87 км они стали в 2—3 раза больше, чем до возмущения. Для величин R в интервале высот 81—90 км наблюдалось плавное уменьшение значений в течение примерно 40 мин, которое наступало через 15—18 мин после XRA. Через 10—20 мин после события на высотах 81—78 км имело место увеличение концентрации электронов более чем на 100 % в течение получаса. На других высотах определить значения N не удалось.

В эксперименте 18.03.1998 г. примерно через 45 мин после XRA на высотах 81—90 км интенсивности $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ и $\langle A_{nx,no}^2 \rangle$ в течение получаса уменьшились в 1.5—3 раза с последующим заметным увеличением. В этот же промежуток времени в 1.5—4 раза уменьшились значения R после их 30-минутного увеличения примерно через 10 мин после вспышки. Последующие (после 12:00 UT) изменения также, по-видимому, связаны с XRA, поскольку вспышка была достаточно продолжительной. В высотно-временном ходе $N(z, t)$ характерным оказалось 30-минутное увеличение значений N на 50—100 % (и более) на высотах 81—84 км.

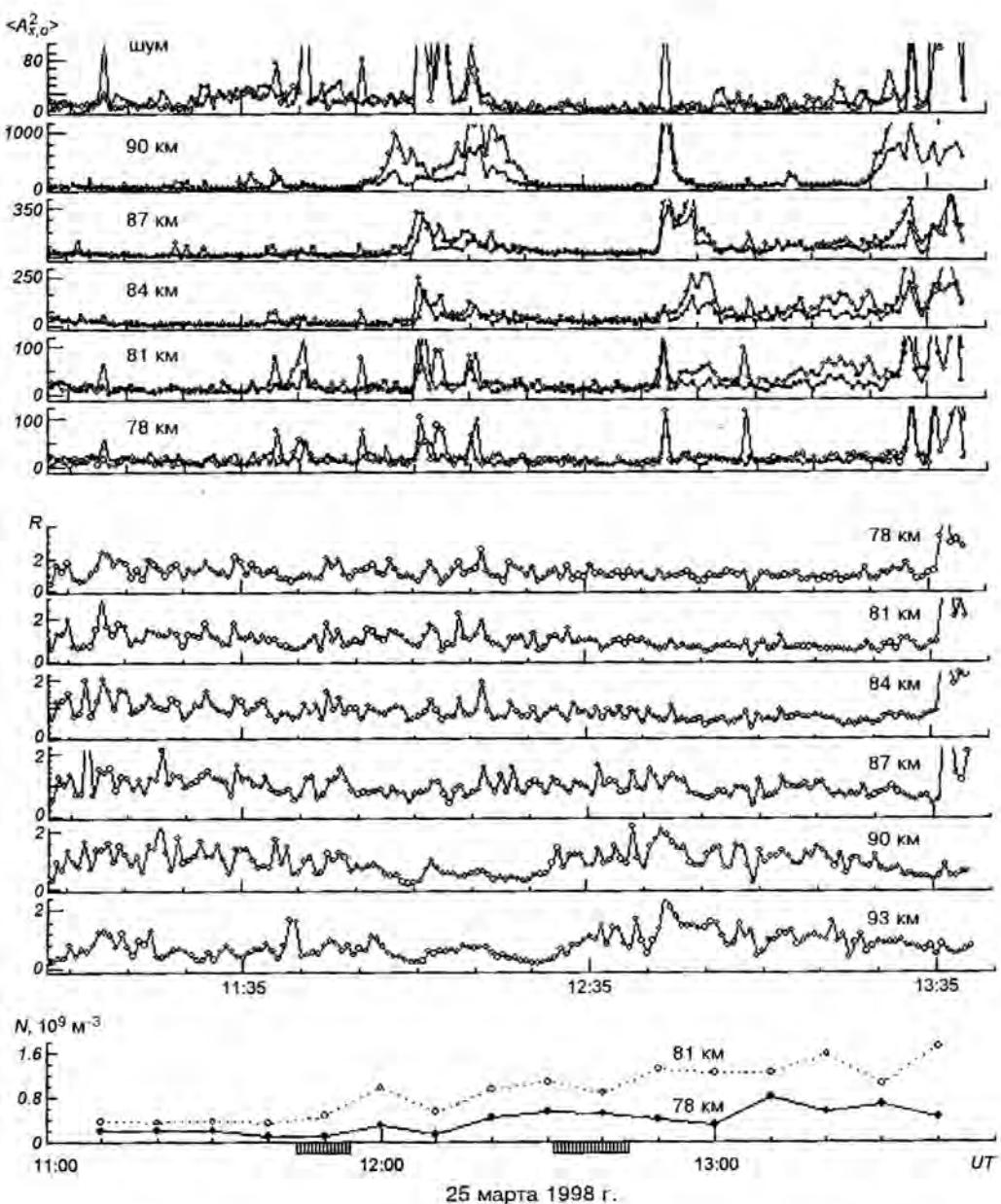


Рис. 3. То же, что и на рис. 1 для вспышек класса C1.2 (11:45–11:54 UT) и C5.3 (12:31–12:34 UT) 25.03.1998 г.

Таким образом, основные особенности поведения ЧО-сигналов, радиошумов и концентрации электронов таковы.

1. Примерно через 10–40 мин после XRA интенсивность ЧО-сигналов на высотах 81–93 км на протяжении 10–20 мин увеличивается в десятки раз, после чего восстанавливается к исходным значениям в течение 30–70 мин. Иногда наблюдается почти полное исчезновение отражений от неодно-

родностей в D-области. После этого, как правило, интенсивности ЧО-сигналов вновь увеличиваются в единицы-десетки раз, возвращаясь к типичному суточному ходу.

2. Интенсивности радиошумов $\langle A_{nx,0}^2 \rangle$ также увеличиваются на протяжении 10–20 мин, но с задержкой по времени на 15–20 мин относительно возмущения $\langle A_{x,0}^2 \rangle$.

3. В эксперименте 18.03.1998 г. почти сразу после

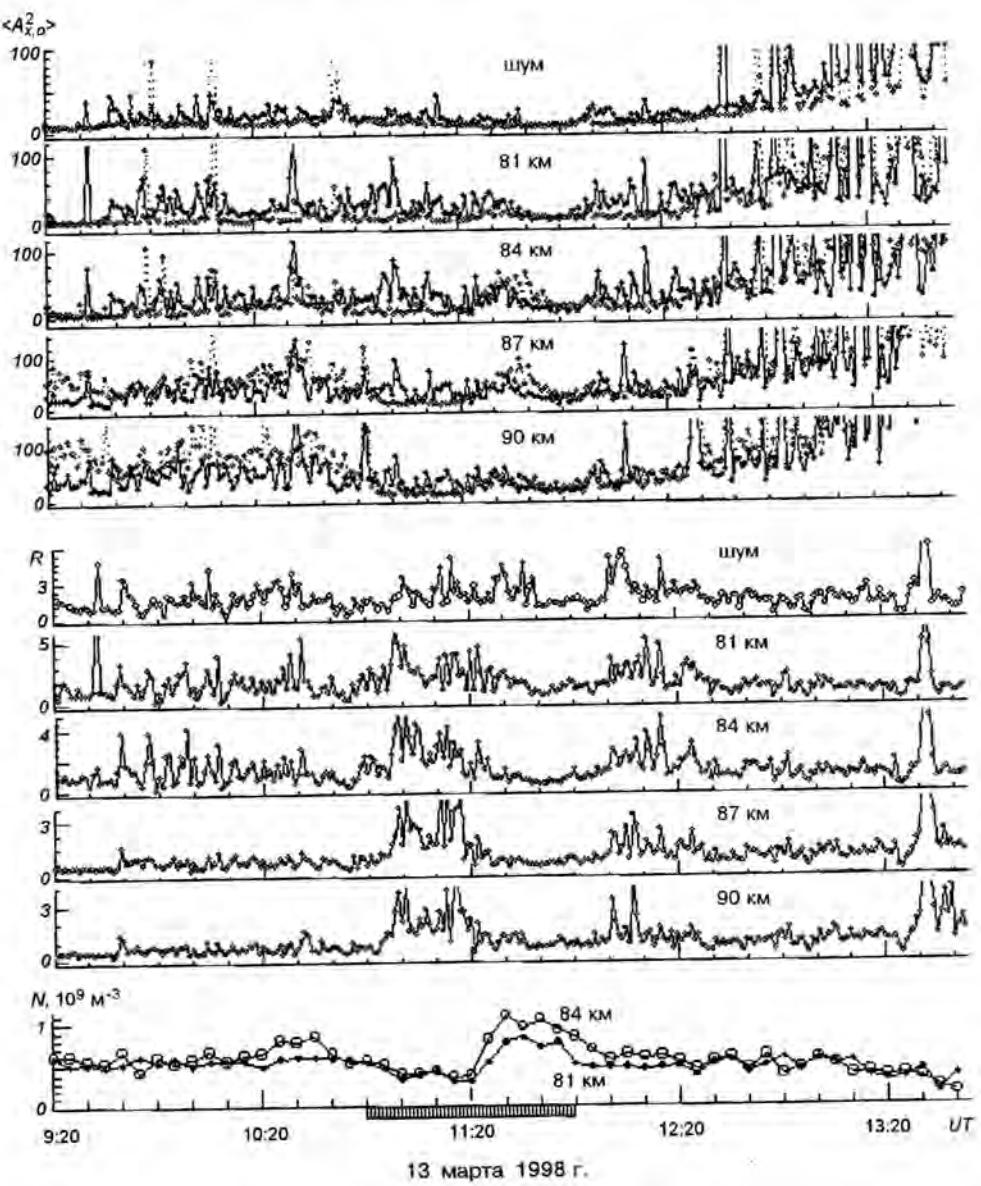


Рис. 4 То же, что и на рис. 1 для вспышки класса M1.0 18.03.1998 г.

окончания XRA интенсивности ЧО-сигналов $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ уменьшались в несколько раз на высотах 81—90 км на протяжении 20—25 мин с последующим восстановлением суточного хода.

4. Значения величины R на высотах 78—90 км и ее дисперсия σ_R^2 увеличиваются в несколько раз через 5—25 мин после начала XRA с последующей релаксацией до невозмущенных значений.

5. Концентрация электронов увеличивается на

50—150 % в течение 30—35 мин на высотах 81—87 км примерно через 15—25 мин после начала XRA с последующей релаксацией. В эксперименте 13.01.1999 г. наблюдалось небольшое уменьшение N относительно суточного хода.

Оптические вспышки. Эти события имели в основном небольшую интенсивность. На рис. 5—8 приведены полученные для четырех экспериментов величины $\langle A_{x,o}^2(z, t) \rangle$, $\langle A_{nx,no}^2(t) \rangle$, $R(z, t)$ и $N(z)$.

В эксперименте 13.11.1998 г. через 28 мин после вспышки на высотах 78–90 км значения $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ увеличивались в десятки раз. Длительность таких возмущений составила 20 мин. Примерно на минуту раньше произошло кратковременное (длительностью около 5 мин) увеличение интенсивностей радиошумов. На высотно-временных зависимостях $R(z, t)$ в этот период для высот 84–90 км значения R увеличились примерно в 2–4 раза (длительность 30 мин). На высотных уровнях 84–90 км отмечено кратковременное увеличение электронной концентрации примерно на 40–80 % (длительностью 10–20 мин).

В эксперименте 15.01.1999 г. во время достаточно продолжительной вспышки примерно через 25 мин после ее начала имело место увеличение интенсивностей $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ в 8–15 раз в течение 15 мин. В это же время в несколько раз увеличились значения R и σ_R^2 . Через 20–30 мин после начала вспышки на высотах 84–90 км в течение примерно 10–20 мин имело место небольшое увеличение электронной концентрации.

Для эксперимента, проведенного 14.01.1999 г., характерным было кратковременное (около 10 мин) увеличение в десятки раз $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ в конце вспышки и кратковременное (около 5–10 мин) увеличение значений N в это же время. Через 25–30 мин после окончания вспышки в течение 30–15 мин концентрация электронов на высотах 78–87 км увеличивалась до 100 %. Через час после начала вспышки в течение примерно 50 мин дисперсия σ_R^2 выросла в несколько раз.

В эксперименте 09.06.2001 г. через 60 мин после FLA зарегистрировано увеличение электронной концентрации на 50–200 % на высотах 87–90 км (в течение 25–30 мин). Через 20 мин после вспышки отмечалось кратковременное (10 мин) увеличение в несколько раз значений $\langle A_{x,o}^2 \rangle$. Более интенсивное и длительное увеличение имело место через 50–60 мин после FLA. В высотно-временном ходе R замечено плавное уменьшение значений примерно в два раза на высотах 84–93 км.

Примерно через 20 мин после начала вспышки 25.03.1998 г. также наблюдалось заметное увеличение интенсивностей $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ и $\langle A_{n,x,no}^2 \rangle$ длительностью 20–30 мин почти во всей D-области.

Таким образом, для рассмотренных вспышек обнаружено несколько особенностей.

1. Увеличение в единицы-десятки раз интенсивностей $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ длительностью 15–30 мин на высотах 81–93 км через 20–35 мин после начала вспышки.

2. Увеличение в несколько раз значений R и их дисперсии σ_R^2 .

3. Увеличение электронной концентрации примерно на 40–80 %.

4. В одном случае через 25–30 мин после окончания вспышки в течение примерно 30–15 мин концентрация N на высотах 78–87 км увеличились до 100 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

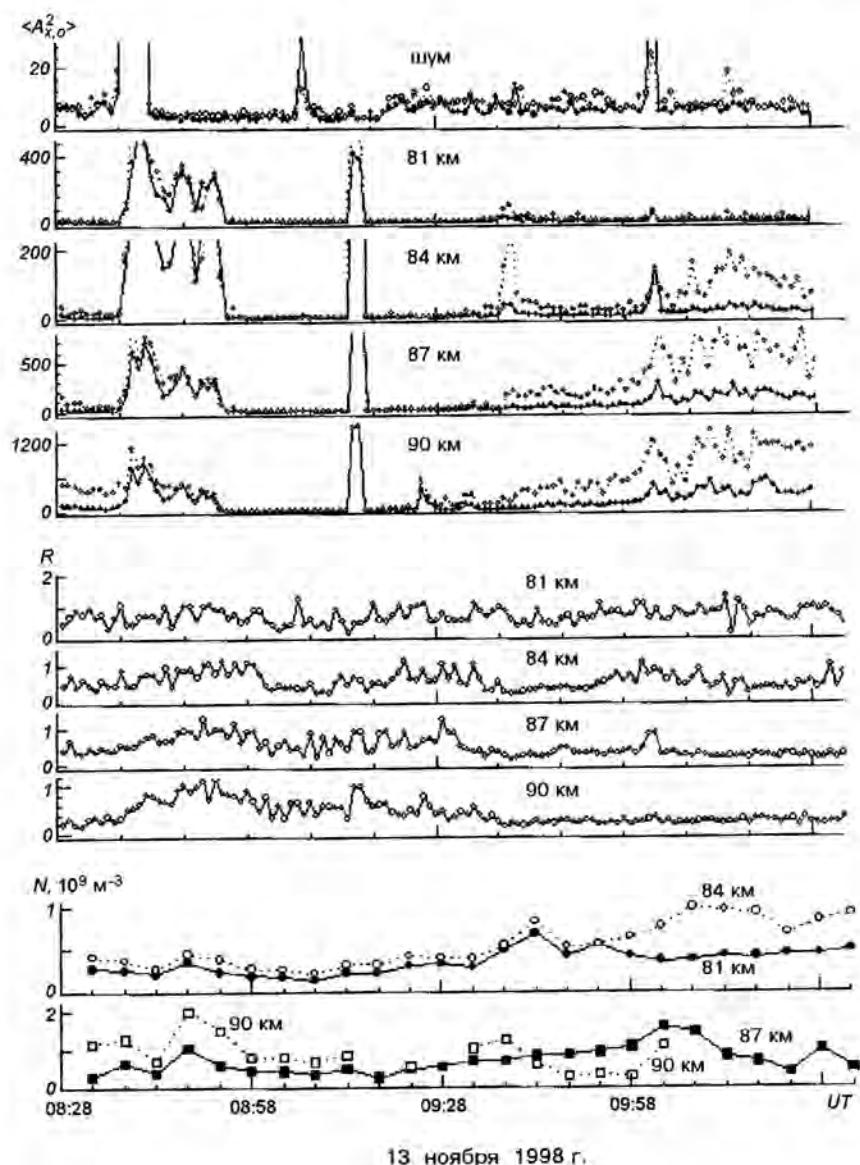
Рентгеновские вспышки. Увеличение интенсивности шума и ее дисперсии через некоторое время после XRA (важно, что это происходит на фоне уменьшения электронной концентрации, см. рис. 1) можно объяснить (см. [2]) следующим образом. Шум в диапазоне частот 2–3 МГц является результатом наложения сигналов от радиосредств. В период увеличения уровня шумов наблюдалось уменьшение концентрации электронов, что сопровождается уменьшением поглощения радиосигналов в ионосфере. Уменьшение поглощения приводит к увеличению уровня помех, принимаемых как основным, так и боковыми лепестками диаграммы направленности радара ЧО. Как показал анализ большого числа наблюдений, во время прохождения утреннего и вечернего терминаторов, такой же эффект, но более сильно, проявляется в предвечернее время.

Экспериментально установленные вариации (например, увеличение — в эксперименте 13.01.1999 г. и уменьшение в эксперименте 18.03.1998 г.) средних значений дисперсий и интенсивности ЧО-сигналов могут быть объяснены как в работе [2]. Из теории метода ЧО известно [9], что

$$\langle A_{x,o}^2 \rangle \propto \frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{\Omega_z^2 + \nu^2} \exp(-4K_{x,o}), \quad (1)$$

где $\langle \Delta N^2 \rangle$ — интенсивность флюктуаций N , $\Omega_z = \omega \pm \omega_L$, $\omega_L = 2\pi f_L$, $f_L = f_B \cos \alpha \approx 1.3$ МГц, f_B — гирочастота электронов, α — угол между вертикалью и вектором индукции геомагнитного поля, ν — частота соударений электронов с нейтралами, $K_{x,o}$ — интегральный коэффициент поглощения ЧО-сигнала x - и o -поляризаций.

После вспышки происходят следующие процессы: 1) изменение N , а значит, и $K_{x,o}$; 2) значительные вариации $\langle \Delta N^2 \rangle$ (это возможно при усилении турбулизации среды, что может быть вызвано, например, увеличением потока рентгеновского излучения). Эти факторы могут объяснить наблюдаемые вариации $\langle A_{x,o}^2 \rangle$. Нестационарность процессов в ионосферной плазме в период рассматриваемых событий приводит к заметному увеличению дисперсии σ_R^2 .



13 ноября 1998 г.

Рис. 5. Высотно-временные вариации $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$, $R(z, t)$ и $N(z, t)$, полученные в эксперименте 13.11.1998 г. в период оптической вспышки класса SF

интенсивностей сигнала. Кроме того, известно [2], что неполное «вычитание» шумов также приводит к увеличению $\sigma_{x,o}$.

Для объяснения экспериментально обнаруженных вариаций отношения интенсивностей ЧО-сигналов R и его дисперсии $\sigma_{x,o}$ после XRA воспользуемся известной из теории метода ЧО зависимостью

$$R = \frac{\langle A_x^2 \rangle}{\langle A_o^2 \rangle} = \frac{\Omega_+^2 + \nu^2}{\Omega_-^2 + \nu^2} \exp[-4(K_x - K_o)]. \quad (2)$$

Учтем, что на высотах 75—90 км обычно выполняются условия $\Omega_+^2 \gg \nu^2$, $\Omega_-^2 \gg \nu^2$. Тогда выражение (2) можно упростить к виду

$$R \approx \frac{\Omega_+^2}{\Omega_-^2} \exp[-4(K_x - K_o)]. \quad (3)$$

Увеличение значений N сопровождается увеличением $K_{x,o}$, что приводит к уменьшению R . При уменьшении значений N уменьшается и $K_{x,o}$, а

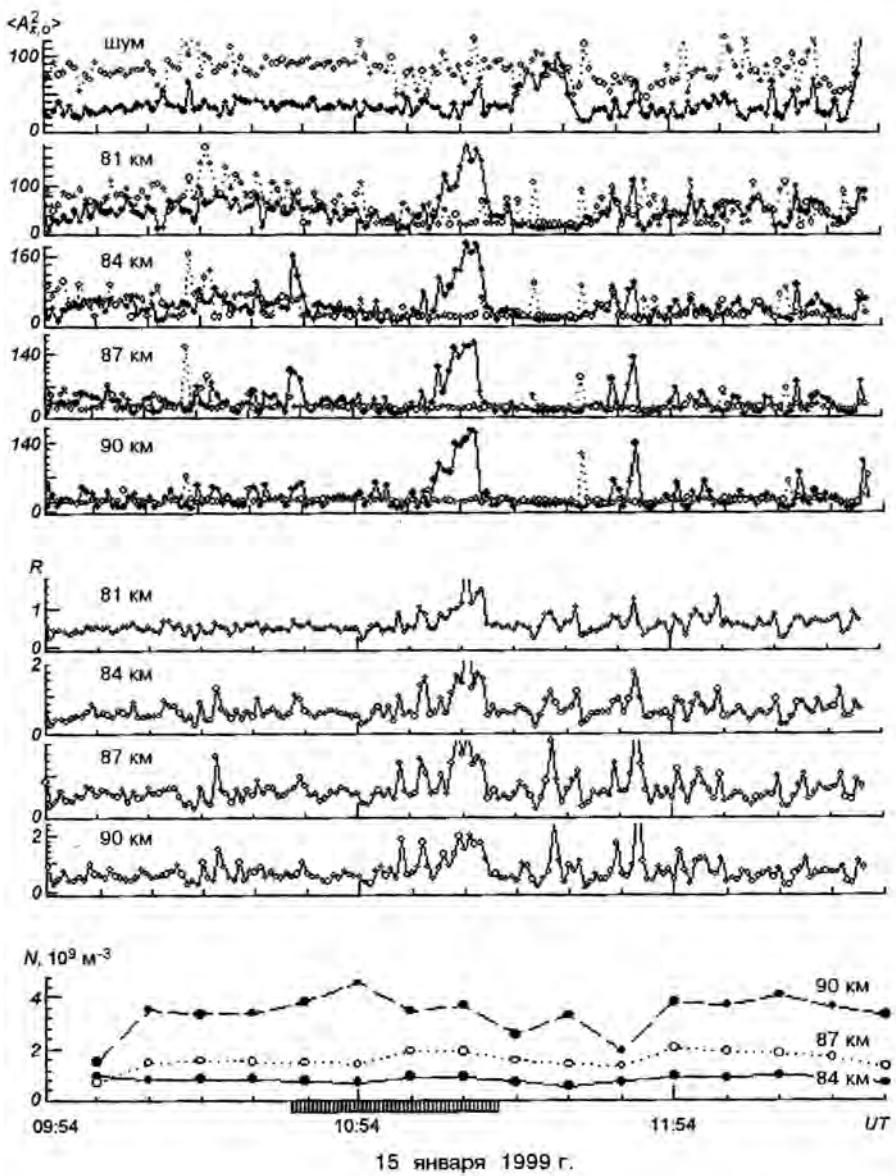


Рис. 6. То же, что и на рис. 5 для вспышки 15.01.1999 г.

следовательно, увеличивается R . Увеличение $\sigma_{x_0}^2$, как и $\sigma_{z_0}^2$, связано с усилением нестационарности среды после вспышки.

Увеличение электронной концентрации на высотах примерно 81–87 км, по-видимому, связано с резким увеличением потока рентгеновского излучения Солнца во время вспышки. Используя экспериментальные данные о временном изменении электронной концентрации, оценим изменение скорости образования электронов на этих высотах. Из уравнения баланса концентрации электронов в квази-

стационарном случае ($|dN/dt| \ll \alpha N^2$) имеем $q = \alpha N^2$, где q — скорость ионизации, α — эффективный коэффициент рекомбинации. Процессы переноса (ветер, амбиополярная и турбулентная диффузия) здесь не учитываются потому, что их характерные времена намного больше, чем $(\alpha N)^{-1}$. До вспышки $q_0 = \alpha_0 N_0^2$. Тогда, пренебрегая нагревом атмосферы, при $\alpha = \alpha_0$ имеем $N/N_0 = \sqrt{q/q_0}$. В этом случае, например, для эксперимента 18.03.1998 г. на высоте 81 км получено $N_0 \approx 0.4 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, $N \approx 0.7 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q/q_0 \approx 3.2$, а на

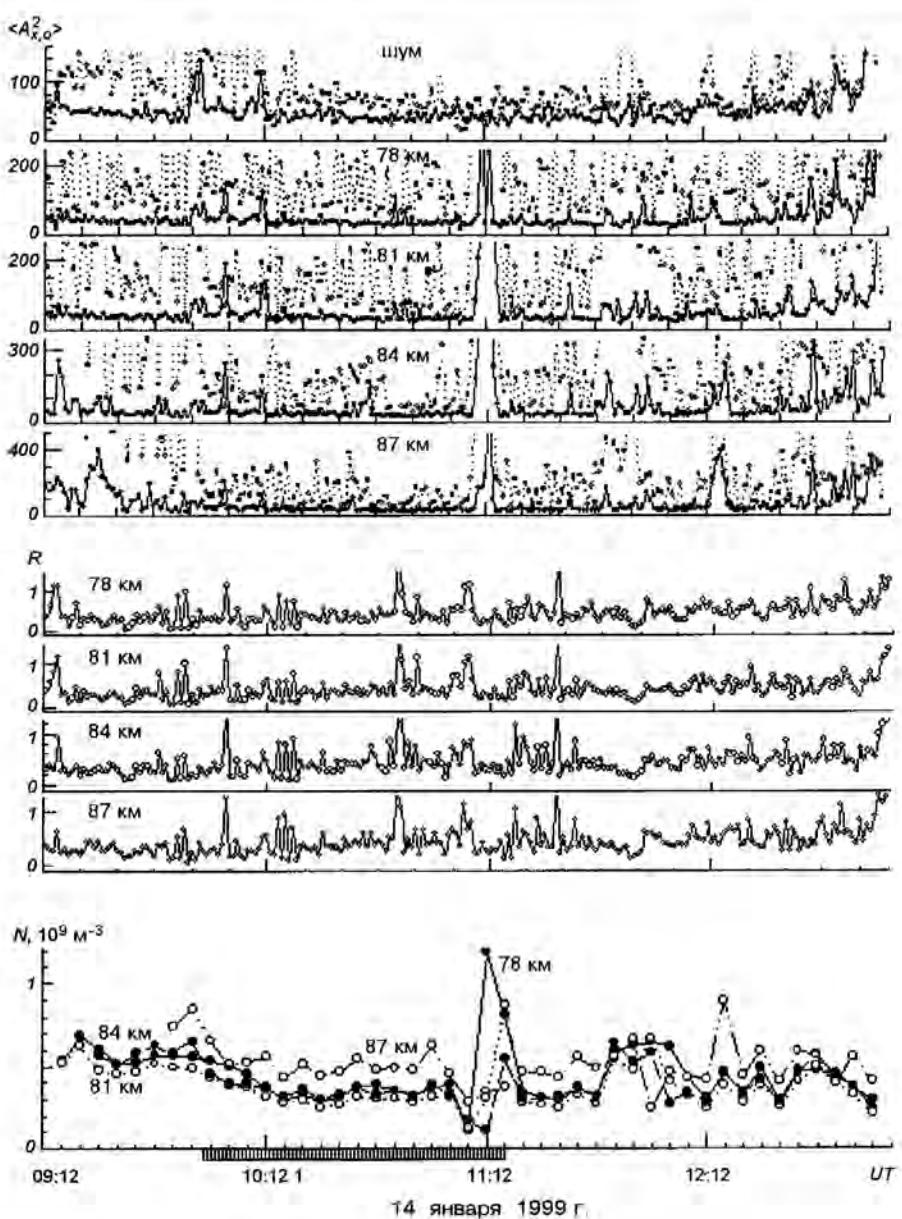


Рис. 7. То же, что и на рис. 5 для вспышки 14.01.1999 г.

высоте 84 км — $N_0 = 0.4 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$, $N = 10^9 \text{ м}^{-3}$, $q/q_0 \approx 5.5$.

Оптические вспышки. Поскольку рассматриваемые вспышки не относятся к типу сильных, то вероятность наличия потоков протонов во время этих событий невелика. Поэтому во время описываемых событий нами не обнаружено никаких особенностей в поведении ЧО-сигналов, радиошумов и концентрации электронов на высотах нижней части D-области ионосферы ($z < 78 \text{ км}$). Перечисленные

выше особенности, на наш взгляд, косвенно связаны с оптическими вспышками. Вероятно, во время таких вспышек в ряде случаев происходило увеличение потока рентгеновского излучения Солнца не вспышечного характера. Это и приводило к появлению отмеченных особенностей, которые в целом сходны с рассмотренными особенностями во время XRA (к сожалению, наблюдательных данных о потоках рентгеновского излучения в эти периоды нет).

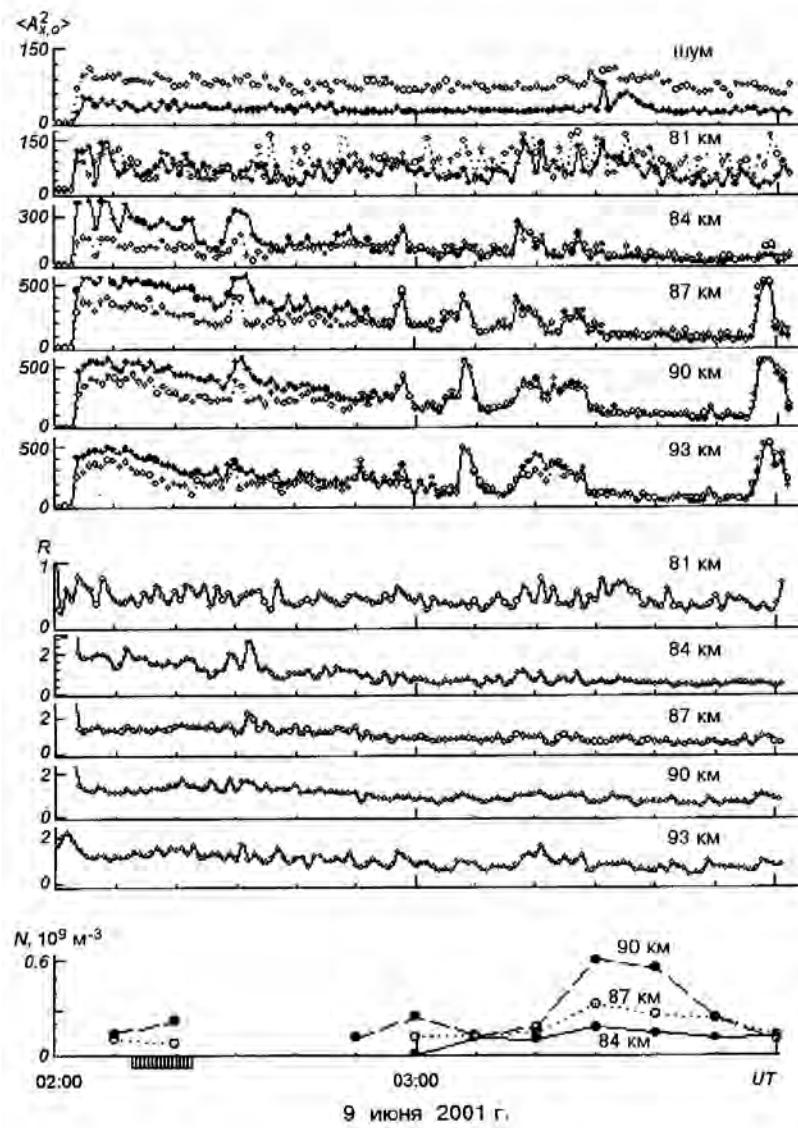


Рис. 8. То же, что и на рис. 5 для вспышек класса ERU 09.06.2001 г.

выводы

1. Экспериментально изучено и объяснено увеличение в единицы-десятки раз средних интенсивностей ЧО-сигналов в D-области ионосферы и изменений интенсивности радиошума, а также их дисперсий во время рентгеновских и слабых оптических вспышек.

2. Обнаружено и объяснено увеличение в единицы раз в эти периоды отношения средних интенсивностей необыкновенной и обычной поляризаций, а также их дисперсий.

3. Обнаружено увеличение на 50—100 % и более концентрации электронов в среднеширотной D-области на высотах 81—87 км в течение примерно 15—35 мин через 15—25 мин после рентгеновских вспышек, которые вызываются, по-видимому, увеличением потока рентгеновского излучения во время XRA. Изменения скорости ионизации составили $q/q_0 \approx 3—5$.

4. Во время оптических вспышек класса SF обнаружен ряд особенностей высотно-временного поведения статистических характеристик ЧО-сигналов, радиошумов и концентрации электронов в средне-

широкой D-области на высотах $z > 78$ км, которые часто сходны по характеру с особенностями во время XRA и поэтому, вероятно, обусловлены увеличением потока рентгеновского излучения не вспышечного характера во время ряда таких вспышек.

Авторы благодарят А. И. Гритчина за помощь в проведении экспериментов и К. П. Гармаша за предоставленную программу расчета концентрации электронов с применением метода регуляризации.

Работа выполнена при поддержке НТЦ Украины, проектные соглашения №№ 1772 и 1773.

1. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэрономия.—1996.—36, № 2.—С. 75—81.
2. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 348—360.
3. Кнут Р., Вюрцберг И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэрономия.—1976.—16, № 4.—С. 666—673.
4. Кнут Р., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Высыпание энергичных частиц во время бухтообразного возмущения среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия.—1977.—17, № 5.—С. 854—861.
5. Лаштовичка Я., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение короткулярного происхождения // Геомагнетизм и аэрономия.—1976.—16, № 6.—С. 1018—1025.
6. Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1983.—192 с.
7. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. — М.: Мир, 1977.—370 с.
8. Харгривс Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Введение в физику околоземной космической среды.

Перевод с английского под ред. А. Д. Данилова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982.—351 с.

9. Черногор Л. Ф. Возмущение неоднородной структуры в нижней ионосфере под действием мощного излучения // Изв. вузов. Радиофизика.—1985.—28, № 12.—С. 17—26.
10. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // Радиофизика и радиоастрономия.—1998.—3, № 2.—С. 191—197.
11. Feldman W. C., Symbalisty E. M. D., Roussel-Dupre R. A. Hard X ray survey of energetic electrons from low-Earth orbit // J. Geophys. Res.—1996.—101.—P. 5195—5209.
12. Gokov A. M., Tyrnov O. F. The lower ionosphere response to some phenomena related to events on the Sun // Proc. of the Intern. Symp. from solar corona through interplanetary space, into Earth's magnetosphere and ionosphere: Interball ISTP satellites, and ground-based observations. Session 1—IV. February 1—4, 2000. Kyiv. — Kyiv., 2000.—P. 141—144.
13. Gurevich A. V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. — New York: Springer-Verlag, 1978.—366 p.
14. Hargreaves J. K. The Solar-Terrestrial Environment. — New York: Cambridge Univ. Press, 1992.—420 p.
15. Tyrnov O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., et al. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere // Turk. J. Phys.—1994.—18.—P. 1260—1265.
16. Wayne M. McRae, Thomson N. R. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.—2004.—66, N 1.—P. 77—87.

THE RESPONSE OF THE IONOSPHERIC D REGION TO X-RAY AND OPTICAL FLARES AS OBSERVED BY PARTIAL REFLECTION TECHNIQUE AT MID-LATITUDES

A. M. Gokov, O. F. Tyrnov, L. F. Chernogor

A possible response of the middle latitude ionospheric D region to X-ray and optical flares is studied by the partial reflection technique. The parameters of partial reflection signals, radio noise, and electron density are found to display characteristic features that appear in 15—25 min after X-ray bursts and last for about 15—30 min. We give a possible physical interpretation of the results of the observations with taking into account X-ray emission rates.

I. I. Опачко

Ужгородський національний університет

Про можливість часопролітного мас-спектрометричного детектування корпускулярних потоків на космічних апаратах

Надійшла до редакції 10.12.04

Запропоновано систему мас-спектрометричного детектування корпускулярних потоків, у якій за відбивні екрані слугують конструктивні елементи космічних апаратів. Проведено оцінки ефективності системи, підтвердженні лабораторними модельними експериментами із застосуванням складових лазерної плазми.

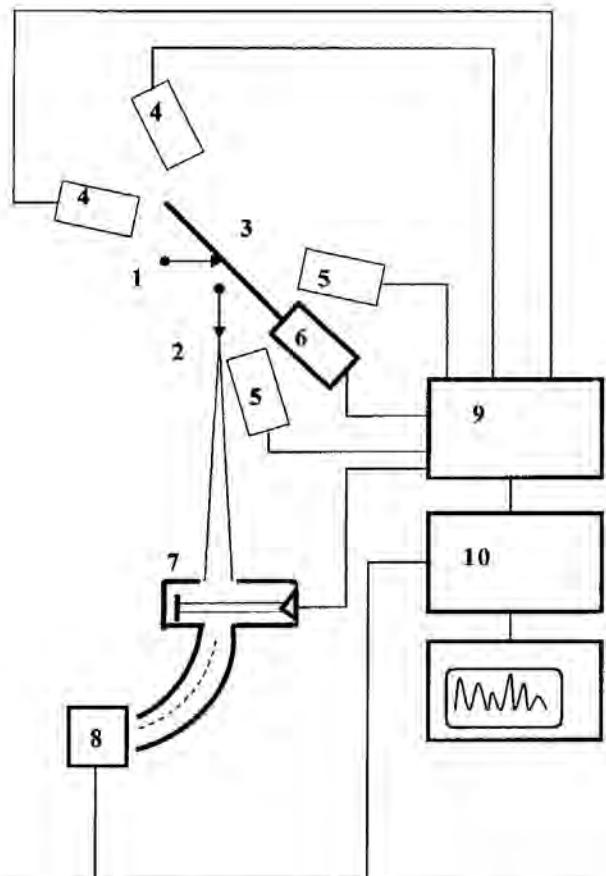
Політ космічних апаратів (КА) супроводжується неперервним бомбардуванням елементів їхніх конструкцій корпускулярними частками космічного випромінювання із швидкостями, що перевищують 300 км/с [2]. Ці частки несуть важливу інформацію про фізичні процеси, які проходять у глибині космічного простору, на Сонці і у верхніх шарах атмосфери Землі. Для реєстрації мікрочасток традиційно використовуються трекові індикатори, але вони не дають остаточної відповіді про маси та енергії частинок. Для розв'язання цієї задачі запропоновано систему, яка складається з відбивного (пропускного) екрана-мішені, за який можуть слугувати конструктивні елементи КА, наприклад панелі сонячних батарей або рамки з тонкими пілвками, і власне системи реєстрації часток, розміщеної на кінці гравітаційного стабілізатора (штанги) на відстані 5—10 м від екрана, що і складає дрейфовий простір часо-пролітного мас-спектрометра. Система зістикована з малогабаритним електростатичним селектором і бортовою системою обробки та реєстрації сигналу.

Запропонована система (рисунок) працює таким чином. При ударі мікрочастинки 1 космічного випромінювання із швидкістю 300 км/с, що відповідає енергії 10 еВ/нуклон в екрані 3 генерується черенковський акустичний сигнал тривалістю 1 нс, емітуються з поверхні електронні 1, як правило, виникає свічення наносекундної тривалості, які реєстру-

ються датчиками 4—6. Ці сигнали запускають таймер 9 реєстраційного пристрою (хоча пристрій може запускатись і від іонного сигналу, що відповідає легким компонентам матеріалу екрана (H^+ , C^+). Як екран доцільно застосовувати панелі сонячних батарей. Відбиті чи пропущена через екран частка 2 пролітає дрейфову відстань до детектора, який може розміщуватись на штанзі гравітаційного стабілізатора, за 3—30 мкс у залежності від швидкості. На вході детекторів нейтральні частки іонізуються імпульсним електронним пучком 7 і попадають в електростатичний селектор, на виході якого детектуються вторинним електронним помножувачем 8. Таким чином, система є безмагнітним часопролітним мас-спектрометром, сполученим з електростатичним аналізатором.

Затримка сигналу з детектора відносно сигналу з датчиків на екрані пропорційна до $Lm^{1/2}$, де L — відстань від екрана до детектора, m — маса частки. Це дає можливість визначити масу частки та її енергію, причому верхньої межі реєстрованих мас практично немає. Є можливість накопичувати інформацію впродовж багатьох актів взаємодії часток з екраном.

Оцінимо чутливість та ефективність запропонованої системи. Відбиті (розсіяні) від екрана частки попадають в електростатичний селектор [4], попередньо іонізуючись стрічковим електронним пучком довжиною $l = 10$ см з щільністю $j = 0.1 \text{ A/cm}^2$.



Аналізатор корпускулярного потоку: 1 — налітаюча частка, 2 — розсіяна частка, 3 — екран, 4 — ВЕП, 5 — ФЕП, 6 — акустичний датчик, 7 — електронний іонізатор, 8 — детектор іонів з електростатичним аналізатором, 9 — таймер, 10 — система реєстрації та обробки сигналу, 11 — вихідний пристрій

При цьому ступінь іонізації α [1] складає

$$\alpha = Q \frac{j}{e} \frac{l}{v} = 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4},$$

де $Q \approx 10^{-16} \dots 10^{-15} \text{ см}^2$ — переріз іонізації атомів

(молекул) електронним пучком, e — заряд електрона, $V \approx 3 \cdot 10^7 \text{ см}/\text{с}$ — швидкість часток.

Нижню межу ефективності η реєстрації відбитої від екрана частки можна оцінити виразом

$$\eta = \alpha \cdot S / L^2 = 2 \cdot 10^{-9},$$

де $S \approx 1 \text{ см}^2$ — вхідна апертура детектора, $L \approx 5 \text{ м}$ — відстань від екрана до детектора.

Така ефективність дає можливість реєструвати потоки часток з концентрацією $N = 1 \dots 10 \text{ см}^{-3}$.

Було проведено моделювання системи реєстрації в лабораторних умовах. Корпускулярні частки (атоми, молекули, кластери), які емітувалися при дії лазерного випромінювання наносекундної тривалості (Nd^{3+} та ексимерний лазери) [3] густиною потужності $1 \dots 10 \text{ ГВт}/\text{см}^2$ на прості та багатокомпонентні твердотільні мішенні, реєструвались електростатичним селектором. В наших лабораторних умовах створена система із залишковим вакуумом $P = 0.1 \dots 1 \text{ мПа}$. Дрейфовий простір складав $L = 1 \dots 3 \text{ м}$.

1. Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. — М.: Наука, 1973.—102 с.
2. Гибсон Э. Спокойное Солнце. — М.: Мир, 1977.—308 с.
3. Опачко І. І. Особливості інтегральної емісії компонентів лазерної плазми // Вісник Ужгородського ун—ту.—2000.—6.—С. 46—50.
4. Опачко І. І. Часово-пролітний мас-спектрометр // Опис до патенту України. Заявка № 200031618 від 22.03.2000.

ON POSSIBILITY OF TIME-OF-FLIGHT DETECTION OF CORPUSCULAR CURRENTS ABOARD SPACE VEHICLES

I. I. Opachko

Mass-spectrometer detection of corpuscular currents in the function of reflecting shields of space vehicle constructive elements is offered. Estimation of system efficiency is performed and confirmed by laboratory model experiments with the use of laser plasma ingredients.

УДК 528.88.04:551.4

В. І. Лялько, О. І. Сахацький, З. М. Шпорюк, О. М. Сибірцева

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Оцінка точності результатів топографічної корекції даних космозйомки гірських територій в залежності від точності цифрової моделі рельєфу

Надійшла до редакції 29.11.04

Показано вплив точності цифрових моделей рельєфу на коефіцієнт топографічної корекції даних сенсора ETM⁺ супутника «Landsat-7» і результати класифікації рослинного покриву. Встановлено межу застосовності методу топокорекції в залежності від кута падіння сонячних променів і двосторонньо оцінку коефіцієнта корекцій.

При тематичній інтерпретації даних космозйомки гірських районів особливо актуальним є врахування впливу рельєфу, який вносить спотворення у величини спектральних характеристик земної поверхні, що реєструються сенсорами космічних апаратів. Усунення цих спотворень здійснюється за допомогою топографічної корекції даних космозйомки, яка є одним із найважливіших етапів у технологічному циклі обробки даних ДЗЗ.

Оскільки точність топокорекції залежить від цифрової моделі рельєфу, ми оцінили залежність точності топографічної корекції даних космозйомки гірських територій від точності цифрової моделі рельєфу. У запропонованому методі топографічної корекції даних багатозональних космознімків гірських територій [1, 4] коефіцієнт корекції для кожного піксела зображення обчислювався як величина відношення косинуса зенітного кута Сонця на момент зйомки до косинуса кута падіння сонячного променя на земну поверхню. Як відомо, кут падіння сонячного променя залежить від кутів нахилу і напрямку схилу земної поверхні, обчислення яких можна здійснити, якщо існує відповідна цифрова модель рельєфу DEM [3].

Мета даного дослідження — оцінка впливу точності побудови DEM на величину коефіцієнта топографічної корекції і на результати класифікації лісового покриву одного із гірських районів Сибіру за даними сенсора ETM⁺ супутника «Landsat-7» [2].

На рис. 1 наведено фрагмент знімка сенсора ETM⁺ КА «Landsat-7» від 10 вересня 2000 р., на якому прямокутником позначено тестову ділянку, для зображення якої здійснювалась топографічна корекція з використанням даних двох цифрових моделей рельєфу (DEM), заданих з різною початковою точністю, з подальшою класифікацією лісового покриву.

Тестова ділянка розташована в межах Єрмаковського полігону у гірському районі Західних Саян на півдні Сибіру. Територія ділянки обмежена координатами $92^{\circ}48'57''$ — $92^{\circ}52'44''$ с. д. і $53^{\circ}02'52''$ — $53^{\circ}00'56''$ північної широти. Зображення тест-ділянки містить 151×123 піксели. За даними супровідного файлу до космознімка на час зйомки висота Сонця дорівнювала $39^{\circ}36'$, азимут 157° (для знімків «Landsat-7» азимут вважається додатним при відліку від точки півночі в напрямку руху годинникової стрілки).

За двома наборами початкових даних побудовано дві цифрові моделі рельєфу тест-ділянки DEM1 (рис. 2, а) і DEM2 (рис. 2, б). Суміщення початкових даних із космознімком здійснювалося за допомогою програмних продуктів ERDAS Imagine. DEM1 побудовано за початковими даними фірми ATDI, заданими з точністю 500 м, а DEM2 — за початковими даними, заданими з точністю 90 м (дані архіву геологічної служби США). Щоб отримати значення висот рельєфу для кожного піксела

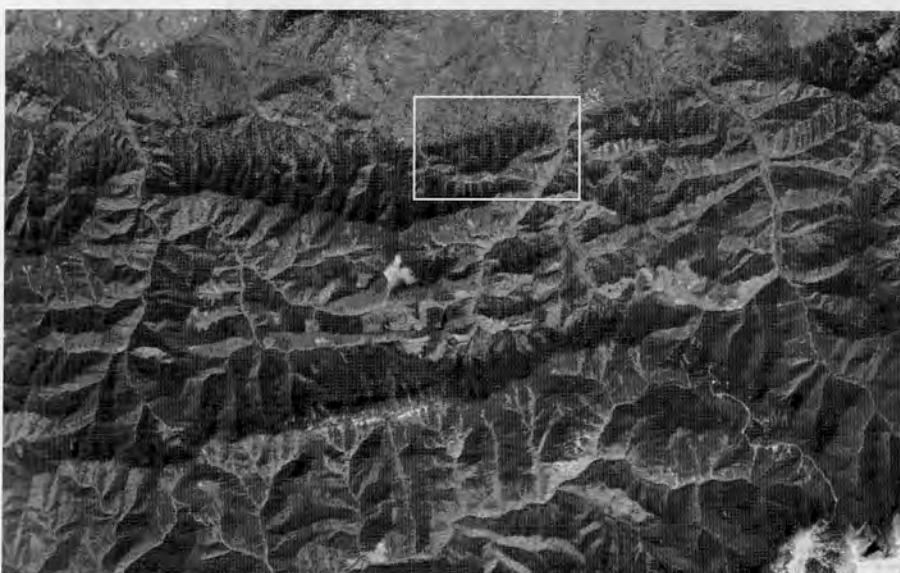


Рис. 1. Фрагмент знімка «Landsat-7» (10.09.2000 р.) в межах Єрмаковського полігону. Білим прямокутником виділено тестову ділянку для дослідження

зображення тест-ділянки, просторова розрізненість якого 30 м, виконано білінійну інтерполяцію початкових даних цифрових моделей для приведення розміру їхніх растрів до 30 м.

Зіставлення двох моделей DEM1 і DEM2 свідчить про те, що DEM1 згладжує малі форми рельєфу, але протяжні гірські хребти та схили, міжгірські западини та долини гірських рік досить добре відображаються і можуть служити основою для визначення топографічних характеристик місцевості і коефіцієнтів корекції. Краща точність моделі DEM2 дозволяє відтворити малі форми рельєфу, які були згладжені на DEM1, зокрема невеликі западини протяжністю до 500 м із нахилами схилів, які відрізняються від нахилів DEM1. Для відповідних пікселів зображення зміна кутів нахилу і напрямку схилу викликає зміну величини кута падіння сонячних променів і коефіцієнта корекції [1, 4].

Використовуючи дані DEM1 і DEM2, для кожного піксела зображення тест-ділянки за формулами, наведеними в [3—4], обчислено локальні кути нахилу і азимуту земної поверхні та кути падіння сонячних променів.

Поправка у спостережені цифрові покази значень спектральної яскравості DN сенсора ETM⁺ для кожного піксела зображення у оптичному та близькому інфрачервоному діапазонах обчислювалася за формулою

$$DN_b = k \cdot DN,$$

де DN_b — відкориговане значення спектральної яскравості, k — коефіцієнт корекції. За запропонованим нами методом [1, 4] топографічної корекції,



Рис. 2. Цифрові моделі рельєфу DEM тест-ділянки, побудовані за різними початковими даними. Темний колір презентує малі підвищення, світлий — високі; *a* — DEM1 (точність початкових даних 500 м), *b* — DEM2 (точність початкових даних 90 м)

коефіцієнт корекції для кожного піксела зображення обчислюється за формулою

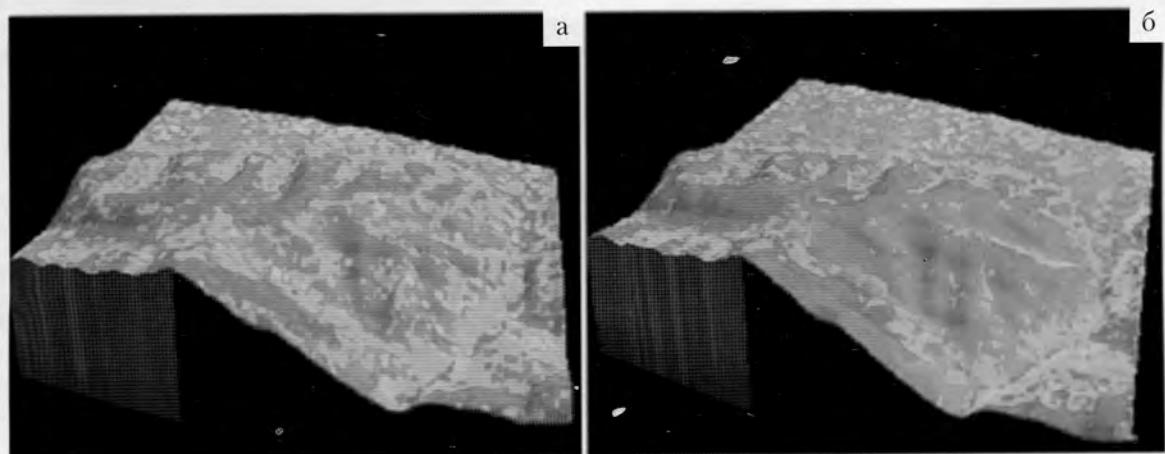
$$k = \cos\Theta_s / \cos i, \quad (1)$$



Рис. 3. Фрагмент класифікованого знімка «Landsat-7» (ділянка детальних досліджень): а — без топографічної корекції, б — після топокорекції з використанням даних DEM1



Рис. 3. (закінчення): в — після топокорекції з використанням даних DEM2

**Умовні позначення**

- ялиця
- темнохвойні ліси з домішками листяних
- темнохвойні ліси, розрідженні

- змішані ліси з перевагою ялиці
- листяні ліси з перевагою осики
- листяні ліси з перевагою берези

Рис. 4. Тривимірні зображення фрагменту класифікованого знімка без топокорекції (а) і з топокорекцією (б)

де Θ — зенітна висота Сонця на час космознімання, i — кут падіння сонячних променів на елемент поверхні DEM1 (або DEM2), який відповідає пікселу зображення.

Зіставлення результатів обчислень топографічних характеристик поверхні показало, що максимальне значення кута нахилу схилів за даними DEM2 дорівнює 35° , а за даними DEM1 — 26° . Обчислене за даними DEM2 мінімальне значення косинуса кута падіння сонячних променів $\min \cos i = 0.276$, а відповідне йому максимальне значення коригуючого множника збільшилося до 3.6, в той час як для даних DEM1 воно не превищувало 2.

З метою оцінки впливу топографічної корекції на результати подальшої класифікації лісового покриву тест-ділянки проведено такий експеримент. Використовуючи зовсім однакові ділянки для навчання і метод найбільшої вірогідності, проведено класифікацію рослинного покриву визначеного фрагмента знімка «Landsat-7» за трьома типами даних: за даними без топографічної корекції і з корекцією, виконаною з використанням коригуючих коефіцієнтів, обчислених за даними моделей DEM1 і DEM2. Результати класифікації наведено на рис. 3.

В результаті класифікації виділено шість типів лісового покриву. Зіставлення результатів класифікації з даними опису наявного складу лісів на тест-ділянці показало, що найбільші відмінності в класифікації спостерігаються на схилах, звернених до Сонця, і западинах, які не знайшли свого відображення в DEM1. Класифікація без корекції даних у високогірній частині (рис. 3, а) не відповідає даним опису, оскільки листяні ліси з перевагою осики не можуть рости на висотах, більших за 760 м. При зіставленні з наземними даними результатів класифікації лісового покриву за космознімком «Landsat-7», здійснених без проведення корекції та із проведеним топокорекції на основі двох DEM, побудованих із різною початковою точністю, найбільш точною виявилась класифікація з використанням DEM2 (початкова точність 90 м). Результати класифікації із застосуванням топографічної корекції з використанням DEM1 (рис. 3, б), краще узгоджуються із наземними даними у високогірній частині ділянки, але дають неточні результати на схилах, де є невеликі западини. Класифікація, проведена за даними, відкоригованими з використанням DEM2, (рис. 3, в) найкраще відповідає наземним завірковими даним.

На рис. 4 наведено класифіковані тривимірні зображення фрагмента космознімка досліджуваної ділянки без корекції і з топографічною корекцією, виконаною за даними DEM2.

ВИСНОВКИ

Для покращення класифікації рослинного покриву за даними космознімків сенсора ETM+ KA «Landsat-7» гірських територій необхідна топографічна корекція цих даних, яку можна здійснити за наявності відповідної цифрової моделі рельєфу DEM. Точність запропонованого методу топографічної корекції суттєво залежить від точності побудови DEM. Як показали наші дослідження результатів класифікацій лісового покриву за космознімком «Landsat-7», здійснених без топокорекції та із застосуванням топокорекції на основі двох DEM, побудованих з різною початковою точністю (500 м і 90 м), при зіставленні з наземними даними, точнішою є класифікація з використанням DEM2 (початкова точність — 90 м).

Запропонований метод топокорекції застосовний тільки для добре освітлених територій, для яких кут падіння сонячних променів не перевищує 70° . Встановлено двосторонні обмеження на коефіцієнт корекції $\cos \Theta_s \leq k \leq 2$. Піксели, для яких ця умова не виконується, повинні бути класифіковані окремо.

- Лялько В. І., Сахацький О. І., Шпортиuk З. М., Сибирцева О. М. Застосування методу топографічної корекції даних багатозональних космознімків для класифікації лісового покриву гірських територій // Космічна наука і технологія. — 2003. — № 2/3. — С. 94—98.
- Лялько В. І., Сахацький О. І., Шпортиuk З. М., Сибирцева О. М. Оцінка точності результатів топографічної корекції даних космознімків гірських територій в залежності від точності цифрової моделі рельєфу // Четверта Українська конференція по косміческим исследованиям: Сб. тез. — Крим. Понизовка, 19–26 вересня, 2004. — Київ, 2004. — С. 147.
- Сахацький О. І., Сибирцева О. М., Шпортиuk З. М. Комбінація цифрової моделі рельєфу із зображеннями «Landsat-7» для визначення топографічних характеристик місцевості з метою проведення радіометричної корекції // Космічна наука і технологія. — 2002. — № 8. — С. 89—91.
- Шпортиuk З. М., Сибирцева О. М. Метод топографічної корекції даних багатозональних космознімків для класифікації лісового покриву гірських територій // Доп. НАН України. — 2004. — № 1. — С. 123—125.

ESTIMATION OF THE TOPOGRAPHIC CORRECTION ACCURACY FOR SATELLITE DATA ON MOUNTAIN REGIONS IN RELATION TO THE DIGITAL ELEVATION MODEL ACCURACY

V. I. Lyalko, O. I. Sakhatskyi, Z. M. Shportyuk,
O. M. Sybirtseva

We present the effect of the digital elevation model accuracy on the topographic correction coefficient for Landsat ETM+ data and the results of vegetation canopy classification. The limit of application of the topocorrection method are determined in relation to radiation incident angle. Two estimates of correction coefficient are found.

А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук, Е. Н. Боднар, З. В. Козлов

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Оценка эффективности космических систем ДЗЗ на основе метода анализа иерархий

Надійшла до редакції 26.01.05

Обгрунтowується методика оцінки ефективності космічних систем ДЗЗ за допомогою методу аналізу ієрархій. На прикладі порівняння космічних систем з одним космічним апаратом і супутникового уgroupовання малих апаратів показана можливість вибору перспективного варіанту космічної системи для вирішення тематичних задач ДЗЗ.

Эффективность дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при решении тематических задач научно-прикладной программы в значительной мере зависит от обоснованности выбора структуры космической системы (КС) ДЗЗ и параметров бортовой регистрирующей аппаратуры. При этом могут использоваться как большие космические аппараты (КА) с аппаратурой зондирования земной поверхности в оптическом и радиодиапазонах спектра, так и орбитальные группировки, состоящие из нескольких малых КА, оснащенных аналогичной регистрирующей аппаратурой, распределенной по разным КА. Так, например, возможен выбор КС ДЗЗ, состоящей из одного КА типа «Січ» или из орбитальной группировки микроспутников.

Поскольку каждому из альтернативных вариантов присущи свои достоинства и недостатки, принимать решение о выборе того или иного варианта КС для решения конкретных задач ДЗЗ достаточно проблематично. Цель данной статьи заключается в обосновании выбора варианта КС ДЗЗ путем сопоставления и оценки их эффективности в единой критериальной шкале.

Проблема заключается в том, что оценка эффективности альтернативных вариантов КС ДЗЗ не может ограничиться одним показателем, а носит довольно сложный характер, требующий многокритериальной оптимизации на базе имитационных моделей [3]. Сопоставление параметров вариантов КС ДЗЗ не по абсолютным значениям, а по степени относительной предпочтительности по каждому параметру дает возможность применить для решения этой проблемы формализованный аппарат метода анализа иерархий [1]. Основная проблема состоит

в декомпозиции КС ДЗЗ на более простые составляющие, т. е. в формировании последовательности суждений экспертов о приоритетности нормируемых характеристик с точки зрения их влияния на суммарную эффективность. Этот метод предполагает последующую обработку суждений экспертов путем вычисления частных и глобальных приоритетов. Для получения указанных векторов приоритетов строится множество матриц парных сравнений по каждой составляющей данного иерархического уровня и производится оценка векторов приоритетов с точки зрения степени их влияния на составляющие предшествующего уровня.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее ответственным этапом является построение иерархии суждений между первым и последним уровнями. Задача первого уровня заключается в формулировании цели, которая должна быть достигнута в результате получения информации ДЗЗ.

Система приоритетов в рассматриваемой задаче может быть представлена следующей иерархической системой критериев сравнения альтернативных вариантов КС ДЗЗ (рисунок). На нулевом уровне находится эффективность системы «космическая информация ДЗЗ — экономика и экобезопасность Украины». На первом уровне находятся основные отрасли — потребители космической информации ДЗЗ, которые обеспечивают эффективность выполнения главной задачи и должны быть оценены по отношению к критерию нулевого уровня. На втором уровне представлены тематические

Уровень 0 Эффективность системы "Космическая информация Д33 – экономика и экобезопасность Украины"

Уровень 1		Сфера деятельности			
1.1 Сельское хозяйство	1.2 Экологический мониторинг	1.3 Поиск полезных ископаемых	1.4 Лесоводство	1.5 Геодезия и картография	1.6 Национальная безопасность

Тематические задачи различных сфер деятельности, при решении которых используется космическая информация Д33					
2.1.1. Определение площадей сельхокультур	2.2.1. Оценка экологического состояния ландшафтов Украины	2.3.1. Поиск полезных ископаемых	2.4.1. Определение с видом его изменения во времени	2.5.1. Составление и обновление топографических карт	2.6.1. Оценка масштабов подтопления и паводков
2.1.2. Оценка всхожести сельхокультур	2.2.2. Оценка фитосанитарного состояния растений озимой пшеницы	2.3.2. Поиск нефти и газа на шельфе	2.4.2. Выявление участков леса, пораженных различными вредителями	2.5.2. Картографирование изменений топографии	2.6.2. Контроль процессов эрозии и образования берегов, сдвиговых явлений и селевых явлений
2.1.3. Прогноз урожайности озимой пшеницы	2.2.3. Оценка всхожести растений, пораженных радионуклидами и металами	2.3.3. Поиск нефти и газа на суше	2.4.3. Оценка пожароопасности растительного покрова	2.5.3. Топографическая съемка подготовки космических снимков	2.6.3. Выявление наличия радионуклидов и тяжелых металлов в растительности
2.1.4. Выявление растений, содержащих влагу в растениях	5. Оценка содержания влаги в растениях		2.4.4. Составление планов населенных пунктов, промышленных объектов	2.5.4. Определение размеров земельных участков и водотоков	2.6.4. Определение размеров водотоков

Группы показателей эффективности системы "Космическая информация Д33 – экономика и экобезопасность Украины"			
3.1. Характеристики космических изображений	3.2. Экономические критерии	3.3. Социальные критерии	3.4. Критерии обеспечения задач национальной безопасности

Показатели эффективности КС Д33 по группам			
Уровень 4	Уровень 5	Уровень 5	Уровень 5
A. Космическая система типа Сич-1М	B. Группировка микропутников	C. Варианты космических систем Д33	D. Критерии научно-технического развития

Иерархическая система критериев сравнения альтернативных вариантов космических систем Д33. Составляющие группы показателей эффективности космических систем Д33 (уровень 4) приведены в тексте

задачи различных сфер деятельности, при решении которых используется информация ДЗЗ. На третьем уровне находятся группы показателей эффективности космических систем ДЗЗ, по которым производится оценка выполнения задач рассматриваемых отраслей.

Составляющие каждой из групп показателей эффективности (уровень 3) образуют четвертый уровень иерархии, для которого мы для лучшей читаемости рисунка даем вербальное описание уровня. Так, для *характеристик* космических изображений основными являются пространственное разрешение, спектральное разрешение, частота просмотра, размер кадра на местности, оперативность поступления данных для обработки к потребителям, точность данных наблюдения поверхности Земли. Среди экономических критериев наиболее существенными являются объем увеличения продажи продукции, объем уменьшения производственных затрат, уменьшение затрат по сравнению с традиционными методами получения информации.

Важными являются *социальные* критерии, среди которых необходимо отметить степень влияния отрасли ДЗЗ на решение проблемы занятости населения, на повышение уровня квалификации потребителей, на повышение общего научного уровня общества и на развитие региональной инфраструктуры.

К *экологическим* критериям можно отнести меру использования данных ДЗЗ для фиксации изменений экосостояния окружающей среды, решение задач экологического мониторинга, улучшение экосостояния, степень решения проблем загрязнения окружающей среды.

Критериями *научно-технического* развития являются уровень выполненных разработок аппаратуры ДЗЗ, соответствие данных ДЗЗ требованиям пользователей, масштаб использования данных ДЗЗ, степень интеграции данных ДЗЗ в другие отрасли, степень достижения цели в проектах использованными методами.

Пятым уровнем являются варианты космических систем ДЗЗ, среди которых рассматриваются две альтернативы: «А» — космическая система из аппаратов типа «Сич-1М» и «В» — группировка микроспутников.

Закон иерархической непрерывности требует, чтобы элементы нижнего уровня иерархии были сравнимы попарно по отношению к элементам следующего уровня, вплоть до вершины иерархии. При этом сопоставляемые варианты КС ДЗЗ должны оцениваться по совокупности своих «надсистемных» показателей.

Задача оценки эффективности КС ДЗЗ решается в два этапа: во-первых, создание единой балльной системы приоритетов экспертов и, во-вторых, полу-

чение в этой шкале количественных оценок показателей функционирования сопоставляемых вариантов КС ДЗЗ. Важным моментом является возможность лишь относительного сопоставления параметров альтернативных вариантов, т. е. сопоставления их не по ожидаемым абсолютным значениям, а по степени предпочтительности по каждому параметру.

На первом этапе может быть применена такая шкала относительной важности при парном сравнении характеристик [1]: 1 — равная важность характеристики, 3 — умеренное предпочтение одной характеристики другой, 5 — существенное превосходство, 7 — значительное превосходство, 9 — несопоставимое превосходство, 2, 4, 6, 8 — промежуточные решения.

На втором этапе, когда рассматриваемая проблема представлена иерархически, составляется матрица для сравнения влияния сфер деятельности первого уровня иерархии на нулевой уровень в соответствии с используемой шкалой предпочтений. Подобные матрицы должны быть построены для парных сравнений каждой альтернативы на втором уровне по отношению к общей цели на первом уровне и т. д. Клетки матриц заполняются оценками, суждениями эксперта или их группы об относительной важности сравниваемых отдельных элементов по отношению к цели или критерию, обозначенному на более высоком уровне, в соответствии с приведенной выше шкалой оценок.

Матрица парных сравнений имеет вид [2]:

$$\begin{array}{ccccc} A_1 & A_2 & \dots & A_n \\ A_1 & \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ & \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_n & \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{array}$$

где A_i — элементы, составляющие уровень, $\frac{w_a}{w_b}$ — отношение абсолютных приоритетов w_a , w_b .

Для удобства представления дальнейших рассуждений матрицы парных сравнений, которые всегда являются квадратными и обратно симметричными, запишем в виде

$$||a_{ij}||, \quad a_{ii} = 1/a_{ij},$$

где $i, j = 1, \dots, n$ — число критериев, сравниваемых на каждом уровне.

Далее вычисляются компоненты собственного вектора матрицы

$$a_1 = \left(\prod_{j=1}^n a_{1j} \right)^{1/n}, \dots, \quad (1)$$

$$a_n = \left(\prod_{j=1}^n a_{nj} \right)^{1/n}.$$

Из полученных групп матриц определяются нормальные оценки вектора локальных приоритетов:

$$K_1 = a_1 / \sum a_i, \dots, \quad (2)$$

$$K_n = a_n / \sum a_i.$$

После того как компоненты собственного вектора получены для всех n строк матрицы в соответствии с выражениями (1), становится возможным их использование для дальнейших вычислений.

Одновременно с матрицей парных сравнений выполняется оценка степени отклонения от согласованности полученных локальных приоритетов путем вычисления индекса согласованности (ИС). Индекс согласованности в каждой матрице и для всей иерархии может быть приближенно вычислен по формуле

$$\text{ИС} = \left(\sum_{i=1}^n K_i \sum_{j=1}^n a_{ij} - n \right) / (n - 1). \quad (3)$$

Эта величина сравнивается с той, которая получилась бы при случайному выборе количественных суждений. Если разделить ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка, получим отношение согласованности (ОС).

Метод анализа иерархий позволяет сконструировать необходимую целевую функцию и оценить степень влияния на нее каждой из характеристик исследуемой системы. Если получены все необходимые весовые коэффициенты, то формула свертки обобщенного критерия для сравниваемых вариантов имеет вид

$$F = \sum K_1^1 \sum K_2^2 \sum K_3^3 \sum K_p^4 \cdot x_p^s, \quad (4)$$

где верхний индекс критериального приоритета обозначает уровень иерархии, x_p^s — коэффициент предпочтительности варианта p по показателю s . Значения F позволяют установить предпочтительность того или иного альтернативного варианта системы по всей совокупности анализируемых факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Метод анализа иерархий был реализован в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины в программной среде Microsoft Excel, с помощью которой были выполнены исследования эффективности системы «космическая информация ДЗЗ — экономика и экобезопасность Украины».

В качестве примера выбора варианта КС ДЗЗ были последовательно исследованы две упрощенные иерархические системы. Для первой системы в качестве сферы деятельности (уровень 1) были рассмотрены: лесоводство и городское хозяйство, а для второй — экологический мониторинг и национальная безопасность. Сопоставляя попарно альтернативы, эксперт задает систему предпочтений между элементами уровня, присваивая каждой из них определенный балл в шкале относительной значимости. В результате система предпочтений представляется квадратной матрицей размерностью 2×2 (табл. 1). Обработка матриц четырех уровней в соответствии с выражениями (1) и (2) дает возможность вычислить вектор приоритетов K^1, K^2, K^3 и K^4 соответствующих уровней (правый столбец таблиц), компоненты которого определяют их приоритеты с точки зрения эксперта. Для выполнения условий согласованности в матрицах попарных сравнений используются обратные величины $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

Ниже рассмотрим реализацию первой упрощенной системы «космическая информация ДЗЗ — экономика и экобезопасность Украины», включающей лесоводство и городское хозяйство. Построим матрицу для сравнения влияния сфер деятельности первого уровня иерархии на нулевой уровень (табл. 1). Обработка матрицы в соответствии с выражениями (1) и (2) дает возможность вычислить вектор приоритетов (правый столбец таблиц), компоненты которого определяют их вероятность с точки зрения эксперта.

Из тематических задач, обеспечивающих первый уровень, исследуем задачи: 2.4.1—2.4.3 и 2.9.1—2.9.3. Выполняя процедуру аналогично предыдущей, получим систему предпочтений, которая представляется двумя квадратными матрицами размерностью 3×3 (табл. 2 и 3).

Определив, таким образом, вектор приоритетов второго уровня, формируются векторы третьего уровня. В рассматриваемом примере для сокращения приводится только одна матрица размерностью 2×2 (из шести) для задачи определения видового состава лесов и его изменений во времени (табл. 4).

Построение шкалы балльных оценок завершается определением критериальных приоритетов X на уровне 4 (степень влияния параметров КС ДЗЗ на регистрацию информативных признаков тематиче-

Таблица 1. Матрица попарных сравнений 1-го уровня

Отрасли	Лесоводство	Городское хозяйство	K_i^1
Лесоводство	1	3	0.667
Городское хозяйство	1/3	1	0.333

Таблица 2. Матрица попарных сравнений 2-го уровня для лесоводства

№	2.4.1	2.4.2	2.4.3	K_m^2
2.4.1	1	1/5	1/7	0.075
2.4.2	5	1	1/2	0.333
2.4.3	7	2	1	0.592

Таблица 3. Матрица попарных сравнений 2-го уровня для городского хозяйства

№	2.9.1	2.9.2	2.9.3	K_m^2
2.9.1	1	1/5	1/2	0.117
2.9.2	5	1	4	0.683
2.9.3	2	1/4	1	0.2

Таблица 4. Матрица попарных сравнений 3-го уровня для задачи 2.4.1. Определение видового состава лесов

	3.1. Характеристики космических изображений	3.5. Экологические критерии	K_p^3
3.1. Характеристики космических изображений	1	3	0.667
3.5. Экологические критерии	1/3	1	0.333

ских задач). Эти оценки имеют значения, представленные в табл. 7.

Для всех матриц парных сравнений (табл. 1–6) были вычислены индекс согласованности и отношение согласованности, значения ОС приведены в табл. 8.

В случае, если ОС составляет не более 10–15 %, полученные значения K_i считаются достаточно согласованными, в противном случае эксперту следует тщательно проверить и уточнить назначенные им предпочтения.

Таким образом, получены все необходимые весовые коэффициенты для обобщенного критерия в виде свертки (4) для сравниваемых вариантов A и B в первой упрощенной системе. В обобщенном критерии F первый уровень соответствует принятию решения по всем векторам целевых приорите-

Таблица 5. Матрица попарных сравнений 4-го уровня для характеристик космических изображений

Характеристики космических изображений	4.1.1 Видимый диапазон спектра 0.5–1.1 мкм	4.1.2 ИК-диапазон спектра 10–12 мкм	4.1.3 Радиодиапазон	4.1.4 Пространственное разрешение	K_p^4
4.1.1 Видимый диапазон спектра 0.5–1.1 мкм	1	2	3	1/2	0.272
4.1.2 ИК-диапазон спектра 10–12 мкм	1/2	1	2	1/3	0.157
4.1.3 Радиодиапазон	1/3	1/2	1	1/5	0.088
4.1.4 Пространственное разрешение	2	3	5	1	0.483

Таблица 6. Матрица попарных сравнений 4-го уровня для экологических критериев

Экологические критерии	4.5.1 Фиксация экосостояния по данным ДЗЗ	4.5.2 Решение задач экологического мониторинга	K_p^4
4.5.1 Фиксация экосостояния по данным ДЗЗ	1	2	0.667
4.5.2 Решение задач экологического мониторинга	1/2	1	0.333

Таблица 7. Таблица критериальных приоритетов X_p^5

	A	B
4.1.1 Видимый диапазон спектра 0.5–1.1 мкм	0.6	0.4
4.1.2 ИК-диапазон спектра 10–12 мкм	1	0
4.1.3 Радиодиапазон	1	0
4.1.4 Пространственное разрешение	0.3	0.7
4.5.1 Фиксация экосостояния по данным ДЗЗ	0.6	0.4
4.5.2 Решение задач экологического мониторинга	0.4	0.6

Примечание. A — КА типа Сич-1М, B — орбитальная группировка микроспутников.

тов, второй — вектору целевых приоритетов, третий — компонентам вектора целевых приоритетов и четвертый — компонентам вектора приоритетности показателей сравниваемых альтернатив. После получения на всех уровнях иерархии критериальных составляющих были определены количественные значения весовых коэффициентов параметров самого нижнего уровня в линейной целевой функции. На основании значений X_p^5 (табл. 6) в соответствии с выражением (4) было рассчитано значение свертки F для каждого варианта КС. В результате получены следующие значения обоб-

Таблица 8. Значения отношения согласованности для матриц попарных сравнений

Матрица 1-го уровня	Матрица 2-го уровня (лесоводство, городское хозяйство)	Матрица 3-го уровня (задача 2.4.1) задача 2.4.2 задача 2.4.3 задача 2.9.1 задача 2.9.2 задача 2.9.3)	Матрица 4-го уровня характеристики космических изображений, экологические критерии)
0.0	0.012 0.021	0.0	0.005 0.0

щенного критерия: $F_A = 0.54$ и $F_B = 0.46$.

Аналогичный вычислительный эксперимент был выполнен со второй упрощенной системой для сфер деятельности: экологический мониторинг и национальная безопасность — с использованием тех же вариантов *A* и *B*. После построения матриц попарных сравнений от первого до четвертого уровней и таблицы критериальных приоритетов по формуле (4) были получены следующие значения обобщенного критерия: $F_A = 0.40$ и $F_B = 0.59$.

Полученные значения обобщенного критерия двух экспериментов показывают, что для таких

сфер деятельности, как лесоводство и городское хозяйство по всей совокупности учитываемых факторов более эффективным будет вариант КА типа «Січ-1М», а для сфер деятельности национальная безопасность и экологический мониторинг — вариант КС ДЗЗ группировки микроспутников.

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993.—186 с.
2. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. — М.: Радио и связь, 1991.—252 с.
3. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Козлов З. В., Колоколов А. А. Моделирование и оценка эффективности космических систем зондирования Земли // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 2/3.—С. 83—89.

EFFICIENCY EVALUATION OF REMOTE SENSING SPACE SYSTEMS BASED ON HIERARCHY ANALYSIS METHOD

A. D. Fedorovsky, V. G. Yakimchuk, H. N. Bodnar, Z. V. Kozlov

An efficiency evaluation procedure for remote sensing space systems using the hierarchy analysis method is substantiated. The possibility to choose a perspective variant of a space system for solution of remote sensing problems is shown by a comparison of one-spacecraft space systems with small spacecraft constellations.

УДК 681.3:519.27

С. А. Станкевич

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аерокосмічних зображень

Надійшла до редакції 14.01.05

Викладено порядок визначення порогової модуляції цифрового аерокосмічного зображення на основі статистичної моделі розділення його сегментів. Зіставлення геометричного розміру сегменту із відповідною просторовою частотою дозволяє побудувати функцію порогового контраста цифрового зображення.

Можливості ефективного використання матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) безпосередньо залежать від їхньої якості, перш за все від лінійної розрізності на місцевості. За поданням виробників і власників аерокосмічних систем ДЗЗ склалася традиція характеризувати якість одержуваних знімків просто розміром проскіні фотоприймального елемента на поверхню Землі скрізь оптичну систему апаратури, в кращому випадку враховуючи при цьому збільшення цього розміру за зміною кута візуування [5].

Найбільш інформативною оцінкою іконічних систем ДЗЗ слід вважати функцію передавання модуляції (ФПМ). Ця характеристика повністю описує передавальні властивості всіх ланок системи, має об'єктивний характер вимірювання та базується на добре розвиненому та надійному математичному апараті [6]. Оскільки всі сучасні космічні та більшість авіаційних систем дистанційного зондування є цифровими або далі перетворюють зображення в цифрову форму, зараз у світі активно розроблюються та навіть стандартизуються [7] методи визначення ФПМ за цифровими аерокосмічними зображеннями.

Однак для визначення реальної лінійної розрізності іконічної системи окрім її загальної ФПМ необхідна функція порогового контраста — залежність мінімальної модуляції K , яка є розрізняється системою, від просторової частоти ν . Розрізнювальна здатність іконічної системи визна-

чається точкою перетину ν^* загальної ФПМ $T(\nu)$ і функції порогового контраста $K(\nu)$. Зміна розрізнювальної здатності іконічних систем при змінах просторової частоти оптичного сигналу є наслідком впливу шумів. Порогову модуляцію добре досліджено для фотографічних систем, але механічне поширення цих результатів на аерокосмічні системи з дискретними фотоприймачами [2] не є коректним, тому що вони мають іншу фізичну природу шумів, а для детектування, як правило, не застосовується зоровий апарат людини. Мова скоріше повинна вестися про статистичне виявлення групи зв'язних елементів раству цифрового зображення за їхніми спільними радіометричними характеристиками, в даному випадку — за оптичною модуляцією відносно сусідніх груп елементів раству [4]. Суттю цієї роботи є поєднання статистичного підходу з класичною просторово-частотною моделлю з метою обґрунтування порядку визначення функції порогового контраста саме для цифрових аерокосмічних зображень.

Принципову стохастичність оптичних сигналів земних утворень, що реєструються іконічними системами ДЗЗ, обумовлено варіаціями структурного та геохімічного складу об'єктів спостереження, змінами зовнішніх геофізичних полів, погодних умов, оптичних властивостей середовища та освітлення, похибками калібрування та власними шумами каналів реєстрації. Дискретизація та скінченість діапазону відліків призводять до додаткових спотво-

рень цифрових аерокосмічних зображень. Поруч з тим дискретизація та скінченість дозволяють більш строго застосовувати статистичні моделі до аналізу цифрових зображень і одержувати результат за скінченне число операцій.

Розглянемо дві групи зв'язних елементів растру (пікселів цифрового зображення) із n елементами кожна, які утворено двома різними сталими вхідними сигналами E_1 та E_2 . Модуляція між ними складе

$$K = \frac{|E_1 - E_2|}{E_1 + E_2}. \quad (1)$$

Припустимо, що для зберігання лінійності відтворення рівні сигналів близькі до середини динамічного діапазону системи, а шуми мають нормальну розподіл з нульовим середнім. Тоді модуляцію (1) можна оцінити безпосередньо за цифровим зображенням [3] як

$$K = \frac{|x_1 - x_2|}{x_1 + x_2}, \quad (2)$$

де $x = \alpha \cdot E$ — математичне очікування цифрового коду пікселів групи, α — коефіцієнт пропорційності. В рамках гауссівської моделі імовірність прийняття пікселом з області сигналу k -го рівня дискретизації, $k = 0 \dots w$, складе

$$\begin{aligned} P(k) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{k+0.5} \exp\left[-\frac{(k-x)^2}{2\sigma^2}\right] dx - \\ &- \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{k-0.5} \exp\left[-\frac{(k-x)^2}{2\sigma^2}\right] dx = \\ &= \Phi\left(\frac{k+0.5-x}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{k-0.5-x}{\sigma}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

де σ — приведене до цифрового коду середнє квадратичне відхилення шумів, $\Phi(\cdot)$ — табулюваний інтеграл імовірностей. Знаючи параметри x і σ , можна побудувати повний розподіл $P(k)$, $\sum_{k=0}^w P(k) = 1$, який при не дуже великих σ буде практично збігатися із нормальним. До речі, це можна зробити й для будь-якої іншої моделі, підставивши в (3) відповідні співвідношення.

Умовою граничної виділимості групи пікселів є сприймання сигналу від них як від одного цілого, тобто їхня статистична нерозрізненість в групі. А їхня кількість n^* , мінімально необхідна для розділення, буде відповідати пороговій просторовій частоті для заданої модуляції K .

Очевидно, що сумарний сигнал групи з n пікселів буде знаходитися в межах від 0 до nw , а розподіл суми n гауссівських випадкових величин є гауссівським із середнім nx та дисперсією $n\sigma^2$ [1]. Тому є всі необхідні дані для побудови розподілу імовірності сумарного сигналу по аналогії з (3):

$$P(n, k) = \Phi\left(\frac{k+0.5-nx}{\sigma\sqrt{n}}\right) - \Phi\left(\frac{k-0.5-nx}{\sigma\sqrt{n}}\right), \quad (4)$$

$$k = 0 \dots nw.$$

Якщо відомі розподіли $P_1(n, k)$ та $P_2(n, k)$ для двох різних сумарних сигналів з параметрами x_1 , σ_1 та x_2 , σ_2 , можна розрахувати імовірність їхнього правильного розділення при $x_1 < x_2$:

$$P(n) = \sum_{j=0}^{nw-1} \sum_{k=j+1}^{nw} P_1(n, j) P_2(n, k). \quad (5)$$

Із зростанням числа n імовірність $P(n)$ прямує до 1.

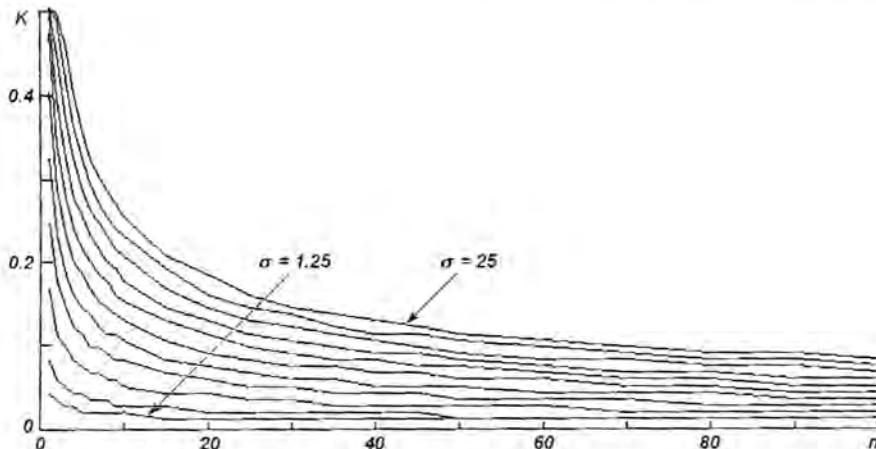


Рис. 1. Порогові модуляції сегментів з різними рівнями шумів



Рис. 2. Цифровий космічний знімок апаратури ASTER супутника «Terra» (Київ — Бориспіль, 15 квітня 2004 р.)

тому для будь якої можливої модуляції $K \geq \frac{1}{w}$

можна знайти таке n^* , що забезпечить розділення сегментів цифрового зображення з наперед заданою імовірністю P^* . Як показують числові експерименти, для сучасних 8-бітових цифрових аерокосмічних зображень величина $P(n)$ швидко сягає одиниці у межах машинної точності, якщо математичні очікування сегментів обираються поблизу середини діапазону радіометричних рівнів.

На рис. 1 показано розраховані згідно із гауссівською моделлю залежності порогової модуляції від кількості пікселів у сегменті для різних середніх квадратичних відхилень шумів ($\sigma = 1.25...25$).

Кількість пікселів у сегменті є пропорційною до квадрата його лінійного розміру l . Для компактних сегментів можна вважати $l \approx \sqrt{n}$, для протяжних це правило може порушуватися. Кожному лінійному розміру відповідає власна просторова частота ν :

$$\nu = \frac{1}{2d_0 l} \approx \frac{1}{2d_0 \sqrt{n}}, \quad (6)$$

де d_0 — лінійний розмір піксела цифрового зображення. Тепер, знаючи фізичний розмір фотоприймального елемента апаратури ДЗЗ та приведене середнє квадратичне відхилення шумів, можна розрахувати функцію порогового контрасту у традиційному вигляді. Більш того, вказане середнє квадратичне відхилення можна визначити безпосередньо на цифровому зображенні в зонах приблизно рівномірного тону.

На рис. 2 показано цифровий аерокосмічний знімок території України, одержаний 15 квітня 2004 р. за допомогою апаратури дистанційного спостереження ASTER дослідно-моніторингового супутника «Тerra». Середнє квадратичне відхилення сигналу в статистично рівномірних сегментах для середньої частини динамічного діапазону після радіометричної корекції для цього знімка складає $\sigma = 12...15$.

На рис. 3 наведено перераховану за (6) із розміром фотоприймального елемента $d_0 = 15$ мкм функцію порогового контрасту, і, для ілюстрації порядку визначення розрізнювальної здатності

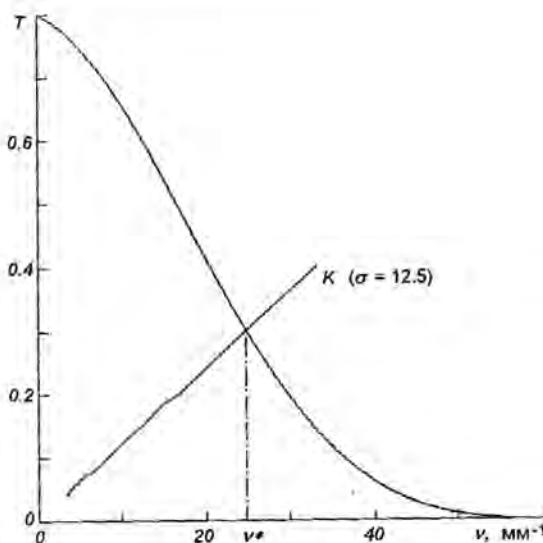


Рис. 3. Функція порогового контрасту для цифрового знімку рис. 2

іконічної апаратури ASTER за цифровим зображенням — теоретичну ФПМ космічної системи дистанційного зондування «Тетра».

Таким чином, викладений підхід дозволяє теоретично визначати залежності порогової модуляції від розміру сегмента для цифрових аерокосмічних зображень, а при їхній наявності — вимірювати їх експериментально. Це в сукупності з теоретичними або експериментально одержаними ФПМ іконічних систем ДЗЗ надає змогу об'єктивно, згідно з міжнародними стандартами оцінювати якість цифрових аерокосмічних зображень, що формуються ними, перш за все — реальну лінійну розрізненість на

місцевості. Визначення порогової модуляції є необхідною складовою прийнятої Національним космічним агентством України методики оцінки цифрових матеріалів дистанційного зондування Землі.

1. Давенпорт В. Б., Рут В. Л. Введение в теорию случайных сигналов и шумов. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960.— 432 с.
2. Кононов В. И. Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками // Космическая наука и технология.— 2002.—8, № 2/3.—С. 91—102.
3. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Сойфера. — М.: Физматлит, 2003.—784 с.
4. Станкевич С. А. К оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков // Космическая наука и технология.— 2002.—8, № 5.—С. 12—15.
5. Станкевич С. А., Захаров О. Б. Геометрическая складовая линейного разрешения космической оптико-электронной аппаратуры дистанционного спостережения // Тр. Национальной академии обороны Украины.— 2001.—Вып. 26.—С. 41—47.
6. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации: Пер. с нем. — М.: Мир, 1978.—670 с.
7. Boreman G. D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems. — Bellingham: SPIE Press, 2001.— 120 p.

STATISTICAL APPROACH TO DETERMINATION OF THRESHOLD MODULATION OF DIGITAL AEROSPACE IMAGES

S. A. Stankevich

The routine of determination of threshold modulation of digital aerospace images is presented. The routine is developed as statistical model of image segments separation. A correlation between the geometrical dimension of a segment and the corresponding spatial frequency makes possible the construction of the threshold modulation function of a digital image.

УДК 528.8

А. И. Кириллов¹, Н. А. Кириллова¹, Е. И. Махонин²

¹ Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

² Національне космічне агентство України, Київ

Формирование и отображение планов работы полезной нагрузки космических аппаратов и получение данных дистанционного зондирования Земли с применением программных пакетов ГИС-технологий

Надійшла до редакції 10.01.05

Освітлено практичну роботу зі створення системи візуалізації на засобах колективного відображення інформації з керування космічного апарату у орбітальному польоті, відомостей про роботу корисного навантаження КА для зйомки заданої території поверхні Землі, роботи наземних засобів прийому інформації від КА, відображення результатів космічної зйомки.

Одной из задач при эксплуатации космических систем является необходимость визуализации на средствах коллективного отображения (электронные табло, широкоформатные экраны) информации по управлению космическим аппаратом в орбитальном полете, сведений о работе полезной нагрузки КА по съемке заданных территорий поверхности Земли, работе наземных средств приема информации от КА, отображения результатов космической съемки.

Для этого в Национальном центре управления и испытаний космических средств (НЦУИКС) создается Главный информационный зал (ГИЗ), представляющий собой наземный информационный комплекс и являющийся составной частью отечественных космических систем и информационно-аналитической системы НКАУ.

ГИЗ в НЦУИКС обеспечивает отображение на коллективных средствах просмотра результатов функционирования информационных моделей представления протекающих в космических системах процессов, а именно:

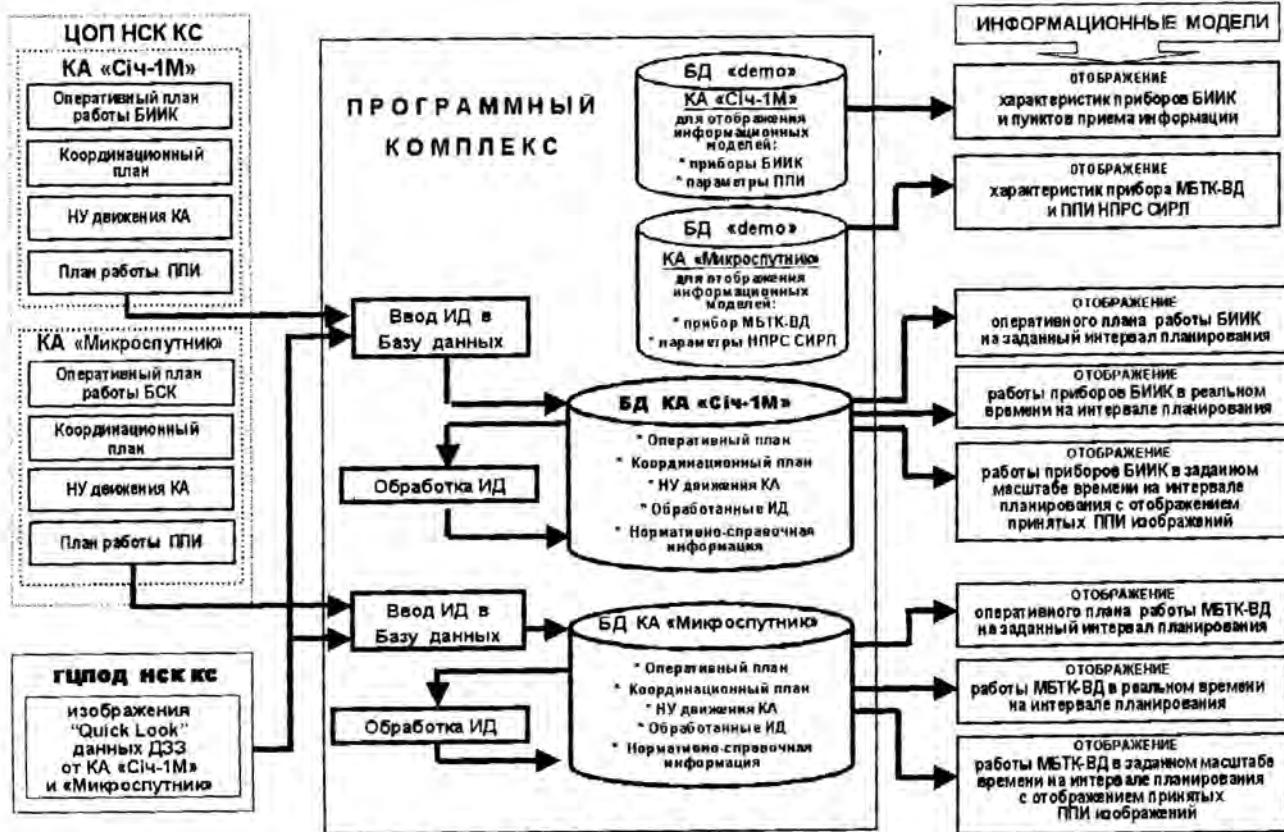
— работа космической системы по выводу КА на орбиту и работы, выполняемые в первые шесть суток полета;

- проведение сеансов связи с КА по закладке на борт управляющих программ функционирования бортовых систем КА и получению от КА телеметрической информации о состоянии бортовых систем;
- работа приборов полезной нагрузки КА по съемке заданных участков поверхности Земли, воспроизведению записанных данных ДЗЗ на пункты приема информации и отображение результатов космической съемки;
- отображение космической обстановки над заданными территориями.

Кроме этого, программные средства ГИЗ представлены рядом моделей информационного характера, рассчитанных на широкую аудиторию, и дающих в доступной форме представление:

- о космической системе и космическом аппарате;
- приборах полезной нагрузки КА;
- наземных информационных комплексах в космической системе;
- о задачах, решаемых космическими системами ДЗЗ, и о применении результатов космической съемки в жизнедеятельности государства.

Одна из реализованных задач ГИЗ: формирование и отображение плана и результатов работы науч-



Экспериментальный образец главного информационного зала в НПУИКС. Программный комплекс

ной аппаратуры КА «Сич-1М» и «Микроспутник» по съемке заданных районов поверхности Земли (рисунок).

Программный комплекс формирования и отображения плана и результатов работы научной аппаратуры КА разработан ГП «Днепрокосмос» с применением Active-X компоненты ГИС-технологий MapObjects 2.2.

MapObjects — программный продукт компании ESRI, представляет собой набор инструментальных средств картографирования и технологии геоинформационных систем (ГИС). Он включает управляющие элементы технологии связывания и внедрения объектов (OLE Control) и набор программных OLE-объектов, предоставляющих разработчикам приложений возможность добавлять в них многие возможности картографирования и средства ГИС. Продукт MapObjects не предназначен для обычного конечного пользователя. Это инструментальное средство программиста-разработчика. Его можно использовать во многих стандартных средах для создания картографических приложений, либо добавления функций картографирования в разраба-

тываемые приложения. MapObjects можно применять в разнообразных средах прикладника-разработчика, включая такие популярные программные окружения, как Visual Basic, Delphi, PowerBuilder, Visual C++, Microsoft Access, Visual FoxPro.

Комплект поставки MapObjects 2.2 содержит набор оцифрованных многослойных карт Европы и Америки, политическую и географическую карты мира.

При разработке программного комплекса ГИС использованы следующие возможности MapObjects 2.2 при создании приложений:

- визуализировать геоданные, хранящиеся в стандартных форматах ESRI;
- визуализировать данные, хранящиеся в разнообразных растровых форматах, в том числе и координатно привязанные файлы;
- масштабировать карту по заданным временными алгоритмам;
- осуществлять пространственную выборку данных;
- визуализировать движущиеся объекты без пересортировки всей карты;
- работать с реляционными базами данных, реализовывать SQL-запросы.

Программный комплекс в качестве исходных данных использует штатную информацию Центра оперативного планирования (ЦОП) НСК КС, рассчитываемую ЦОП для управления работой полезной нагрузки КА «Сич-1М», «Микроспутник» (оперативные планы работы полезной нагрузки КА) и пунктов приема данных ДЗЗ от КА (планы работы ППИ), либо получаемую от других структурных элементов НСК и НКУ (начальные условия движения КА, координационные планы реализации заявок).

В составе программного комплекса функционируют следующие информационные модели:

1) модель предоставления информации о характеристиках научной аппаратуры КА (полосы обзора/захвата, разрешение на местности и т.п.) и пунктах приема данных ДЗЗ (месторасположение, зоны радиовидимости, тип станции приема информации);

2) модель отображения оперативного плана работы научной аппаратуры КА по съемке заданных районов поверхности Земли на планируемом интервале времени. Модель отображает границы снимаемых районов и в цветовой гамме полосы захвата приборов полезной нагрузки при съемке;

3) модель отображения в динамике реального времени движение КА по трассе подспутниковой точки, моментов включения/выключения приборов полезной нагрузки КА, границ снимаемых районов и степень их охвата полосами захвата приборов при съемке, процессов сброса данных ДЗЗ на пункты приема информации. Данная модель может работать в заданном масштабе времени и запускаться на любой интервал планирования работы научной аппаратуры КА. В процессе функционирования данной модели, после отображения сеанса сброса информации на коллективные средства отображения выводятся обработанные данные ДЗЗ полученные от КА в данном сеансе приема информации;

4) модель просмотра данных ДЗЗ, полученных от КА за определенный период. Возможен просмотр по отдельно взятым приборам.

Все модели функционируют на фоне физической карты мира, масштабируемой в сторону увеличения, в моменты работы приборов полезной нагрузки по записи данных ДЗЗ либо их сбросу.

Функционирование программного комплекса в ГИЗ предоставляет возможности:

- анализа планов работы полезной нагрузки до закладки программы на борт КА с целью возможного перенесения акцентов съемки участков поверхности Земли по каким-либо условиям (например, поступления экстренных заявок на съемку);

- визуализации степени покрытия заданного района съемки полосой захвата прибора для принятия решения о достаточности данного прохода при решении конкретной тематической задачи;
- при организации высокоскоростного канала связи между ГИЗ и ГЦПОД, отображение данных ДЗЗ практически в темпе приема информации, что приобретает особую актуальность при наблюдении районов в условиях кризисных ситуаций.

Применение средств MapObjects при решении задач приведенного выше характера кроме технической эффективности имеет также и экономическую, заключающуюся в том, что он лицензируется на требуемое число мест установки созданных приложений. То есть, созданный программный продукт можно установить в различных структурах НСК, либо ИАС НКАУ без необходимости приобретения на данные рабочие места дополнительных лицензий.

Использование Active-X-компонентов ГИС-технологий MapObjects 2.2 для разработки приложений имеет широкие перспективы при внедрении информационных технологий в космических системах в части:

- планирования работы полезной нагрузки высокой разрешающей способности;
- планирования съемок больших площадей при составлении электронных карт местности (при этом наглядно просматриваются варианты стыков либо перекрытий полос захвата при съемке);
- наблюдения за космической обстановкой над определенными территориями поверхности Земли;
- отображение на картографической основе границ изображений поверхности Земли при поиске необходимой информации в архиве данных ДЗЗ.

FORMING AND DISPLAY OF SPACECRAFT PAYLOAD WORK PLANS AND DERIVING REMOTELY SENSED DATA WITH THE USE OF GIS-TECHNOLOGIES PROGRAM PACKAGES

O. I. Kirillov, N. A. Kirillova, Ye. I. Mahonin

We illustrate some practical work on creation of visualization system using means of collective display of information on spacecraft control in orbital flight, information concerning spacecraft payload work on survey of specified Earth surface territories, work of ground facilities for reception of information from spacecraft, display of space survey results.

УДК 528.8

В. И. Волошин¹, Е. И. Капустин¹, А. И. Кириллов¹,
Н. А. Кириллова¹, С. О. Засуха²

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

²Національне космічне агентство України, Київ

Информационные технологии в управлении работой полезной нагрузки космических аппаратов по дистанционному зондированию Земли

Надійшла до редакції 10.01.05

Розглядається створення системи керування потоками заявок на одержання космічної інформації в Україні. Система заснована на експлуатації супутників з можливістю керування роботою систем космічних апаратів для упорядкування виконання замовлень із ДЗЗ.

Основным назначением создаваемых космических систем дистанционного зондирования Земли является обеспечение данными ДЗЗ субъектов производственно-хозяйственной, научной и управленческой деятельности государственного, регионального и местного уровней, связанных с защитой и контролем окружающей природной среды, рациональным использованием природных ресурсов.

Реализация цели обеспечения потребителей данными предполагает наличие в системе ДЗЗ структурных элементов управления реализацией потока заявок.

Согласно опыту эксплуатации космических систем «Січ-1» и «Океан-О» можно констатировать отсутствие в данных системах элементов управления процессом реализации заявок на космическую съемку, а именно:

- отсутствовала приоритетность реализации заявок;
- информация обратной связи о планах реализации заявок не предоставлялась структуре НСК, формирующей сводные заявки на съемку;
- план работы полезной нагрузки КА составлялся без учета требуемой периодичности съемки, учета ранее отснятых районов, прогноза облачности в районах съемки.

На основании опыта эксплуатации космических систем «Січ-1» и «Океан-О», ГП «Днепрокосмос» сформировал концепцию включения в состав космических систем ДЗЗ «Оператора системы», осуществляющего управление работой наземного специального комплекса (НСК) по реализации космической системой своего целевого назначения. Принципы создания системы управления НСК по реализации заявок потребителей ГП «Днепрокосмос» были изложены в аванпроекте на создание НСК космических систем «Січ-2», а в материалах дополнения к эскизному проекту на космическую систему «Січ-1М» разработаны проектные решения по реализации этой системы с применением современных информационных технологий.

В настоящее время впервые в технологии планирования проведения космических съемок в отечественных космических системах ДЗЗ создана автоматизированная двухуровневая система управления работой полезной нагрузки КА по реализации заявок потребителей на получение данных ДЗЗ.

Как в любой системе управления, технология управления работой полезной нагрузки КА по реализации заявок потребителей на получение данных ДЗЗ должна носить замкнутый характер и регулироваться по принципу обратной связи. Базой, обес-

печивающей жизнедеятельность системы, являются информационные массивы данных (файлы обмена информацией в согласованной структуре и форме), циркулирующие между составными элементами системы по установленному технологическому графику.

В технологии управления работой полезной нагрузки КА по съемке заданных районов поверхности Земли можно выделить два уровня.

Первый уровень: управление работой НСК по реализации заявок потребителей на предоставление данных ДЗЗ. Задачей управления на этом уровне является определение (без учета динамических параметров КА и окружающей среды) плана управления (ПУ) работой полезной нагрузки КА:

$$\begin{aligned} \text{ПУ}(t_i, R_{ij}, \Delta t_{ij}) = \\ = F_1(t_i, r, V_H, Z_i, f_i, S_i(t_i), t_k), \end{aligned}$$

где t_i — время включения совокупности необходимых режимов работы приборов полезной нагрузки КА в момент прохождения i -го района съемки, R_{ij} — вектор ресурсных ограничений КА, Δt_{ij} — длительность работы j -го прибора в момент прохождения i -го района съемки, $F_1(\dots)$ — оператор преобразования данных исходного состояния КА, параметров заявки на съемку и солнечной обстановки в i -м районе съемки на момент съемки t_i , t_h , t_k — время начала и окончания интервала планирования, r , V_H — векторы кинематических параметров КА на начало интервала планирования, Z_i , f_i — совокупность параметров i -й заявки на съемку, $S_i(t_i)$ — уровень освещенности в момент прохождения КА над i -м районом.

Второй уровень: управление работой полезной нагрузки КА по проведению съемок заданных районов. Задачей управления на этом уровне является определение на интервале 12—36 ч плана управления работой полезной нагрузки КА с учетом всех существенных динамических параметров и ограничений КА. Фактически управление на этом уровне заключается в расчете квазиоптимального оперативного плана (ОП) работы полезной нагрузки КА.

$$\begin{aligned} \text{ОП}(t_i, R_{ij}, \Delta t_{ij}) = \\ = F_2(\text{ПУ}, \text{РО}, \text{ДП}(t_i), \text{УО}(t_i), t_{\text{но}}, t_{\text{ко}}), \end{aligned}$$

где РО — вектор ресурсных ограничений КА, $\text{ДП}(t_i)$ — вектор динамических ограничений КА, $\text{УО}(t_i)$ — уровень облачности над i -м районом в момент проведения съемки t_i , $t_{\text{но}}$, $t_{\text{ко}}$ — начало и окончание интервала оперативного планирования.

Функция прогноза облачности в районах съемки при расчете оперативных планов работы ПН КА введена впервые в практику эксплуатации отечест-

венных космических систем ДЗЗ. Как показывает статистика, вероятность съемки территории Украины в безоблачных условиях на 16-сугодном цикле работы на орбите одного КА составляет примерно 15 %, двух КА — до 25 %, трех КА — до 50 %. Комплекс прогноза облачности в районах съемки, разработанный в настоящее время, позволяет с вероятностью 0.86 оценивать на сугодном интервале планирования состояние облачного покрова в предполагаемых районах съемки на заданное время. Применение на втором уровне управления комплекса прогноза облачности повысит примерно на 40 % эффективность использования приборов ПН КА (особенно высокого разрешения).

Основными технологическими операциями на первом уровне управления являются:

- анализ поступающих в систему заявок на съемку, назначение приоритетов в реализации заявок;
- расчет вариантов возможной реализации заявок (координационный план) с учетом заданной периодичности съемки и съемки больших площадей поверхности Земли (площадные заявки, реализация которых осуществляется в несколько проходов КА над районом съемки);
- обработка информации обратной связи в системе;
- ведение заявок по циклу их реализации;
- учет фактически израсходованного ресурса полезной нагрузки КА;
- ведение каталога отснятых районов.

Основными технологическими операциями на втором уровне управления являются:

- расчет оперативных планов работы полезной нагрузки КА по съемке заданных районов поверхности Земли с учетом прогноза облачности в этих районах;
- расчет планов работы пунктов приема информации (ППИ) по приему данных ДЗЗ.

Уровни управления информационно взаимосвязаны между собой. Выходная информация первого уровня является управляющим воздействием для задач второго уровня, а выходная информация второго уровня является обратной связью для задач первого уровня.

В контур управления полезной нагрузкой КА включены следующие элементы НСК космических систем:

- Внешние абоненты космических систем (потребители данных ДЗЗ) — формирующие входной информационный поток в систему — заявки на получение данных ДЗЗ от КА.
- Операторский центр — реализующий функции управления первого уровня в системе.
- Центр оперативного планирования — реализующий функции управления второго уровня в системе.



Двухуровневая система управления работой НСК космических систем по реализации заявок потребителей на получение данных ДЗЗ

- Главный центр приема и обработки данных — формирующий информационные потоки обратной связи в системе.

Двухуровневая система управления полезной нагрузкой КА реализована ГП «Днепрокосмос» в НСК космических систем «Сич-1М» и «Микроспутник» в виде двух программных изделий (ПИ):

- программное изделие «Координационный план» — функционирует в Операторском центре НСК космических систем и осуществляет управление элементами НСК по реализации заявок потребителей на получение данных ДЗЗ (первый уровень управления);
- программное изделие «Оперативное планирование работы полезной нагрузкой КА» — функционирует в Центре оперативного планирования НСК космических систем и осуществляет управление полезной нагрузкой КА по проведению съемок заданных районов поверхности Земли (второй уровень управления).

Программные изделия разработаны с применением средств программирования Delphi и оформлены

как программные приложения, функционирующие в операционной среде Windows 2000 Pro. Входящие в состав приложений программные компоненты информационно связаны единой базой данных (БД), содержащей необходимую нормативно-справочную (статические и динамические параметры и ограничения в системе) и расчетную информацию.

Применение информационных технологий в системе позволило решить основные проблемы, имеющие место в планировании съемки приборами КА:

- определение вариантов реализации съемки больших площадей с минимальным перекрытием полос захвата приборов при съемке

$$\sum_i S_i(t_i)/S_i \Rightarrow \min$$

при условии

$$S_i(t_i) \geq S_i - \varepsilon_i,$$

где $S_i(t_i)$ — площадь съемки в i -м сеансе, S_i — общая площадь района съемки, ε_i — допустимая погрешность покрытия;

- определение процента отснятой площади при разом-

- вом проходе над районом поверхности Земли;
- определение динамических приоритетов заявок с учетом ранее проведенных съемок;

$$\text{Пр}_k(t_i) = F_3(q_k, t_{0k} - t_i),$$

где $\text{Пр}_k(t_i)$ — приоритет k -й заявки в момент времени t_i , q_k — коэффициент важности k -й заявки; t_{0k} — конечный срок реализации k -й заявки;

- идентификация заявок на различных стадиях их реализации;
- определение оптимальных углов прицеливания приборов с целью захвата максимальной площади при съемке заданного района или реализации требования потребителя по необходимости разрешению изображения.

Входной информацией ПИ «Координационный план» являются заявки потребителей на получение данных ДЗЗ, содержащие основные условия проведения космической съемки, задаваемые потребителем: период наблюдения, координаты района, периодичность съемки, прибор съемки и необходимое разрешение, уровень обработки данных ДЗЗ и т. п. В программном изделии реализуются функции первого уровня управления:

1) при вводе в БД заявок на съемку в БД им присваивается персональный код, по которому в дальнейшем осуществляется ведение заявки по циклу реализации. Каждый район съемки автоматически покрывается координатной сеткой (с шагом, равным 0.1 ширине полосы захвата заданного прибора) по «узлам» которой оценивается площадь отснятого района и степень реализации заявки.

2) при расчете координационного плана (на 7–10 сут) определяются все возможные варианты реализации заявок с учетом заданной периодичности съемки или необходимости многократного прохода КА над районом для съемки большой площади. К персональному коду заявки добавляется информация о количестве проведения съемок (номер реализации) для полного выполнения заявки.

3) при вводе в БД информации обратной связи в системе (планов работы ППИ, информации о принятых ППИ данных ДЗЗ, данных о наработке приборов) производится отметка о реализации заявок, данные о съемке заносятся в каталог отснятых районов, учитывается соблюдение паритета использования ресурса КА по межправительственным соглашениям.

Используя информацию БД, по каждой заявке в любой момент времени можно получить информацию о ее нахождении в цикле реализации, а в случае периодичности съемки или съемки района большой площади — процент реализации заявки.

Входной информацией ПИ «Оперативное планирование работы полезной нагрузки КА» является

координационный план реализации заявок. В программном изделии реализуются функции второго уровня управления:

1) при расчете оперативного плана (на 1–3 сут) полезной нагрузки КА по съемке заданных координационным планом районов учитываются: прогноз облачности в районах съемки, статические и динамические ограничения по КА и приборам полезной нагрузки (энергопотребление, временные параметры работы приборов и т. п.). При расчете оперативного плана работает система динамических приоритетов, учитывающая: приоритет заявки по координационному плану (экстренная, государственная, коммерческая, научная, спонсорская), количество заявок реализуемых при однократном включении прибора, процент покрытия площади за один проход. Кроме этого система динамических приоритетов отслеживает реализацию заявок на интервале действия координационного плана;

2) при расчете плана работы ППИ определяются: время работы наземной станции приема, данные о режимах работы бортовой аппаратуры при съемке районов, данные по заявкам, реализуемых в данном сеансе воспроизведения данных ДЗЗ. План работы ППИ направляется:

- в операторский центр, где после ввода его в БД ПИ содержащиеся в нем заявки становятся в ожидание отметки их реализации;
- на пункт приема информации для обеспечения приема данных ДЗЗ, анализа качества принятой информации и составления отчета о реализации заявок. Отчет о реализации заявок направляется в операторский центр, где после ввода его в ПИ производится отметка о реализации заявок.

Приведенные выше программные изделия прошли все виды испытаний и установлены в структурных элементах НСК космических систем — операторском центре и в центре оперативного планирования.

Практическая отработка двухуровневой системы управления работой НСК по реализации заявок потребителей данных ДЗЗ ГП «Днепрокосмос» проведена на контрольном примере заявок, составленных на базе украинской части научно-прикладной программы использования данных КА «Сич-1М».

INFORMATION TECHNOLOGIES IN CONTROL OF SPACECRAFT PAYLOAD WORK ON REMOTE SENSING OF THE EARTH

V. I. Voloshyn, Ye. I. Kapustin, O. I. Kirillov,
N. A. Kirillova, S. O. Zasukha

Development of system for management of request streams for reception of space information in Ukraine is considered. The system is based on control of spacecraft work to straighten out the execution of remote sensing orders.

УДК 621.382:621.383

В. А. Антонова, В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, И. Т. Тымчук

Державне підприємство Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, Харків

Разработка и исследование солнечных батарей для системы энергоснабжения украинского молодежного спутника

Надійшла до редакції 10.12.04

Проведено аналіз вихідних характеристик сонячних батарей для системи енергозабезпечення українського молодіжного супутника при використанні різних типів фотоперетворювачів, обґрунтовано оптимальний варіант конструктивно-технологічних рішень.

Основными характеристиками солнечных батарей (СБ) для космических аппаратов являются: удельная мощность по массе и площади, КПД, срок службы, удельная мощность на начало и конец срока активного существования.

Наращивание мощности СБ за счет увеличения количества входящих в нее фотопреобразователей (ФП) можно осуществить до некоторого предела, определяемого соотношением между массой и полезной нагрузкой, а также оптимальной площадью панелей СБ. Поэтому повышение удельной мощности в первую очередь достигается за счет увеличения КПД и радиационной стойкости входящих в нее ФП.

Большинство из запущенных ранее космических аппаратов различного назначения в качестве источника питания использовали СБ на кремниевых ФП. Дальнейшее повышение эксплуатационных параметров связано с минимизацией потерь солнечной энергии, оптимизацией просветляющих покрытий, снижением толщины и увеличением размеров ФП, применением определенного профиля текстурирования на фронтальной поверхности, максимально возможным уменьшением площади контактных областей, использованием «тыльноконтактных» ФП, подгонкой спектрального состава излучения к максимуму спектральной чувствительности ФП [1, 2].

Применение в составе солнечных батарей арсенид-галлиевых фотопреобразователей обеспечивает повышение радиационной стойкости, увеличение спектрального отклика в коротковолновом диапазо-

не, а следовательно, и увеличение КПД. В условиях облучения АМ0 (облученность $1360 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $T = 28^\circ\text{C}$) серийные двухпереходные образцы GaAs-ФП со структурой $\text{InGaP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ имеют КПД $\approx 23\%$, а трехпереходные — КПД $\approx 25\ldots26\%$ [3]. При этом использование в гетероструктурных фотопреобразователях подложек из герmania обеспечивает снижение себестоимости ФП, улучшение механической прочности, и, как следствие, возможность уменьшения толщины преобразователя. Промышленный вариант СБ на Si-ФП имеет КПД $\approx 15\%$, тогда как на GaAs-ФП — 21.5% .

Целью работы являлся анализ требований к техническим характеристикам солнечной батареи, рассмотрение возможных вариантов конструктивно-технологических решений изделия, сравнительная оценка вариантов, выбор и обоснование оптимального варианта СБ.

Предварительные исходные данные, использованные для анализа вариантов компоновки СБ, таковы:

диапазон изменения напряжений	0...35 В
среднее (типовое) напряжение	33 В
диапазон изменения тока	0...2.4 А
средний (типовой) ток СБ	1.2...1.8 А
геометрические размеры СБ	660×380 мм
площадь СБ	0.25 м ²

Согласно техническим требованиям деградация мощности СБ за три года на солнечно-синхронной орбите с высотой 500—700 км и наклонением 82° и

Таблица 1. Усредненные характеристики ФП для компоновки СБ (начало САС)

Характеристика	Изготовитель								ГП НИТИП (Украина)	
	Е. Н. Е (Бельгия), CESI (Италия)									
	Тип ФП									
	GaAs 3-n*	GaAs 2-n*	GaAs 2-n*	GaAs 2-n*	GaAs 1-n*	GaAs 1-n*	GaAs 1-n*	Si		
Габариты ФП, см	3.6×4.4	4.1×4.24	3.6×4.4	4.1×4.24	2×4	4.1×4.24	4×8	2×4	1.52×4.6	
Толщина ФП, мкм	160±20	160±20	160±20	160±20	160±20	160±20	160±20	320±20	320±20	
Удельная масса, кг/м ²	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.8—0.1	0.7—0.8	0.7—0.8	
I_{k3} , А	0.241	0.265	0.235	0.258	0.252	0.554	1.023	0.33	0.285	
J_{k3} , мА/см ²	15.38	15.385	15.00	15.00	31.5	32.16	32.22	41.25	40.00	
I_{opt} , А	0.220	0.241	0.225	0.247	0.237	0.509	0.957	0.306	0.265	
J_{opt} , мА/см ²	14.031	13.99	14.35	14.34	29.62	29.55	30.15	38.25	37.85	
U_{xx} , В	2.5	2.517	2.35	2.35	1.015	1.015	1.024	0.62	0.61	
U_{opt} , В	2.16	2.218	2.08	2.08	0.89	0.89	0.896	0.52	0.51	
P_{opt} , Вт	0.48	0.53	0.47	0.51	0.21	0.45	0.86	0.16	0.14	
P_{ud} , Вт/м ²	303	310	298	298	263	263	270	199	193	
КПД, %	23	23	22	22	19.2	19.2	19.6	14.6	14.2	
dU_{xx}/dT , мВ/°C	—	—	—	—	—	—	-1.94	-1.85	-2.00	
dU_{opt}/dT , мВ/°C	-6	-6	-4.5	-4.5	-2.00	-2.00	-2.00	-1.85	-2.00	
dj_{k3}/dT , мА/см ² /°C	0.009	0.009	0.0116	0.0116	0.025	0.025	0.025	0.015	0.02	
dj_{opt}/dT , мА/см ² /°C	0.006	0.006	0.0093	0.0093	0.019	0.019	0.0196	0.019	0.02	
dP_{opt}/dT , мВт/см ² /°C	0.087	0.11	0.042	0.042	0.038	0.038	0.038	0.035	0.04	
Ориентировочная стоимость, \$ США	160	—	—	—	90	150	—	25	25	

* 3-п, 2-п, 1-п — трех-, двух- и однопереходные ФП

Таблица 2. Данные о деградации параметров ФП

Параметр	Изготовитель				ГП НИТИП (Украина)	
	Е. Н. Е (Бельгия), CESI (Италия)					
	Тип ФП					
	GaAs 3-n*	GaAs 2-n*	GaAs 1-n*	Si		
флюенс $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$	I_{opt}/I_{opt0}	0.98	0.95	0.83	0.79	
	U_{opt}/U_{opt0}	0.98	0.94	0.97	0.92	
	P_{opt}/P_{opt0}	0.91	0.85	0.81	0.73	
флюенс 10^{15} см^{-2}	I_{opt}/I_{opt0}	0.87	0.90	0.79	0.75	
	U_{opt}/U_{opt0}	0.94	0.93	0.92	0.87	
	P_{opt}/P_{opt0}	0.82	0.835	0.73	0.66	

* 3-п, 2-п, 1-п — трех-, двух- и однопереходные ФП

98° не должна превышать 20 %. Согласно данным [2] и в соответствии с нашими оценочными расчетами температурного режима для такой высоты и конкретных значений оптических коэффициентов максимальная равновесная рабочая температура панели ФП составляет 65° С.

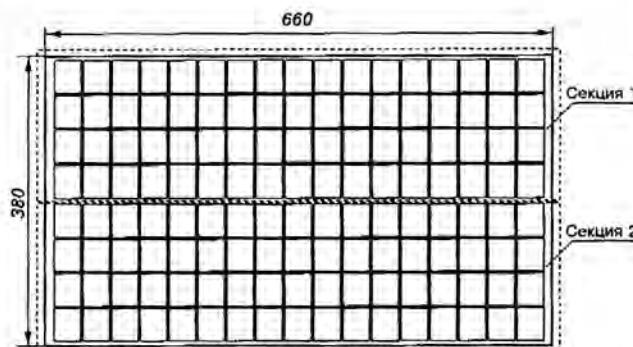
Выбор компоновки и расчет электрических характеристик СБ проводился для одно-, двух-, трех-

переходных арсенид-галлиевых фотопреобразователей фирм Е. Н. Е (Бельгия), CESI (Италия) и кремниевых фотопреобразователей производства ГП НИТИП (Харьков). Усредненные минимальные характеристики фотопреобразователей и сводные данные о температурных коэффициентах параметров ФП приведены в табл. 1. Сводные данные о коэффициентах деградации ФП без защитного

Таблица 3. Варианты компоновки и параметры СБ с размерами основания 660×380 мм

ФП	Характеристики компоновки			Параметры	Начало эксплуатации		$\Phi_{\text{флюенс}} \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$		$\Phi_{\text{флюенс}} \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$		Особенности компоновки			
	количество ФП в цепочке	количество цепочек	количество ФП		25° С	65° С	25° С	65° С	25° С	65° С	l_u	b_u	l_d	l_m
GaAs 3-п* 3.6×4.4 см	17	8	136	$U_{\text{опт}}$, В	36.72	32.64	35.99	31.91	34.52	30.44	636.0	362.5	12.0	5.8
				$I_{\text{опт}}$, А	1.76	1.80	1.72	1.76	1.53	1.57				
				$P_{\text{опт}}$, Вт	64.63	58.59	62.07	56.15	52.85	47.67				
GaAs 3-п* 4.1×4.24 см	15	8	120	$U_{\text{опт}}$, В	33.27	29.67	32.60	29.00	31.27	27.67	636.0	349.7	12.0	10.1
				$I_{\text{опт}}$, А	1.93	1.97	1.89	1.93	1.68	1.72				
				$P_{\text{опт}}$, Вт	64.14	58.35	61.60	55.92	52.46	47.49				
GaAs 2-п* 3.6×4.4 см	17	8	136	$U_{\text{опт}}$, В	35.36	32.30	33.24	30.18	32.88	29.82	636.0	362.5	12.0	5.8
				$I_{\text{опт}}$, А	1.80	1.85	1.71	1.76	1.62	1.67				
				$P_{\text{опт}}$, Вт	63.65	59.60	56.84	52.97	53.27	49.66				
GaAs 2-п* 4.1×4.24 см	15	8	120	$U_{\text{опт}}$, В	31.20	28.50	29.33	26.63	29.02	26.32	636.0	349.7	12.0	10.1
				$I_{\text{опт}}$, А	1.98	2.03	1.88	1.93	1.78	1.83				
				$P_{\text{опт}}$, Вт	61.65	57.73	55.05	51.31	51.60	48.11				
GaAs 1-п* 2×4 см	30	8	240	$U_{\text{опт}}$, В	26.70	24.30	25.90	23.50	24.56	22.16	643.5	330.5	8.3	16.5
				$I_{\text{опт}}$, А	1.90	1.90	1.57	1.58	1.50	1.50				
				$P_{\text{опт}}$, Вт	50.62	46.20	40.76	37.10	36.79	33.31				
GaAs 1-п* 4.1×4.24 см	15	8	120	$U_{\text{опт}}$, В	26.70	24.30	25.90	23.50	24.56	22.16	636.0	349.7	12.0	10.1
				$I_{\text{опт}}$, А	2.04	2.04	1.69	1.70	1.61	1.61				
				$P_{\text{опт}}$, Вт	54.36	49.61	43.77	39.84	39.51	35.77				
GaAs 1-п* 4×8 см	30	2	60	$U_{\text{опт}}$, В	26.88	24.48	26.07	23.67	24.73	22.33	621.0	324.5	19.5	18.5
				$I_{\text{опт}}$, А	1.91	1.92	1.59	1.59	1.51	1.52				
				$P_{\text{опт}}$, Вт	51.45	46.98	41.42	37.73	37.39	33.88				
Si 2×4 см	29	8	232	$U_{\text{опт}}$, В	15.60	13.20	14.35	11.95	13.57	11.17	622.0	330.5	19.0	16.5
				$I_{\text{опт}}$, А	2.45	2.45	1.76	1.77	1.84	1.84				
				$P_{\text{опт}}$, Вт	38.19	32.38	25.30	21.13	24.92	20.57				
Si 1.52×4.605 см	38	6	228	$U_{\text{опт}}$, В	19.89	16.77	18.30	15.18	17.30	14.18	633.1	283.8	13.5	32.1
				$I_{\text{опт}}$, А	2.12	2.12	1.67	1.68	1.59	1.59				
				$P_{\text{опт}}$, Вт	42.17	35.63	30.65	25.49	27.51	22.62				

* 3-п, 2-п, 1-п — трех-, двух- и однопереходные ФП;

 l_u — длина цепочки (стринга) последовательно соединенных ФП; b_u — ширина, занимаемая параллельно соединенными цепочками; l_d — расстояние от краев панели по длине; l_m — расстояние от краев панели по ширине, а также расстояние между секциями.

Компоновка СБ с размерами основания 660×380 мм трехпереходными GaAs-ФП с размерами 36×44 мм.

стекла после воздействия потока электронов с энергией $E = 1$ МэВ и плотностью $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и 10^{15} см^{-2} приведены в табл. 2.

Расчеты электрических характеристик и компоновка СБ с размерами 660×380 мм проводились для максимальной температуры ($T = 65^\circ \text{ С}$) на конец срока эксплуатации на орбите.

Рассчитанные варианты компоновки СБ приведены в табл. 3. При расчетах учитывались коэффициенты деградации ФП без защитных стекол, что приводит к получению заниженных значений параметров на конец срока эксплуатации: расстояние между фотопреобразователями (зазор) выбрано равным 1.5 мм.

На рисунке приведена схема компоновки СБ трехпереходными GaAs-ФП с размерами 36×44 мм.

Анализ полученных вариантов решений приводит к следующим выводам.

1. Наиболее полно удовлетворяют техническим требованиям и имеют повышенную радиационную стойкость СБ на основе трехпереходных ФП со структурой $\text{InGaP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$, которые обеспечивают удельную мощность 300—310 Вт/м². Более целесообразно использование трехпереходных фотопреобразователей с размерами 3.6×4.4 см, так как на конец срока активного существования солнечная батарея наиболее полно удовлетворяет требованиям по напряжению и по мощности.

2. Использование двухпереходных арсенид-галлиевых ФП дает несколько заниженные характеристики батарей, однако при этом уменьшается ее стоимость.

3. Солнечные батареи на однопереходных GaAs-ФП имеют еще более низкие технические характеристики. При этом количество ФП в цепочке увеличивается, процесс сборки усложняется, надежность устройства снижается. Однако при этом значительно снижается стоимость СБ.

4. Применение кремниевых ФП при размерах сотового основания панели СБ 660×380 мм не обеспечивает технических требований как по напряжению, так и по мощности, однако возможно их использование в СБ меньшей мощности.

Таким образом, оптимальным вариантом разрабатываемой солнечной батареи для системы энергоснабжения украинского молодежного спутника является СБ с использованием трехпереходных ФП со структурой $\text{InGaP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ фирмы E. N. E (Бельгия), CESI (Италия). Для усовершенствования конструктивно-технологических решений возможно использование клеевых композиций фирм Dow Corning, Nucil Technology (США), защитных стекол фирмы THALES (Великобритания), методов

микроконтактной и УЗ-сварки в процессе сборки СБ.

Предварительная оценка весовых характеристик СБ при использовании вышеуказанных материалов и комплектующих показала, что удельная масса СБ без каркаса при использовании трехпереходных ФП составляет 1.4...1.5 кг/м², а вес СБ на каркасе — 0.55...0.57 кг.

Предложенный конструктивно-технологический вариант решения СБ на основе трехпереходных GaAs-ФП обеспечит технические характеристики солнечных батарей космического применения на уровне лучших мировых образцов: удельный вес СБ — 2—2.2 кг/м²; КПД СБ для условий АМ0 — не менее 23 %; срок эксплуатации — не менее 10 лет.

1. Антонова В. А., Борщев В. Н., Копач В. Р. и др. Перспективные конструкторско-технологические решения монокристаллических кремниевых фотопреобразователей космического назначения // Радиотехника.—2002.—Вып. 125.—С. 110—116.
2. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Пер. с англ. — М.: Энергоиздат, 1983.—360 с.
3. High-efficiency $\text{GaInP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ dual and triple junction solar cells for space application // 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. — Vienna, Austria, 1998.—P. 3534—3539.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF SOLAR BATTERIES FOR THE SOLAR ENERGY SYSTEM OF THE UKRAINIAN YOUTH SATELLITE

*V. A. Antonova, V. N. Borschhev, A. M. Listratenko,
I. T. Tymchuk*

An analysis of output characteristics of solar batteries for the solar energy system of the UKRAINIAN YOUTH SATELLITE is carried out with the use of various types of solar cells&

УДК 629.12:678.5

В. І. Сливинський, М. В. Сливинський

Відкрите акціонерне товариство «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ

Ефективність застосування сотових конструкцій в ракетно-косміческій техніці

Надійшла до редакції 10.12.04

Розглянуто ефективність застосування чарункових заловнювачів та сотових конструкцій у виробах ракетно-космічної техніки. Наведено приклади створення сучасних чарункових конструкцій. Показано нові можливості зменшення маси чарункових конструкцій.

Сотовые конструкции широко применяются в ответственных агрегатах летательных аппаратов всех классов, в том числе ракетах различных типов, космических аппаратах [10].

Столь широкое применение этих конструктивно-технологических решений связано с высокой эффективностью сотовых заполнителей и конструкций [4, 6, 7, 11, 12].

Подтверждением этому служат высокие разрушающие напряжения сотовых конструкций по сравнению с другими при продольном сжатии, сдвиге, высокая усталостная прочность при изгибе, долговечность трехслойных панелей при воздействии переменных нагрузок, низкая поверхностная масса в широком диапазоне погонных сжимающих нагрузок при сжатии.

Сотовые конструкции обладают и рядом специфических свойств: акустической стойкостью, повышенной теплопроводностью, имеют низкую массу при использовании в качестве теплоизоляции гиперзвуковых летательных аппаратов, обладают повышенной звукоизолирующей способностью, длительной акустической стойкостью и многими другими уникальными свойствами.

В ракетно-космической технике можно выделить три направления использования сотовых конструкций:

- конструкционного назначения (головные обтекатели ракет, переходные отсеки, гаргроты, обтекатели антенн, элементы управления крылатых ракет);

- теплозащитного и теплоизоляционного назначения (аэродинамические экраны, лобовые щиты, спускаемые аппараты и др.);
- конструкции длительно работающие в условиях открытого космоса (антенны, панели негерметичных космических аппаратов, панели солнечных батарей, размеростабильные платформы и др.)

Одним из первых предприятий, применившим сотовые конструкции в конструкции ракет-носителей (РН) в бывшем СССР является ЦСКБ г. Самара. Это предприятие в конце 1960-х — начале 1970-х гг. освоило изготовление головных обтекателей, переходных отсеков, агрегатных отсеков с обшивками и сотовых заполнителей на основе стеклоткани. Сотовые конструкции изготавливали по интегральной технологии с соединением «мокрых» обшивок с сотовым заполнителем за счет связующего [15].

В переходных отсеках, головных обтекателях, гаргротах РН класса «Протон-М», «Рокот», «Ангара» ГКНПЦ им. М. В. Хруничева широкое применение нашли трехслойные сотовые конструкции с углепластиковыми обшивками и сотовые заполнители из алюминиевой фольги. Эти конструкции выполнили свою роль в концепции модернизации РН «Протон» применением новых конструкционных материалов с целью повышения энергомассовых характеристик РН; созданием новейших конструкций и современных технологий с целью увеличения массы выводимых полезных грузов.

За десять последних лет разработаны и освоены в производстве модификации головных обтекателей диаметром от 4100 мм до 4350 мм и длиной от 10 м до 15 м РН «Протон»: 77КЭ (масса 16 кг/м²); 14С75 (масса 13.5 кг/м²); БКБ (масса 12.5 кг/м²); БКА (масса 11 кг/м²).

В период с 1997 г. по настоящее время совершено более 40 успешных пусков РН «Протон-М» с головным обтекателем сотовой конструкции.

Начаты работы над современным головным обтекателем диаметром 5.1 м, поверхностная масса такого изделия будет около 6 кг/м² [8].

В спускаемых аппаратах РКК «Энергия» им. С. П. Королева и НПО им. С. А. Лавочкина сотовый заполнитель из стеклоткани изолирует металлический корпус от высоких тепловых нагрузок, воспринимаемых лобовым щитом.

Примером эффективного сочетания полимерных композиционных материалов и сотовых заполнителей являются панели солнечных батарей космического назначения [2, 3], которые вызвали необходимость существенного уменьшения толщин выпускаемых промышленностью препрогоов путем раскатки пасмы углеродных волокон до толщины в один монослой [13].

Панели солнечных батарей и панели негерметичных КА с тепловыми трубами успешно использованы в работающем на орбите КА «Ямал-100» (РКК «Энергия»).

Современным этапом совершенствования конструктивно-технологических решений и снижения массы панелей сотовых конструкций для КА «Ямал-200» является применение облегченного сотового заполнителя марки 5056-6.0-23П и нанесение клея ВК-36 на торцы сотовых заполнителей. За счет этого масса каркаса панелей солнечных батарей снизилась на 0.5 кг/м² и составила 1.6 кг/м².

Сотовые конструкции успешно применяются в ГКБ «Южное». Это панели солнечных батарей КА «Микроспутник», панели теплоизоляции для головных обтекателей РН «Днепр», «Зенит-2М».

Современные тенденции развития ракетно-космических систем и ужесточение требований к массовым характеристикам предопределяют более широкое применение сотовых конструкций в новых разработках ГКБ «Южное» [9]. Так, целесообразно рассмотреть возможность создания головных обтекателей для новых модификаций РН «Зенит» и «Циклон» трехслойной сотовой конструкции. Предварительный расчет показывает возможность снижения массы изделий до 40 % по сравнению с металлическим вариантом.

Одним из путей снижения массы КА «Микроспутник» является вариант изготовления силовой

конструкции платформы с использованием сотовых панелей. Новизна решения позволит снизить массу платформы на 30—40 % по сравнению с существующим аналогом.

ФГУП НПО ПМ им. академика М. Ф. Решетнева является наиболее динамичным предприятием, быстро осваивающим производство сотовых конструкций космического назначения. Оригинальная конструкция негерметичных панелей КА с жидкостными коллекторами сложной формы — это лишь одна из многих задач, которые в настоящее время успешно решает предприятие. Для этого потребовалась мобилизация не только собственных ресурсов предприятия (организация производства сотовых конструкций, приобретение нового оборудования и др.), но и ужесточение требований к качеству выпускаемых сотовых заполнителей, а также разработка новых видов сотовых заполнителей (только за последний год нами для НПО ПМ разработаны шесть новых типоразмеров сотовых заполнителей).

Среди разработок сотовых конструкций этого предприятия эллипсовидная вырезка из параболоида вращения спутника непосредственного телевизионного вещания; плита полезной нагрузки спутника обеспечения подвижной связи; астроплаты для размещения приборов системы ориентации и стабилизации; сотовая базовая плита и приборные стойки для размещения блоков ретрансляции и антенн спутника телевизионного вещания; панели негерметичного исполнения спутника фиксированной связи и др.

Для обеспечения предприятий ракетно-космического комплекса в ОАО «УкрНИИТМ» создано производство сотовых заполнителей из различных материалов: алюминиевой фольги, полимерной бумаги «Номекс», стеклоткани, крафт-бумаги, пленки ПЭТФ, углеродной ленты. Производятся более 60 типоразмеров сотовых заполнителей. Каждый из перечисленных заполнителей имеет свои специфические особенности и свою сферу применения. Так, сотовые заполнители из фольги имеют высокие показатели удельной прочности и жесткости, а также теплопроводны. Заполнитель из полимерной бумаги относится к самозатухающим материалам, влаго- и химически стоек, радиопрозрачен, кроме того, этот сотовый заполнитель обладает уникальной способностью сохранять эксплуатационные качества без необратимых повреждений при перегрузках в локальных участках. Сотовые заполнители на основе стеклоткани имеют хорошие теплозащитные и теплоизоляционные свойства, радиопрозрачны. Сотовые заполнители из крафт-бумаги являются самыми дешевыми, с помощью пропитывающих составов им можно придать свойства негорю-

чести, влаго- и гибкостойкости, повысить их механические характеристики. Углесотопласт обладает максимальными абсолютными и удельными механическими характеристиками, с обшивками из углепластика является химически однородной и размеростабильной конструкцией. Сотовые заполнители на основе стеклоткани с ячейкой гибкой формы позволяет изготавливать изделие сложной геометрической формы. Паяные сотовые заполнители из стали и титановых сплавов применяются в изделиях ракетно-космической техники, эксплуатируются до температур 450 °C. Для конструкций, нагреваемых до 1000 °C и выше, применяются сотовые заполнители из стали, полученные сваркой [5].

С целью дальнейшего совершенствования характеристик массы летательного аппарата разработана методика оптимизации сотовых конструкций с включением в параметры оптимизации геометрических и механических характеристик сотовых заполнителей [10].

На примере головных обтекателей показана возможность дополнительного снижения их массы (на 10–13 %) за счет использования эксклюзивного сотового заполнителя.

В последнее время возникла необходимость в разработке суперлегких (массой менее 1 кг/м²) сотовых панелей (панели солнечных батарей и панели теплоизоляции внутриобтекательного пространства).

Применение серийно выпускаемых пленочных kleев массой 280–300 г/м² в таких конструкциях неоправданно, так как относительная масса kleев в сотовых конструкциях при этом достигает 55–70 %.

Разработана и освоена технология адресного нанесения клея на торцы ячеек сотовых заполнителей, позволяющая регулировать массу клея от 20 до 120 г/м² при одностороннем его нанесении [14].

Применение всех вышеперечисленных возможностей позволяет вести дальнейшее совершенствование характеристик массы летательного аппарата. Опыт показывает, что при замене монолитных или подкрепленных конструкций на сотовые достигается снижение массы на 25–40 %, новые возможности создания рациональных сотовых конструкций позволяют повысить этот показатель до 45–55 %.

Достигнутый и перспективный уровень массовых характеристик изделий ракетно-космической техники сотовых конструкций приведен в таблице.

Рациональное применение сотовых конструкций в той или иной области должно основываться на принципе достаточности их функциональных характеристик, связанном с экономическим аспектом [11]. Это, в свою очередь, требует комплексного анализа конструктивно-технологических решений применяемых сотовых конструкций с учетом техно-

Уровень массовых характеристик изделий ракетно-космической техники сотовых конструкций

Изделие	Фирма	Погонная масса, кг/м ²	
		достигнутая на 2003 г.	перспективная 2007 г.
Каркасы панелей солнечных батарей «Ямал-100», «Ямал-200»	РКК «Энергия»	1.622	1.0
«Микроспутник», каркасы БФ головные обтекатели РН «Протон-М»	ГКБ «Южное»	1.6	1.0
Панели негерметичных корпусов КА «Ямал» с тепловыми трубами	ГКНПЦ им. М. В. Хруничева	11.0	6.0
Панели негерметичных корпусов КА связанных спутников с жидкостными коллекторами	РКК «Энергия»	6.0–8.0	4.0–7.0
	НПО ПМ	5.4–12.4	5.0–10.0

логии изготовления сотовых заполнителей на различных стадиях подготовки производства и изготовления изделий.

Таким образом, объективными предпосылками для эффективного применения сотовой конструкции в ракетно-космической технике и других областях является не только уже реализованные и показанные преимущества сотовой конструкции, но и решение ряда проблем, связанных с оптимизацией технологических допусков на параметры сотового заполнителя в зависимости от назначения сотовой конструкции, в которой он применяется, разработкой классификатора сотовых заполнителей, квалиметрии сотовых заполнителей в системе управления качеством продукции и другими, в комплексе составляющими научные основы технологической подготовки и производства сотовых заполнителей и сотовых конструкций.

- Гайдачук А. В., Сливинский В. И. О концепции квалиметрии и управления качеством производства сотовых заполнителей и конструкций // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков: НАКУ, 2000.—Вып 22(5).—С. 56–64.
- Гайдачук В. Е., Грошевой А. И., Кириченко В. В., Сливинский В. И. Концепция теоретического обеспечения технологии изготовления суперлегких панелей солнечных батарей космического назначения // Авиационно-космическая техника и технологии: Тр. Харьков. авиац. ин-та им. Н. Е. Жуковского за 1997 г. — Харьков: ХАИ, 1998.—С. 322–327.
- Гайдачук А. В., Кириченко В. В., Сливинский В. И. и др. Методика оптимального проектирования облегченных конструкций солнечных батарей // Авиационно-космическая

- техника и технология: Сб. науч. тр. — Харьков: ХАИ, 1995.—С. 212—217.
4. Ендогур А. И., Вайнберг М. В., Иерусалимский К. Н. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. — М.: Машиностроение, 1986.—200 с.
 5. Иванов А. А., Капин С. М., Семенов В. И. Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники. — М.: Энергоатомиздат, 2000.—584 с.
 6. Кобедев В. Н., Коварский Л. М., Тимофеев С. И. Расчет трехслойных конструкций. — М.: Машиностроение, 1984.—304 с.
 7. Панин В. Ф., Гладков Ю. А. Конструкции с заполнителями. Справочник. — М.: Машиностроение, 1991.—272 с.
 8. Петраковский С. В., Бахвалов Ю. О., Мухин Н. В., Комиссар О. Н. Возможности повышения энергомассовых характеристик ракеты-носителя «Протон-М» путем внедрения конструкций из полимерных композиционных материалов // Тез. докл. XII науч.-техн. конф. — Обнинск, 2001.—С. 107—110.
 9. Сигало В. Г., Артеменко Ю. Г., Телевной Ф. М. Перспективы применения СК в разработках КБ «Южное» // Космич. техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. — Днепропетровск: ГКБ «Южное», 2004.—Вып. I.—335 с.
 10. Сливинский В. И. Конструктивно-технологические решения по созданию рациональных сотовых конструкций различного назначения // Машиностроение Украины: Новые технологии. — Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1999.—С. 51—88.
 11. Сливинский В. И. Научно-технические предпосылки создания в Украине наукоемкой технологии и производства сотовых заполнителей и конструкций на их основе для различных отраслей промышленности // Технологические системы.—1999.—№ 2.—С. 16—18.
 12. Сливинский В. И., Переат В. В., Ткаченко Г. В. Сотовые заполнители. Классификация, применение, расчет физико-механических характеристик. — ЦНТИ «Поиск», 1990.—43 с.
 13. Сливинский В. И., Тамайо Х. Э. Технологические возможности формирования супертонких препрогонов для несущих панелей солнечных батарей космического назначения // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Гос. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков: ГАКУ «ХАИ», 1999.—Вып. 17(4).—С. 68—77.
 14. Сливинский В. И., Тамайо Х. Э. Эффективность нанесения клея из расплава на торцы сотового заполнителя // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». — Харьков: НАКУ, 2000.—Вып. 22(5).—С. 146—150.
 15. Таран Г. Ф., Кашицин А. Н., Максимов С. В., Постников О. В. Применение конструкций из полимерных композиционных материалов как перспективное направление решения задач по созданию изделий типа «Союз» // Материалы двадцать второй ежегодной международной науч.-практ. конф. «Композиционные материалы в промышленности». — Ялта, 2002.—С. 117—118.

EFFICIENCY OF APPLICATION OF CELLULAR DESIGNS IN ROCKET-SPACE TECHNOLOGY

V. I. Slyvyn's'kyj, M. V. Slyvyn's'kyj

The efficiency of application of cellular fillers and cellular designs in products of rocket-space technology is considered. Some examples of creating modern cellular designs are given. New possibilities of decrease in weight of cellular designs are shown.

УДК 681.3

Н. М. Куссуль, А. М. Лавренюк, А. Ю. Шелестов, О. Г. Лобунець, С. В. Скакун

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

Розробка віртуального інформаційного середовища для спільнотного виконання космічних проектів

Надійшла до редакції 10.12.04

Розглядаються аспекти створення системи підтримки спільної роботи колективів (так званої «віртуальної» організації) при виконанні складних проектів. В основу єдиного інформаційного середовища покладено сучасні інформаційні засоби створення розподілених програмних систем — GRID-технології. Даний підхід може бути застосований при реалізації космічних проектів та при розробці систем дистанційного навчання.

ВСТУП

Зазвичай при виконанні складних та масштабних проектів виникає необхідність взаємодії наукових колективів та установ різної спеціалізації. Подібна розподілена розробка потребує створення єдиного інформаційного простору, у межах якого забезпечуватиметься ефективне спілкування учасників, обмін результатами та вільний доступ до інформації для розробників. Водночас поточна інформація про розробку повинна бути закритою для сторонніх осіб та захищеною від несанкціонованого доступу. Враховуючи великі обсяги інформації, що зазвичай використовуються при виконанні складних проектів, нагальна є потреба створення ефективних методів обробки розподіленої інформації та забезпечення надійної мережевої взаємодії.

Потужним механізмом створення інформаційного простору для розподіленої розробки складних систем є GRID-технологія (Global Resource and Information Database) [1—4]. Вона забезпечує створення «віртуальної» установи, надає можливість спільнотного використання обчислювальних та інформаційних ресурсів та дозволяє окреслити простір (закритий для доступу ззовні) для спілкування і спільнотного розв'язання різних наукових та конструкторських задач. GRID-технологія забезпечує можливість масштабування розподіленої системи, функціонування в гетерогенному середовищі (до складу якого можуть входити різні операційні платформи), прозорість для користувачів.

Тут розглядаються аспекти створення «віртуальної» організації для спільнотного виконання проектів різними колективами і організаціями. Реалізація такого єдиного інформаційного середовища дозволить значно підвищити ефективність розподіленої розробки та інформованість учасників проекту. В основу єдиного інформаційного середовища покладено сучасні інформаційні засоби створення розподілених програмних систем (GRID-технології) з прозорими можливостями обміну інформаційними ресурсами, належним рівнем безпеки та можливістю використання кінцевими користувачами з різним рівнем комп’ютерної підготовки.

ОПИС GRID-ТЕХНОЛОГІЙ

GRID-програмне забезпечення середнього рівня (middleware), що дозволяє інтегрувати розподілені та різномірні інформаційні та обчислювальні ресурси [3]. GRID виступає проміжною ланкою між користувачем та апаратним і програмним забезпеченням. Важливою властивістю GRID-технології є можливість авторизації доступу до мережі, що дозволяє реалізувати на цій базі «віртуальні» наукові лабораторії та організації і створювати високоефективні системи дистанційного навчання.

Робота GRID основана на використанні Web-служб, що дозволяє зробити GRID-систему легко масштабованою, прозорою для використання та забезпечити можливість функціонування у гетеро-

генному середовищі. На сьогоднішній день така технологія активно розвивається, вважається найбільш перспективною для розв'язання комплексних задач та набуває все ширшого розповсюдження.

Прикладами GRID-систем є *Information PowerGRID* (створена за ініціативою NASA для розподіленої інтелектуальної обробки складних космічних даних), *DataGRID* (розроблялася в межах європейської програми FP5 за підтримки ESA для розв'язання комплексних задач екологічного моніторингу та моделювання фізичних і біологічних процесів у космосі) та *TerraGRID* (високоефективна мережа для розв'язання складних наукових задач на основі паралельних обчислень). Ця технологія використовується компанією Ford для розподіленої розробки нових автомобілів. Інститутом космічних досліджень НАНУ-НКАУ було розроблено спеціалізований прототип GRID-системи для обробки даних Європейського метеорологічного супутника «Метеосат» [5]. Ця система дозволяє отримувати дані з віддаленого архіву та виконувати їхню розподілену обробку (на декількох вузлах) з використанням інтелектуальних, зокрема нейромрежевих методів розпізнавання зображень.

Слід відзначити, що на сьогодні GRID-системи розробляються в усіх регіонах земної кулі (за винятком, можливо, центральної та східної Європи).

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЕДИНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ

Для розподіленої розробки складних проектів ми пропонуємо створення единого інформаційного простору з використанням технології GRID. В рамках «віртуальної» організації забезпечуватиметься необхідна відкритість спілкування учасників проекту та закритість інформації для доступу ззовні.

Зазвичай розробка систем підтримки спільної роботи колективів потребує розв'язання наступних основних задач.

- Створення служби сертифікації ключів для авторизованого доступу до системи та забезпечення їхнього розповсюдження між учасниками.
- Створення служби для інтерактивного обміну інформацією.
- Створення служби контролю версій документації з проекту, що виконується.

В даній роботі для розробки GRID-систем пропонується використовувати безкоштовне та вільно розповсюджуване програмне забезпечення: *Globus Toolkit* (www.globus.org), *Axis WS engine* (www.apache.org), *Tomcat servlet container*

(www.apache.org), RDBMS (HSQL, MySQL, PostgreSQL), *Gridsphere* (www.gridsphere.org), а також технології Java, XML, WSDL, протоколи SOAP, XML-RPC, SSL та стандарти X.509 (цифрових сертифікатів), OGSI1.0 та JSR168 (portlet API). Використання стандарту OGSI1.0 дозволяє створювати масштабовані GRID-системи та інтегрувати їх з уже існуючими системами, що використовуються для розв'язання аналогічних задач (наприклад, система *EuroDataGrid*).

ВИМОГИ ДО АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ

Як типова система підтримки спільної роботи колективів запропонована система повинна містити наступні програмні компоненти: реєстр організацій-учасників проекту, служби обміну повідомленнями між користувачами (чат, інтернет-пейджер, форум), служба каталогів для доступу до документів, служба для пошуку по інформаційних ресурсах системи, служби контролю версій документів.

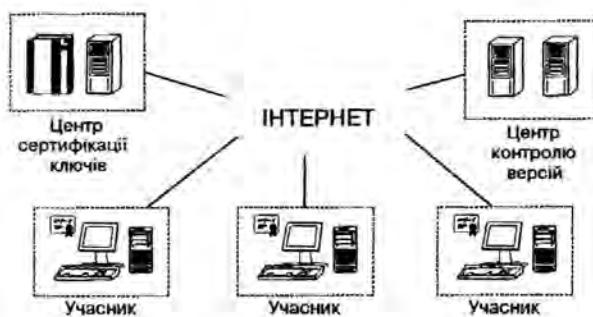
Система повинна забезпечувати відкритість спілкування між учасниками проекту, прозорий доступ до скриньки інформаційних ресурсів організацій-учасників, можливість доступу до обчислювальних ресурсів організацій-учасників та до існуючих інформаційно-обчислювальних додатків у вигляді GRID-служб. Система також повинна надавати Web-інтерфейс, який доступний з будь-якого пристрою, що підтримує стандарти HTTP і HTML. Крім того, слід забезпечити можливість контролю версій документів для запобігання випадкової або зловмисної модифікації даних у системі, аутентифікацію і авторизацію користувачів перед доступом до ресурсів системи, безпечний спосіб передачі даних по загальнодоступних каналах зв'язку для запобігання перехопленню інформації третіми особами.

Для забезпечення масштабованості та універсальності запропонованої системи потрібно дотримуватися наступних вимог до сумісності: для обміну даними між розподіленими компонентами у системі повинні використовуватися протоколи, що базуються на XML (наприклад, протокол SOAP). Базові компоненти системи необхідно реалізовувати на основі технології Java для можливості їхнього використання незалежно від типу операційної системи. GRID-служби мають бути реалізовані згідно із специфікацією OGSA/OGSI. Інтерфейси GRID-служб повинні відповідати стандарту GWSLD; інтерфейс користувача є сенс реалізувати у вигляді Web-порталу з використанням технології портлетів (специфікація JSR168); за стандарт для

цифрових сертифікатів користувачів для роботи з системою використовується X.509; за базову операційну систему слід використовувати Windows XP/2000/2003 та Linux.

При створенні єдиного інформаційного простору програмне забезпечення системи повинно відповісти наступним вимогам: сервери програмних додатків мають забезпечувати функціонування контейнера для GRID-служб (наприклад, Apache Tomcat, IBM WebSphere, JBOSS, Globus Toolkit); сервери баз даних повинні забезпечувати функціонування СКБД (таких як PostgreSQL, MySQL); Web-сервер повинен забезпечувати функціонування Web-інтерфейсу (Apache Tomcat, IBM WebSphere, JBOSS, GridSphere Portal Framework).

Архітектуру запропонованої системи наведено на рисунку.



Архітектура GRID-системи для спільної роботи учасників «віртуальної» організації

ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ

Однією з областей застосування запропонованої системи може стати космічна галузь. Зазвичай космічні проекти направлені на розв'язання складних задач різнопрофільними організаціями та установами. Забезпечення ефективної взаємодії між ними — це запорука успішної реалізації проекту. Прикладом такого проекту є роботи з розробки українського молодіжного мікросупутника. Це складний та відповідальний процес, у рамках якого беруть участь різні молодіжні колективи. Розподілена розробка, інтерактивний обмін інформацією, забезпечення авторизованого доступу та контролю версій документації — все це може бути реалізовано на основі GRID-технології в межах «віртуальної» організації.

Ще однією сферою застосування GRID-технології є розробка систем дистанційного навчання, у межах яких також необхідно забезпечувати інтерактивну взаємодію між викладачем та учнями,

роботу з різними форматами даних, авторизований доступ до системи та ін. GRID-технологія може стати ефективним механізмом при розв'язанні і цих задач.

ВИСНОВКИ

Таким чином, для створення єдиного інформаційного середовища взаємодії різних колективів та установ при виконанні складних та масштабних проектів пропонується використовувати GRID-технологію, яка забезпечить різноманітні сервісні функції, пов'язані з обміном інформаційними ресурсами, працюватиме у гетерогенному середовищі, буде ліцензійно «чистою», легко масштабована, з належним рівнем безпеки, і може бути адаптована майже до будь-якого процесу колективної розробки. Використання такої системи дозволить значно підвищити ефективність розподіленої розробки та інформованість між розробниками. Даний підхід доцільно використовувати для розв'язання задач, які виникають при виконанні проектів у космічній галузі та для реалізації систем дистанційного навчання.

1. Коваленко В., Корягин Д. Эволюция и проблемы Grid // Открытые системы.—2003.—№ 1.—С. 27–33.
2. Попков Ю. С. Макросистемы и GRID-технологии: моделирование динамических стохастических сетей // Проблемы управления.—2003.—№ 8.—С. 10–20.
3. Foster I., Kesselman C., Nick J. M., Tuecke S. The Physiology of the Grid — An Open Grid Services Architecture for Distributed Systems Integration. (<http://www.globus.org/research/papers/ogsa.pdf>)
4. Krauter K., Buyya R., Maheswaran M. A Taxonomy and Survey of GRID Resource Management Systems and Distributed Computing.— Software-Practice and Experience, John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
5. Kussul N., Lobunets A., Skakun S. Grid System for Meteosat Data Processing // Сб. докладов Міжнарод. науково-практич. конф. «Єдине інформаційне пространство». — Дніпропетровськ, 2003.—С. 21–22.

A VIRTUAL INFORMATIONAL ENVIRONMENT FOR COLLABORATIVE SPACE RESEARCH PROJECT DEVELOPMENT

N. M. Kussul, A. M. Lavrenyuk, A. Yu. Shelestov,
O. G. Lobunets, S. V. Skakun

We consider some practical aspects of grouping ware development to enable and support collaborative work during complex space research projects (so-called Virtual Organization). Offered virtual environment is based on modern technologies for distributed system development, such as GRID. Our approach may be applied to implementation of space projects and to elaboration Learning Management Systems.

В. Ф. Губарев, Л. И. Самойленко, Т. В. Ильенко,
Л. В. Подгородецкая, Л. Н. Колос, М. А. Кирносова

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

Структурная целевая модель космической деятельности в Украине

Надійшла до редакції 27.04.05

Розробляється структурна цільова модель космічної діяльності як інформаційно-аналітичний інструмент для обґрунтування стратегічного планування. Багаторівнева ієрархічна система цілей космічної діяльності формується з урахуванням пріоритетів державної політики. Галузеві цілі та цілі нижніх рівнів ієрархії будується методом системної декомпозиції.

Космическая отрасль — это сложная социально-экономическая система. Многочисленные вариации факторов внутренней и внешней по отношению к отрасли среды обуславливают многовариантность стратегических альтернатив развития. Для оптимизации принимаемых плановых решений необходимы генерация и анализ альтернативных сценариев — вариантов планов. Эффективным систематизированным способом изучения вариантов будущего развития является моделирование.

Разработка и использование модели космической деятельности позволяют применить методы количественного и качественного анализа для выбора общественно и экономически выгодных путей развития отрасли.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Космическая деятельность как объект исследования — это сложный научно-техническо-социально-экономический процесс, многомерная и многоуровневая распределенная динамическая система. Для такого класса объектов нет строгого математического описания, возникающие задачи являются, как правило, многокритериальными и требуют учета и оценки многих влияний, сил и последствий, характеризующих варианты решений [1, 2, 4]. Для построения модели такой крупномасштабной системы необходимы видение и структурирование проблемы в целом, выявление состава подсистем и их взаимосвязей, разработка методологии их формализации [1]. Проблемное поле является многокоор-

динатным и характеризуется финансовыми, технологическими, научными, geopolитическими, социальными показателями. В этой связи модель должна отражать производственные, экономические, коммерческие, научно-технические, просветительские и другие аспекты космической деятельности, обеспечивать возможность выявления факторов — движущих сил, обуславливающих развитие.

Управление отраслью как объектом макроэкономики может осуществляться в соответствии с одним из известных принципов — «управление от достигнутого» и «управление по целям». В настоящее время реализуется принцип опережающего управления, когда во главу угла ставятся желаемые конечные результаты — цели. Они выполняют следующие функции:

- отражают идеологию космической деятельности и концепцию ее развития;
- являются одним из критериев для выделения проблем, принятия решений, контроля и оценки результатов работ;
- обеспечивают координацию работы отрасли как разветвленной организационной структуры.

Построение модели космической деятельности в Украине проводится в рамках метода «управление по целям», идеология которого изложена в работе [4]. Применение этого метода предусматривает последовательное решение следующих задач:

1. Формирование на базе приоритетов государственной политики стратегических целей космической деятельности и развития отрасли как сектора национальной экономики. Космическая политика должна учитывать текущее состояние и

**ВЫБОР ГЕНЕРАЛЬНОЙ ЦЕЛИ И СТРАТЕГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПРИОРИТЕТОВ**

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ЦЕЛЕЙ ОТРАСЛИ

АСПЕКТЫ ЦЕЛЕПОЛАГАНИЯ

Направления деятельности	Временные горизонты	Функции и показатели развития отрасли	Организационные уровни
Научные космические исследования Дистанционное зондирование Земли Спутниковые системы телекоммуникаций Навигационные и специальные информационные системы Космические комплексы Развитие прогрессивных технологий, производственной и экспериментальной базы Обеспечение интересов государства в сфере национальной безопасности	Долгосрочные Среднесрочные Оперативные	Научно-технические Производственные Технологические Социальные Иновационные Оптимизация структуры Коммерциализация	Подразделения отрасли Государственные и акционерные организации и предприятия Международная кооперация

Рис. 1. Выбор генеральной цели и стратегических целей на основе государственных приоритетов

потенциальные возможности отрасли, цели и задачи международного сотрудничества, обязательства Украины по договорам и соглашениям, она должна быть адаптирована к мировым тенденциям развития космонавтики, мировым инвестиционным процессам.

2. *Построение методом системной декомпозиции иерархической системы целей.* Для координации космической деятельности как сложной многоуровневой структуры необходимы как широко сформулированные цели верхнего уровня, так и цели менее высокого порядка, которые обеспечивают выполнение главных целей. Главные цели декомпозируются на цели более низкого ранга, каждая из которых может быть, в свою очередь, аналогичным образом декомпозирована. Такой итеративный процесс обеспечивает построение многоуровневой иерархической системы целей, при этом на нижнем уровне иерархии находятся конкретные задания, программы, проекты. Цели подсистем должны быть совместными, реальными, должны вносить конкретный вклад в главные цели. Набор координат целеполагания должен быть достаточно полным, охватывая все аспекты космической деятельности (рис. 1).

3. *Установление топологии взаимосвязей между элементами целевой модели, определение воздействий со стороны внешней среды — экономических и политических реалий, в которых функционирует отрасль.* Постоянная изменчивость внешнего окружения является источником проблем и

неопределенностей. Отрасль получает от внешней среды ресурсы в виде материалов, технологий, знаний, информации, кадров и взаимодействует с потребителями продукции. Факторы внешней среды — конкуренция, государственное регулирование, социальные показатели и др.

4. *Создание формализованного описания построенной системы целей путем выявления информации, циркулирующей в системе, выделения показателей и параметров, определения факторов, которые влияют на достижение целей.* Цели верхнего уровня иерархии носят в основном качественный характер, нижние подсистемы могут иметь качественное (вербальное) и количественное описание.

Решение поставленной задачи возможно лишь на основе применения системного подхода, когда учитывается вся совокупность свойств и характеристик рассматриваемого объекта моделирования.

ЦЕЛЕВАЯ МОДЕЛЬ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В УКРАИНЕ

Входная информация для построения модели: информация о космической деятельности в Украине и за рубежом, о национальных и международных космических проектах с участием Украины, Общегосударственная (Национальная) космическая программа Украины (О(Н)КПУ) на 2003—2007 гг. [3].

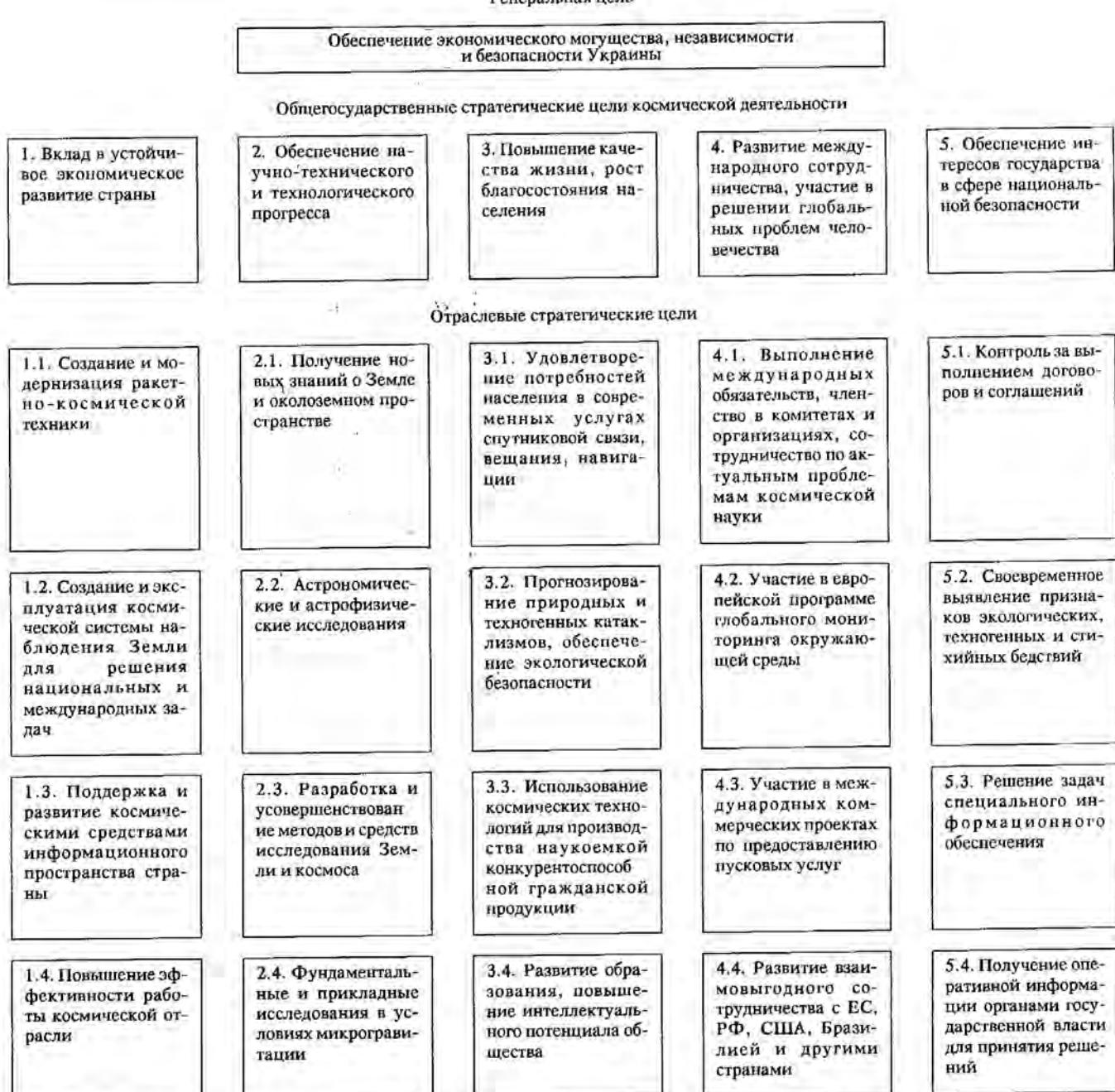


Рис. 2. Система целей космической деятельности общегосударственного уровня

Тип модели и методы моделирования. Наиболее адекватной поставленной задаче является структурная сетевая модель, позволяющая учесть иерархический характер и многосвязность объекта моделирования. Космическая деятельность в Украине рассматривается как целостная сложная открытая система, состоящая из взаимосвязанных и взаимо-

зависимых подсистем. Для построения модели использован агрегативно-декомпозиционный подход. На этапе использования модели в задачах планирования и оценки эффективности космической деятельности применяются методы компьютерного моделирования, технологического предвидения, научного прогнозирования. Исследуемая система явля-

Система целей отраслевого уровня

1.1. СОЗДАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

- 1.1.1. Создание и развитие средств доступа в космос
 - 1.1.1.1. Изготовление ракет-носителей
 - 1.1.1.2. Создание нового КРК «Циклон-4»
 - 1.1.1.3. Модернизация РН «Зенит» и «Днепр»
 - 1.1.1.4. Создание новой РН легкого класса
 - 1.1.1.5. Поддержка и развитие наземной инфраструктуры КРК, командно-измерительных средств управления
- 1.1.2. Разработка и изготовление космических аппаратов.
 - Создание КА нового поколения
 - 1.1.2.1. Создание КА «Сич-1М»
 - 1.1.2.2. Создание КА «Микроспутник»
 - 1.1.2.3. Разработка и изготовление КА для космической системы оптико-электронного наблюдения Земли «Сич-2»
 - 1.1.2.4. Разработка и изготовление КА для космической системы наблюдения Земли высокой разрешающей способности «Сич-3»
- 1.1.3. Обеспечение создания и развития РКТ
 - 1.1.3.1. Разработка и создание двигателей для РН и микроспутников
 - 1.1.3.2. Космическое приборостроение
 - 1.1.3.3. Создание и внедрение новых технологий, материалов, прикладные исследования
 - 1.1.3.4. Развитие производственной и экспериментальной базы
 - 1.1.3.5. Стандартизация и нормативно-техническое обеспечение
 - 1.1.3.6. Системные исследования перспектив развития РКТ

1.2. СОЗДАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ И МЕЖДУНАРОДНЫХ ЗАДАЧ

- 1.2.1. Развитие национального космического сегмента ДЗЗ за счет запуска КА «Сич-1М», «Микроспутник», «Сич-2», «Сич-3»
- 1.2.2. Модернизация и эксплуатация наземных программно-технических комплексов
- 1.2.3. Разработка методологического, аппаратурного и программного обеспечения для решения научных и тематических задач
- 1.2.4. Прием, обработка и распространение данных. Создание сегмента услуг пользователя. Внедрение в практику технологий ДЗЗ
- 1.2.5. Создание информационно-аналитического Центра для принятия решений в кризисных ситуациях
- 1.2.6. Решение задач специального информационного обеспечения

1.3. ПОДДЕРЖКА И РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА СТРАНЫ

- 1.3.1. Создание и развитие космических навигационных и специальных информационных систем
 - 1.3.1.1. Высокоточное координатно-временное обеспечение
 - 1.3.1.2. Оперативное обеспечение безопасности подвижных объектов
 - 1.3.1.3. Сбор и обработка геофизической информации
 - 1.3.1.4. Контроль и анализ космической обстановки. Баллистическое обеспечение полетов КА. Специальное информационное обеспечение

- 1.3.2. Развитие наземной инфраструктуры космических систем связи, вещания, передачи данных
 - 1.3.2.1. Внедрение современных цифровых технологий спутниковой связи
 - 1.3.2.2. Обеспечение многоканального спутникового телевидения и радиовещания
 - 1.3.2.3. Высокоскоростной доступ в интернет
- 1.3.3. Создание телекоммуникационной сети интегрированного обслуживания объектов
- 1.3.4. Создание национального космического сегмента спутниковой связи и вещания

1.4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

- 1.4.1. Структурная перестройка, создание вертикально-интегрированных структур, внедрение рыночных механизмов хозяйствования
- 1.4.2. Совершенствование управления отраслью. Информационное обеспечение
- 1.4.3. Внедрение принципов коммерциализации
 - 1.4.3.1. Продвижение отечественной РКТ на мировой рынок
 - 1.4.3.2. Развитие рынка услуг спутниковой связи, вещания, навигации, данных ДЗЗ, интеграция в мировой рынок
 - 1.4.3.3. Передача космических технологий в другие сферы экономики
- 1.4.4. Привлечение инвестиций в перспективные сферы деятельности
- 1.4.5. Развитие космического права, правовых основ реструктуризации и коммерциализации отрасли
- 1.4.6. Инновационное развитие отрасли, разработка и использование новых и прорывных технологий
 - 1.4.6.1. Определение перспективных направлений развития ракетно-космической техники
 - 1.4.6.2. Развитие двигателестроения
 - 1.4.6.3. Создание нового поколения приборов и систем управления с использованием новой элементной базы, принципов унификации и миниатюризации
 - 1.4.6.4. Разработка технологий создания перспективных материалов и источников питания
 - 1.4.6.5. Предотвращение техногенного загрязнения
- 1.4.7. Проведение фундаментальных исследований в ПАНУ и организациях отрасли

2.1. ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ЗНАНИЙ О ЗЕМЛЕ И ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

- 2.1.1. Исследование влияния космических факторов на биосферу Земли
- 2.1.2. Изучение процессов в ионосфере и магнитосфере, мониторинг «космической погоды»
- 2.1.3. Изучение глобальных и региональных изменений окружающей среды и климата

2.2. АСТРОНОМИЧЕСКИЕ И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- 2.2.1. Наблюдение и изучение Солнца и солнечно-земных связей
- 2.2.2. Разработка и реализация программы исследования Луны, планет, малых тел Солнечной системы
- 2.2.3. Проведение внеатмосферных астрофизических наблюдений, создание орбитальных обсерваторий
- 2.2.4. Проведение радиоастрономических и радиоинтерферометрических исследований и наблюдений

Окончание таблицы

<p>2.3. РАЗРАБОТКА И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ И КОСМОСА</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.3.1. Дооснащение и модернизация средств НЦУВКЗ 2.3.2. Создание Центра обработки и распространения научной информации 2.3.3. Создание наземной системы мониторинга ионосферы 2.3.4. Разработка нового поколения приборов, методик и программ для перспективных исследований Земли, дальнего и ближнего космоса 	<p>3.4. РАЗВИТИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА ОБЩЕСТВА</p> <ul style="list-style-type: none"> 3.4.1. Популяризация новых знаний по космической тематике 3.4.2. Научная и просветительская деятельность молодежных космических центров. Разработка и реализация образовательных программ 3.4.3. Подготовка кадров для космической отрасли 3.4.4. Создание украинского молодежного спутника
<p>2.4. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.4.1. Определение механизмов действия микрогравитации на биологические объекты, разработка перспективных биотехнологий 2.4.2. Исследование физико-химических процессов в жидкостях, газах и смесях, получение в космосе уникальных материалов 2.4.3. Разработка научных основ и аппаратуры для космических технологий 	<p>4.1. ВЫПОЛНЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ ОБЯЗАТЕЛЬСТВ, ЧЛЕНСТВО В КОМИТЕТАХ И ОРГАНИЗАЦИЯХ, СОТРУДНИЧЕСТВО ПО АКТУАЛЬНЫМ ПРОБЛЕМАМ КОСМИЧЕСКОЙ НАУКИ</p> <ul style="list-style-type: none"> 4.1.1. Сопровождение выполнения обязательств по защите ракетных технологий 4.1.2. Реализация Программы космических экспериментов на РС МКС 4.1.3. Предоставление космической информации, обмен спутниковых данными 4.1.4. Совместное использование наземной космической инфраструктуры
<p>3.1. УДОВЛЕТВОРЕННИЕ ПОТРЕБНОСТЕЙ НАСЕЛЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛУГАХ СВЯЗИ, ВЕЩАНИЯ, НАВИГАЦИИ</p> <ul style="list-style-type: none"> 3.1.1. Повышение качества и объема услуг интерактивной и мультимедийной связи, вещания, доступа в интернет 3.1.2. Высвобождение новых форм обучения с применением телекоммуникационных технологий 3.1.3. Предоставление услуг высокоточного позиционирования и временного обеспечения 3.1.4. Предоставление качественного прогноза погоды 	<p>4.2. УЧАСТИЕ В ЕВРОПЕЙСКОЙ ПРОГРАММЕ ГЛОБАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ</p> <p>4.3. УЧАСТИЕ В МЕЖДУНАРОДНЫХ КОММЕРЧЕСКИХ ПРОЕКТАХ ПО ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ ПУСКОВЫХ УСЛУГ</p> <ul style="list-style-type: none"> 4.3.1. «Морской старт» 4.3.2. «Циклон-4» 4.3.3. «Днепр» 4.3.4. «Наземный старт»
<p>3.2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ КАТАКЛИЗМОВ, ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ</p> <p>3.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НАУКОЕМКОЙ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ГРАЖДАНСКОЙ ПРОДУКЦИИ</p> <ul style="list-style-type: none"> 3.3.1. Производство товаров массового потребления, транспортных средств, машин и оборудования для энергетики, сельского хозяйства, пищевой промышленности, авиации, медицины 3.3.2. Создание новых рабочих мест 3.3.3. Загрузка копировальных мощностей 3.3.4. Сохранение квалифицированных кадров 	<p>4.4. РАЗВИТИЕ ВЗАИМОВЫГОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА С ЕС, РФ, США, БРАЗИЛИЕЙ И ДРУГИМИ СТРАНАМИ</p> <p>5.1. КОНТРОЛЬ ЗА ВЫПОЛНЕНИЕМ ДОГОВОРОВ И СОГЛАШЕНИЙ</p> <p>5.2. СВОЕВРЕМЕННОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ, ТЕХНОГЕННЫХ И СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ</p> <p>5.3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ СПЕЦИАЛЬНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ</p> <p>5.4. ПОЛУЧЕНИЕ ОПЕРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОРГАНАМИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ВЛАСТИ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ</p>

ется слабоструктурированной, поскольку ее характеристики носят и количественный, и качественный характер, а связи между подсистемами не всегда четко регламентированы. Спецификой моделирования и анализа слабоструктурированных систем является необходимость «субъективного факто-

ра» (эксперты, лица, принимающие решения) и использование экспертных методов.

Принципы моделирования. Основными принципами являются:

— целенаправленность (выбор перспективных направлений, определение и обоснование стратеги-

Обеспечение экономического могущества,

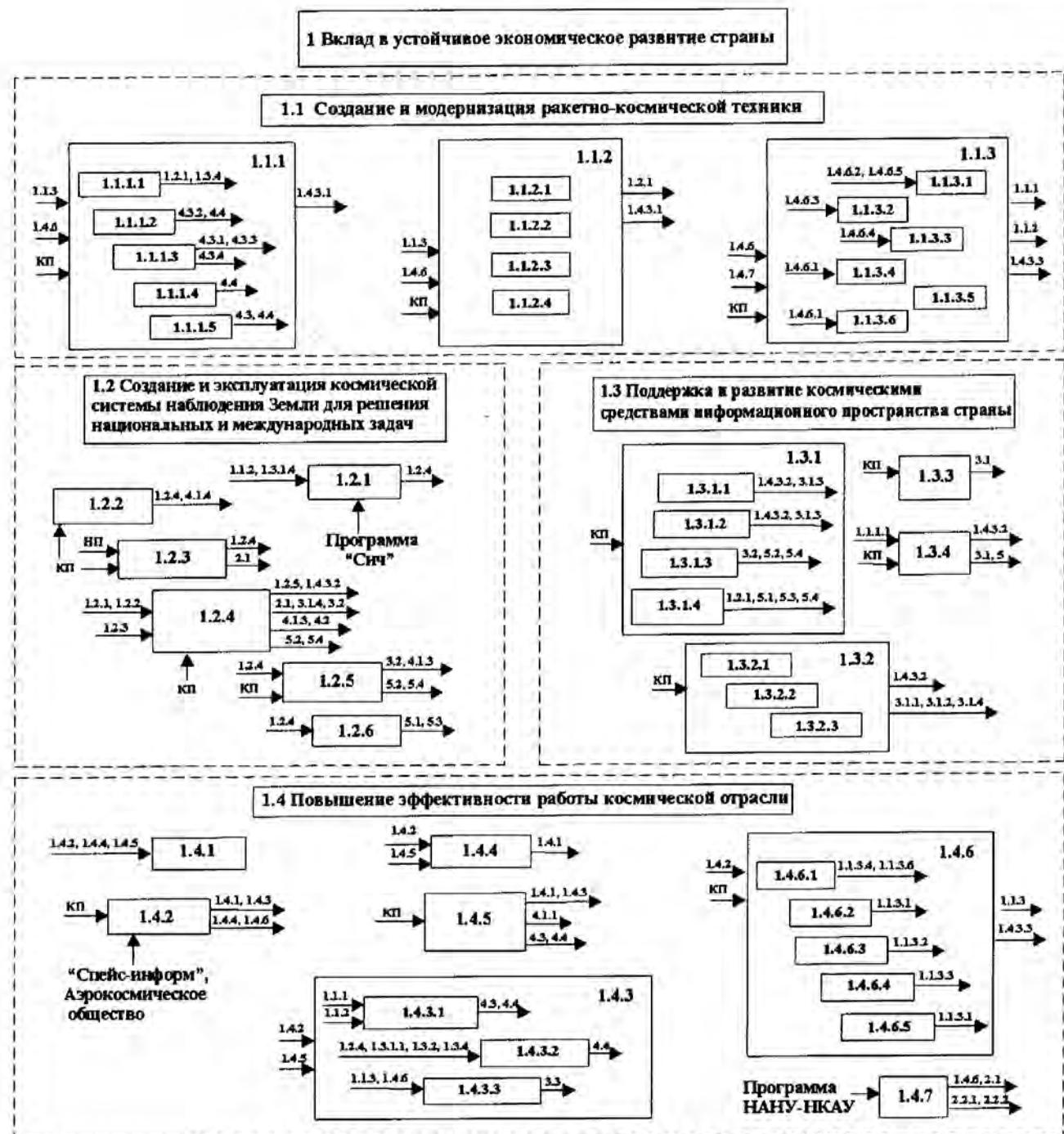
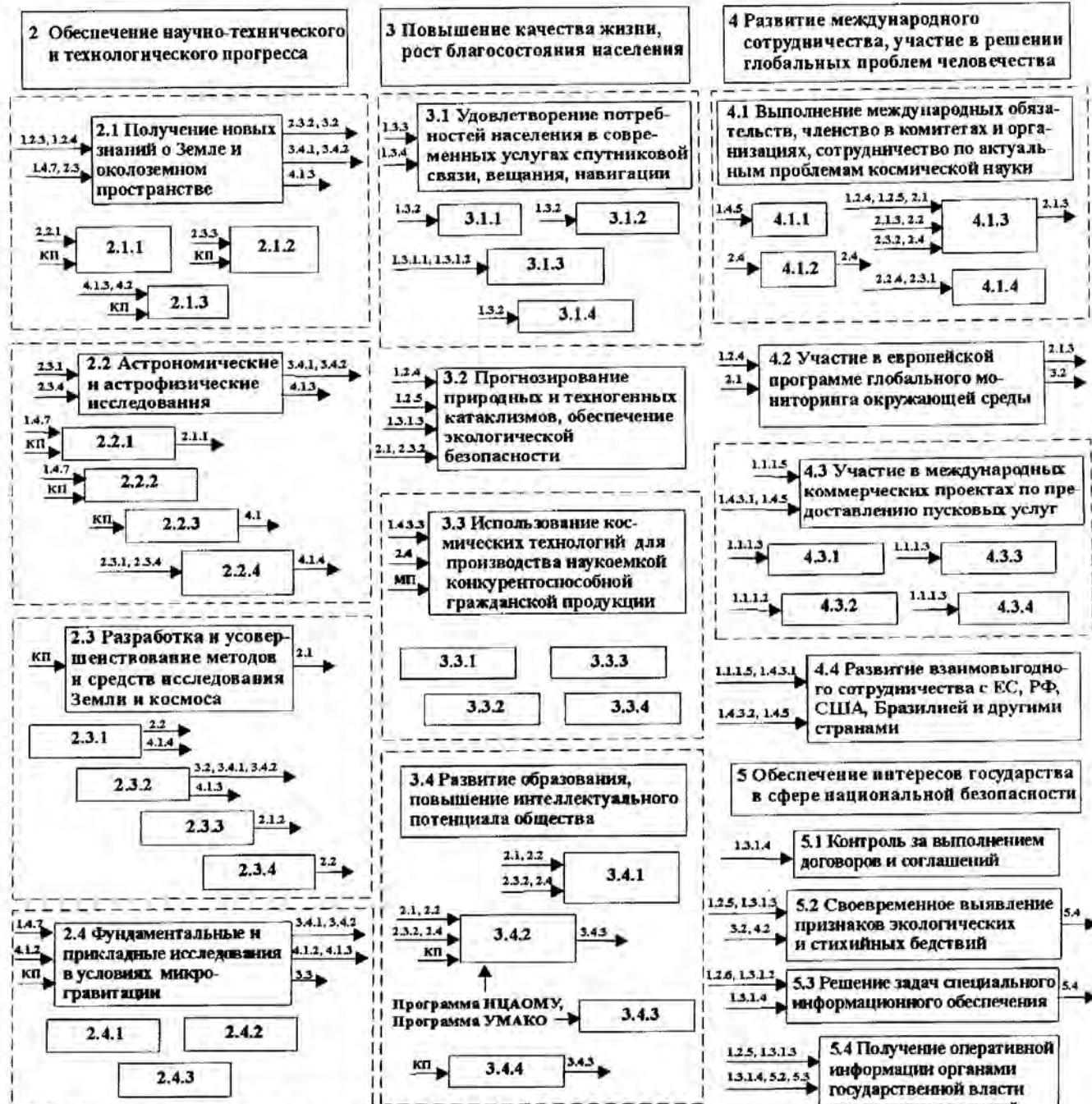


Рис. 3. Структурная целевая модель космической деятельности Украины

независимости и безопасности Украины



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ: - цели, подцели; - входные, выходные связи

- гических целей и приоритетов космической деятельности);
- комплексность (изучение проблемы в контексте всей совокупности текущих и прогнозных характеристик и факторов развития);
- системность (учет взаимосвязей и взаимозависимостей в структуре отрасли, включая обмен ресурсами и результатами с внешней средой);
- социальность (при формировании стратегических целей и механизма их реализации в основу должны быть положены интересы общества, повышение качества жизни населения);
- адаптивность (возможность учета изменений в действиях внутренних и внешних факторов);
- эффективность (возможность генерации и анализа сценариев — вариантов планов и выбора наилучшего решения).

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЦЕЛЕЙ

В состав целей верхнего ранга (рис. 2) входят генеральная цель и ряд стратегических целей общегосударственного уровня, которые раскрывают и конкретизируют ее смысл. Анализ законодательных и правительственные документов, регламентирующих космическую деятельность, общественных ценностных ориентиров, основных приоритетов государственной политики, места космической отрасли в социально-экономической сфере страны и в мире позволяет сформулировать генеральную цель космической деятельности в Украине следующим образом: обеспечение экономического могущества, независимости и безопасности страны.

Стратегические цели космической деятельности общегосударственного статуса определяются на основе анализа принципов реформирования национальной экономики, социального развития, повышения технологического уровня страны. Потенциал научноемкой и высокотехнологичной космической отрасли является одной из основ инновационного развития общества, выполнения программы информатизации Украины, решения задач обороны и всех видов безопасности в современных внутренних и внешних условиях, задач интеграции в мировое сообщество. С этих позиций к стратегическим целям космической деятельности общегосударственного уровня можно отнести:

- 1) вклад в устойчивое экономическое развитие страны;
- 2) обеспечение научно-технического и технологического прогресса;
- 3) повышение качества жизни, рост благосостояния населения;
- 4) развитие международного сотрудничества, участие в решении глобальных проблем человечества;
- 5) обеспечение интересов государства в сфере национальной безопасности.

Реализация стратегических целей космической деятельности общегосударственного уровня (рис. 2, блоки 1—5) должна быть обеспечена выбором соответствующих отраслевых стратегических целей. Анализ, проведенный с учетом специфики украинской космонавтики, ее научно-технического, технологического, производственного, инновационного и кадрового потенциала, имеющихся заделов и наработок, востребованности продукции космической отрасли на внешнем и внутреннем рынках позволил сформулировать главные цели отраслевого уровня (блоки 1.1—5.4 на рис. 2).

Структурная целевая модель космической деятельности в Украине имеет многоуровневый иерархический характер и блочную структуру. Адреса блоков целей и подцелей задаются цифровым кодированием. На рис. 2, где приведены верхние уровни иерархии целевой модели, стратегические цели общегосударственного статуса имеют кодировку, состоящую из одного индекса (1, 2, 3, 4, 5), код отраслевых стратегических целей включает два индекса (1.1, 1.2, ..., 5.3, 5.4).

Главные отраслевые цели опираются, в свою очередь, на цели нижеследующих уровней иерархии с кодами 1.1.1—1.1.3, 1.2.1—1.2.6 и т. д. Цели нижних уровней иерархии приведены в таблице. Они строятся методом системной декомпозиции путем определения соответствующих подцелей, разработки для обеспечения их реализации программ и проектов как элементов космической деятельности. Подчиненность целей задается цифровой кодировкой. Так, например, цель 1.1.1 имеет нижние уровни иерархии: 1.1.1.1—1.1.1.5.

Сведение представленной информации воедино дает возможность построить полную систему целей — структурную целевую модель космической деятельности в Украине (рис. 3). Установлены связи в структуре космической деятельности и, соответственно, между целями и подцелями модели. Они определяют цепочки прохождения действий между субъектами космической деятельности — ветвями и элементами модели. В силу этих связей изменения в одной из подсистем вызывают изменения в других подсистемах и, в конечном итоге, в отрасли в целом. Эти положения являются базой для генерации альтернативных плановых сценариев функционирования и развития отрасли и их анализа. Связи указаны на рис. 6 входными и выходными стрелками с заданными адресами направлений. Ряд целей нижнего уровня иерархии поддерживается проектами Общегосударственной (Национальной) космической программы Украины (обозначение КП), Межведомственной программы внедрения космических технологий для создания и изготовле-

ния высокотехнологичной гражданской продукции для нужд внутреннего рынка и на экспорт на 2001—2005 годы (МП), Программой Совета по космическим исследованиям НАНУ—НКАУ (НП), Программами Национального центра аэрокосмического образования молодежи Украины (НЦАОМУ), Украинского молодежного аэрокосмического объединения (УМАКО) и др. при иллюстративном представлении модели в целях повышения ее информативности блоки по отдельным направлениям космической деятельности тонировались различными цветами, выходные стрелки-связи окрашивались в цвет блока, куда они адресованы, входные — в цвет блока, откуда они направлены. Такой подход позволил наглядно представить предметную область, отразить всю многоплановость и многосвязность космической деятельности в Украине.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

Космическая деятельность как система описывается большим количеством показателей, параметров и факторов, которые характеризуют ее функционирование и развитие. Для обзорности задачи из выбранных переменных и параметров без существенной потери точности выделялись наиболее информативные. Спецификой моделирования социально-экономических систем является наличие, наряду с количественными, качественных характеристик целей и подцелей. Однако и этому классу характеристик следует по-возможности поставить в соответствие количественные выражения. Это позволяет перейти от верbalного описания подсистем к формализованному и использовать математический аппарат, объективно характеризовать величины и отношения между ними. Присвоение числовых значений имеет существенное значение, поскольку помогает объединять различные компоненты модели на основе введения метрики, базовых шкал, процедур нормировки и других процедур формально-нормативного характера, облегчает определение степени достижения цели, формулирование критерии выбора альтернатив. В целом параметризация модели обеспечивает конкретизацию целевых позиций, способствует уменьшению степени неопределенности в системе. Трудности, которые в некоторых случаях могут возникать при определении качественных характеристик целей, заданных в вербальном описании, можно обходить, используя экспертные методы.

Была проведена верификация построенной целевой модели. В соответствии с ее структурой для каждой цели и подцели были выявлены и обоснованы описывающие их показатели и параметры, а также факторы влияния (экономические, политические, научно-технические, правовые, международные). Наряду с системой показателей, которые имеют общий характер для всех целей, введены параметры, отвечающие специфике задач и ожидаемых результатов по направлениям космической деятельности.

Сформированная система показателей и факторов влияния может быть использована для текущей оценки состояния космической деятельности, изучение динамики изменения показателей является основой для формирования прогнозных оценок.

Построенная модель была апробирована в задаче разработки и анализа альтернативных сценариев развития отрасли, а также использовалась для оценки социально-экономической эффективности различных направлений космической деятельности по итогам выполнения О(Н)КПУ на 1998—2002 гг.

В целом верифицированная целевая модель является предметной областью и базой исходных данных для анализа перспектив космической деятельности, обоснования планирования, выбора приоритетных целей и концентрации ресурсов на их достижений.

1. Балоян Г. Г. Информационное моделирование научно-технических программ. — М: Наука, 1990.—248 с.
2. Воронин А. И., Зиатдинов Ю. К., Харченко А. В. Сложные технические и эргатические системы: методы исследования. — Харьков: Факт, 1997.—240 с.
3. Закон України «Загальнодержавна (Національна) космічна програма України на 2003—2007 рр.» № 203-IV-BР від 24.10.2002.
4. Тощенко В. Г. Методы и системы поддержки принятия решений. — К.: Наук. думка, 2002.—382 с.

THE STRUCTURAL PURPOSE MODEL OF SPACE ACTIVITY IN UKRAINE

*V. F. Cubarev, L. I. Samoilenco, T. V. Pyenko,
L. V. Pidgorodetska, L. N. Kolos, M. A. Kirnosova*

The development of structural purpose model of space activity as information analytical toolkit for the substantiation of strategic planning is carried out. The multilevel hierarchical system of the purposes of space activity is formed in view of priorities of state policy. The branch purposes and purposes of the lower levels of hierarchy are under construction by a method of system decomposition.

В. Н. Криводубський

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Роль механізмов магнітної накачки в формуванні «королівської зони» сонечних пятен

Надійшла до редакції 21.02.05

Для компенсації втрат магнітного потоку в ділянці генерації в сонячній конвективній зоні (СКЗ), зумовлених магнітною плавучістю, залиchenо два механізми «магнітної антиплавучості»: турбулентний діамагнетизм (ζ -ефект) і магнітну накачку, викликану радіальною неоднорідністю густини плазми (V_p -ефект). Враховано обертання Сонця, яке наділє V_p -ефект новими пластичностями. Показано, що на високих широтах 1 біля полюсів магнітні поля заблоковані ефектами антиплавучості поблизу дна СКЗ. Водночас на середніх і низьких широтах ротаційний V_p -ефект у глибоких шарах викликає спрямовану долори магнітну накачку, яка разом з плавучістю сприяє винесенню потужних полів (300—400 мТл) до поверхні, де вони з'являються у «королівській зоні» як сонячні плями.

Вступлення

Как известно, солнечные пятна — наиболее заметное и доступное для наблюдений проявление солнечной активности — возникают не по всему диску Солнца, а только в «королевских зонах», расположенных на расстоянии $40\text{--}45^\circ$ по обе стороны от экватора. В начале каждого нового цикла пятна появляются преимущественно на средних, а позже — на все более низких широтах, приближаясь к экватору. Широтный дрейф групп пятен к экватору (закон Шперера) хорошо заметен на построенной Маундером временной диаграмме распределения пятен по широте («диаграмма бабочек», рис. 1). После установления магнитной природы солнечных пятен стало ясно, что «диаграмма бабочек» отображает места концентрации глубинного магнитного поля в подфотосферных слоях и определяет скорость его миграции к экватору [11, 15].

Согласно современным представлениям [3, 15] аксиально-симметричное глобальное магнитное поле Солнца В состоит из двух компонентов: сильного глубинного торoidalного (азимутального) поля B_T (300—400 мТл), и слабого полоидального (меридионального) поля B_p (0.1—0.2 мТл), силовые линии которого, выходя на солнечную поверхность, очевидно, формируют фоновые магнитные поля. Поскольку торoidalное поле спрятано глубоко под солнечной поверхностью, то при наблюдениях мы видим только обусловленные магнитной плаву-

честью случайные локальные выпуклости торoidalных магнитных силовых трубок (МСТ), проявляющиеся на поверхности в виде биполярных групп солнечных пятен.

Модель турбулентного $\alpha\Omega$ -динамо, локализованного в солнечной конвективной зоне (СКЗ), позволяет объяснить происхождение глобального магнитного поля и понять основные наблюдаемые закономерности солнечной цикличности [3, 11, 15]. Дифференциальное вращение, действуя на исходное полоидальное поле B_p , возбуждает торoidalную составляющую B_T (Ω -эффект), тогда как спиральная конвекция регенерирует из этого поля новую полоидальную составляющую B_p (α -эффект), замыкая тем самым солнечный цикл. Приняв во

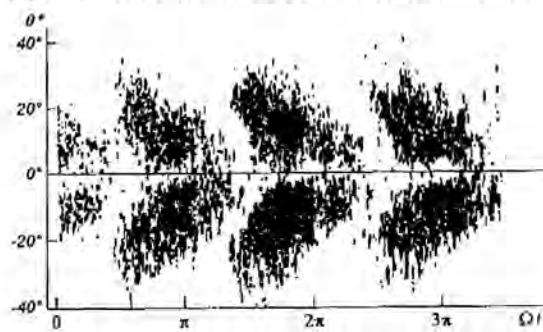


Рис. 1. «Диаграмма бабочек» Маундера, согласно наблюдениям с 1874 по 1913 гг., показывающая область существования солнечных пятен в зависимости от гелиографической широты θ^* и фазы солнечного цикла Ωt .

внимание Ω -эффект и физические свойства подфотосферных слоев, не составляет труда начертить схему процессов, приводящих к выходу глубинных магнитных структур на поверхность в виде пятен. Силовые линии меридионального поля B_p , в условиях их вморооженности в плазму, под влиянием радиального градиента угловой скорости $\partial\Omega/\partial r$ в глубоких слоях вблизи лучистого тахоклина — переходного слоя, в котором происходит резкое изменение от широтного дифференциального вращения СКЗ к почти жесткому вращению лучистой зоны, — превращаются в торoidalное поле B_t . После достижения достаточной интенсивности поля торoidalные МСТ образуют выгнутые вверх магнитные арки, которые, всплывая на поверхность на средних и низких широтах, формируют биполярные группы пятен [34]. Однако при расчетах перестройки поля согласно описанной схеме остается несколько серьезных затруднений, сущность которых состоит в отсутствии до недавнего времени надежных данных о радиальном градиенте угловой скорости и в незнании глубины, с которой поле всплывает на поверхность, чтобы сформировать наблюдаемые магнитные структуры. Некоторые исследователи полагают, что биполярные области на поверхности отображают состояние торoidalного поля в неглубоких слоях [32]. Однако в верхней части СКЗ сильные поля вследствие большой скорости магнитного всплытия очень быстро выносятся на поверхность. Только в глубинах, где высокая плотность плазмы, можно рассчитывать на благоприятные условия для удержания полей в течение длительного времени [15]. А какую же тогда роль играет верхняя часть СКЗ? Какие слои ответственны за наблюданную пространственно-временную картину локализации пятен в течение солнечного цикла («диаграмма бабочек» Маундера)? Почему не возникают пятна в высокширотных и полярных областях? До сих пор ответы на эти вопросы не получили достаточного теоретического обоснования. Ниже будет сделана попытка устранить некоторые из отмеченных трудностей на основе модели турбулентного динамо с привлечением новейших гелиосеймологических измерений внутреннего вращения Солнца [18, 28] и турбулентных механизмов перестройки крупномасштабных магнитных полей.

Возбуждение и всплытие торoidalного поля. Решение системы уравнений циклического $\alpha\Omega$ -процесса можно представить в виде мигрирующих в меридиональном направлении динамо-волн [15]. Для эффективного « Ω -накручивания» торoidalных МСТ необходимо, чтобы они долго оставались в зоне генерации. Однако вследствие магнитного всплытия трудно удерживать сильные поля в глубоких слоях на протяжении времени, сравни-

тельного с продолжительностью солнечного цикла. Эффект магнитного всплытия со скоростью V_b можно представить в уравнении индукции членом $\text{rot}(V_b \times B_t)$ со знаком минус, который описывает потери магнитного потока в области генерации. Это приводит к ограничению величины возбуждаемого магнитного поля. Поэтому возникает необходимость поиска механизмов «магнитной антиплавучести» (направленной вниз магнитной накачки), способных компенсировать потери магнитного потока в зоне генерации [36]. На сегодня наилучше изучены два эффекта, которые могут выполнять такую роль: макроскопический турбулентный диамагнетизм (γ -эффект) [7] и магнитный поток в неоднородной по плотности плазме, обусловленный мелкомасштабными магнитными пульсациями [2, 28].

Согласно выводам работы [15] предельная скорость всплытия V_b тонкой горизонтальной МСТ с величиной индукции B в спокойной атмосфере сравнима с альвеновской скоростью $V_b \approx c_a = B/(4\pi\rho)^{1/2}$ (ρ — плотность плазмы). Эффективность плавучести оказывается наибольшей вблизи солнечной поверхности, где мала плотность плазмы, и значительно меньшей в плотных глубоких слоях. Поэтому, как упоминалось, наиболее благоприятным местом для возбуждения глобального магнетизма служат самые глубокие слои СКЗ. Тем не менее, даже здесь трудно противодействовать магнитной плавучести МСТ с сильными полями ($B > 10$ мТл) в течение длительного времени [15].

Ограничения на величину возбуждаемого поля удалось в значительной мере снять после расчета Л. Кичатиновым и В. Пипиным [10] эффекта магнитной плавучести в турбулентной плазме в рамках МГД усредненного (крупномасштабного) поля. Было установлено, что всплытие слаженного поля характеризуется примерно на порядок меньшими скоростями, чем скорости, полученные Е. Паркером для дискретных МСТ. В случае слабых полей ($\beta^2 \ll 1$), типичных для глубоких слоев СКЗ, эффективная скорость всплытия определяется выражением

$$V_b^*(\beta) = \frac{l}{H_p} \frac{\nu}{\gamma} \frac{\beta^2}{15}, \quad (1)$$

где $\beta = c_a/v = B/B_{eq}$ — параметр нормализованного магнитного поля, $B_{eq} = 4\pi\rho)^{1/2}\nu$ — равнораспределенная магнитная индукция, v и l — средняя квадратичная скорость и характерный размер турбулентных пульсаций, H_p — локальная шкала высот по давлению, $\gamma = 5/3$ — показатель адиабаты. Минимальное время всплытия глубинного поля (≈ 300 мТл) со дна СКЗ на поверхность составляет около шести лет, что близко к средней продолжительности циклов солнечных пятен. Однако локализация пятен в «королевской зоне» оста-

ется до сих пор не объясненной. Приняв во внимание упомянутые выше эффекты магнитной накачки, ниже мы начертим схему радиального переноса торoidalного поля, которая, на наш взгляд, может помочь понять, почему магнитные поля проникают к поверхности только в «королевской зоне».

Турбулентные механизмы переноса крупномасштабного магнитного поля. Физический смысл турбулентного диамагнетизма состоит в вытеснении крупномасштабного магнитного поля из областей с повышенной интенсивностью турбулентных пульсаций в места с их меньшей интенсивностью вдоль градиента турбулентной вязкости $\nu_t = (1/3)\nu l$ [3, 7]. В кинематическом приближении величина эффективной скорости этого вытеснения составляет

$$V_\mu = -\nabla\nu_t / 2. \quad (2)$$

Обратное влияние глобального поля B приводит к ослаблению γ -эффекта. В нелинейном режиме скорость диамагнитного переноса описывается выражением

$$V_D(\beta) = 6V_\mu\Psi_D(\beta), \quad (3)$$

где $\Psi_D(\beta)$ — введенная Кичатиновым и Рюдигером [30] функция насыщения, нормализованная на $\Psi_0 = 1/6$ при $\beta = 1$. В случае слабых полей ($\beta < 1$) она имеет довольно простой вид:

$$\Psi_D(\beta) \approx \Psi_0 - \beta^2/5 = 1/6 - \beta^2/5.$$

Что же дают физические условия в турбулизованных конвективных слоях Солнца? Оказывается, что турбулентная вязкость $\nu_t(z)$ представляет собой гладкую выпуклую функцию, максимум которой ($\nu_t = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^2/\text{с}$) локализован на глубине $z \approx 130000 \text{ км}$ [12, 31]. Здесь и далее при расчетах использована модель СКЗ Стикса [37]. Радиальная неоднородность ν_t приводит к вертикальному переносу горизонтального поля. В нижней части СКЗ турбулентный диамагнетизм действует против плавучести, вытесняя поле вниз, тогда как в верхней части, наоборот, он помогает плавучести, выталкивая поле вверх. Кинематическая скорость опускания поля в глубинных слоях составляет $V_\mu \approx 40 \text{ м/с}$ [12]. Хотя в нелинейном режиме магнитное поле заметно подавляет диамагнетизм, тем не менее, и в этом случае скорость вытеснения вниз ($V_D \approx 3 \text{ м/с}$) достаточна для того, чтобы скомпенсировать всплытие сильных полей вблизи дна СКЗ [31].

В неоднородной по плотности турбулентной плазме возникает еще один интенсивный магнитный поток, обусловленный мелкомасштабными магнитными полями [2, 21]. Суть явления состоит в следующем. Амплитуда магнитных пульсаций b , возбуждаемых при наличии глобального поля B турбулентными пульсациями со скоростью v , увеличивается в направлении роста плотности плазмы: $b^2 = 4\pi\rho v^2$. Одновременно увеличиваются в этом

направлении и хаотические электрические токи: $j = (c/(4\pi))rot b$. Эти модифицированные токи изменяют начальное распределение поля B . В нелинейном режиме трансформированное пространственное распределение глобального поля эквивалентно его переносу (накачке) [8] в направлении увеличения плотности плазмы с эффективной скоростью

$$V_p = (1/6)\nabla\rho b^2/(4\pi\rho^2) \approx (1/6)\tau v^2 \nabla\rho/\rho. \quad (4)$$

Мы назвали этот перенос $\nabla\rho$ -эффектом. На вертикальном протяжении СКЗ плотность плазмы изменяется на 5-6 порядков величины (см. модель [37]), поэтому здесь турбулентные магнитные пульсации вызывают направленную вниз ощущенную магнитную накачку горизонтального поля, скорость которой изменяется от 100 м/с вблизи поверхности до 1 м/с возле дна зоны [13].

Влияние вращения. Л. Кичатинов [29] показал, что в условиях, когда турбулентная плазма вращается, $\nabla\rho$ -эффект подвергается сильной модификации (ротационный $\nabla\rho$ -эффект). Степень возмущения конвекции вращением описывается числом Кориолиса $\omega = 2\pi\Omega$ (Ω — угловая скорость). Как известно, влияние вращения приводит к относительному увеличению масштабов турбулентных пульсаций вдоль оси вращения [26]. Порождая анизотропию турбулизованной конвекции, вращение Солнца наделяет турбулентную магнитную накачку новыми свойствами. Поскольку конвективные ячейки вытягиваются вдоль оси вращения, то трансформация эффекта, очевидно, должна зависеть от углового расстояния от полюсов. Если возле полюсов градиент плотности $\nabla\rho$ параллелен оси вращения, то по мере приближения к средним и низким широтам вектор $\nabla\rho$ постепенно изменяет свое направление, так что на экваторе он становится уже перпендикулярным к оси вращения. При этом наибольшая модификация эффекта наступает при умеренном вращении ($\omega \approx 1-10$). Это связано с тем, что в случае медленного вращения индуцированная им анизотропия, необходимая для трансформации переноса, будет мала. При очень же быстром вращении анизотропия велика, но вращение подавляет конвекцию, а вместе с ней и эффект магнитной накачки. При учете вращения появляются дополнительные составляющие накачки, направленные по нормали к оси вращения. В сферической системе координат удобно выделить отдельно радиальную и меридиональную составляющие магнитного переноса вдоль единичных векторов i и i_θ . Ротационный $\nabla\rho$ -эффект на Солнце осуществляется «селекцией полей», в результате которой торoidalное и полоидальное поля переносятся в радиальном и меридиональном направлениях независимо, с различными по величине и знаку скоростями [9, 29].

Поскольку нас интересует поверхностная локализация биполярных магнитных структур, то необходимо рассмотреть радиальный магнитный поток тороидального поля, при участии которого формируются пятна. Оказалось, что величина скорости этой накачки зависит от полярного угла (кошироты) θ и глубины z в СКЗ [9, 14, 29]:

$$V_{pr}^T(z, \theta) = 6V_p(z) [\varphi_2[\omega(z)] - \varphi_1[\omega(z)] \sin^2\theta]. \quad (5)$$

Две функции числа Кориолиса,

$$\varphi_1(\omega) = \frac{1}{4\omega^2} \left[\frac{\omega^2 + 3}{\omega} \operatorname{arctg} \omega - 3 \right] \quad (6)$$

и

$$\varphi_2(\omega) = \frac{1}{8\omega^2} \left[1 + \frac{\omega^2 - 1}{\omega} \operatorname{arctg} \omega \right],$$

описывают влияние вращения на турбулентную конвекцию. Именно они ответственны за трансформацию радиального $\nabla\rho$ -переноса в различных участках турбулизованной конвективной зоны вращающегося Солнца. Направление магнитной накачки (вверх или вниз) восприимчиво к знаку множителя $\{\varphi_2[\omega(z)] - \varphi_1[\omega(z)] \sin^2\theta\}$, который зависит от кошироты и поведения функций числа Кориолиса в СКЗ.

Данные последних гелиосеймологических экспериментов (как наземных и так космических) свидетельствуют [18, 28], что поле угловой скорости $\Omega(r, \theta)$ в СКЗ естественно разделено на домены быстрого и медленного вращения с противоположными знаками радиального градиента угловой скорости. В окрестности экваториального домена (ОЭД) угловая скорость в основном уменьшается с глубиной z ($\partial\Omega/\partial r > 0$), тогда как в высокошироких доменах (ВШД) она, наоборот, увеличивается вглубь Солнца ($\partial\Omega/\partial r < 0$). Изменение характера дифференциального вращения происходит в относительно узком широтном секторе $\theta^* = 40-50^\circ$ с постоянной угловой скоростью вдоль радиуса, который разделяет СКЗ в каждом полушарии на два изолированных домена быстрого и медленного вращения и через тахоклин смыкается с лучистой зоной ($\theta^* = 90^\circ - \theta$ обозначает гелиошироту, пользоваться которой предпочитают наблюдатели).

Посмотрим, как же влияет внутреннее вращение Солнца на $\nabla\rho$ -накачку. В верхних слоях вращение вызывает слабую анизотропию турбулентной конвекции (число Кориолиса $\omega \approx 0.1$), которая, однако, существенно усиливается при смещении в глубокие слои (возле дна СКЗ ω достигает значения 100). Рассчитанный согласно (6) профиль $\varphi_1[\omega(z)]$ имеет вид выпуклой функции с краевыми значениями $\varphi_1 \approx 0.0005$ (поверхность), $\varphi_1 \approx 0.003$

(нижнее основание СКЗ) и максимумом $\varphi_{1\max} \approx 0.057$ ($z \approx 50000$ км). В то же время значения функции $\varphi_2[\omega(z)]$ плавно уменьшаются от 0.17 вблизи поверхности до 0.0015 в глубоких слоях. Поэтому в зависимости от исследуемого участка знак множителя $\{\varphi_2[\omega(z)] - \varphi_1[\omega(z)] \sin^2\theta\}$ может быть как положительным, так и отрицательным. В тех местах, где этот знак положительный, магнитный поток V_{pr}^T будет направлен вниз, там же, где знак отрицательный, — вверх. Нами найдено, что около полюсов, где векторы $\nabla\rho$ и Ω параллельны ($\theta = 0$), магнитная накачка, как и в отсутствие вращения, на всем протяжении зоны конвекции действует вниз. Изменение направления переноса начинается в глубоких слоях на угловом расстоянии от полюсов около 45° . При смещении в низкие широты область направленной вверх накачки постепенно расширяется, достигая максимального объема на экваторе, где векторы $\nabla\rho$ и Ω становятся перпендикулярными друг к другу.

Таким образом, именно в изолированных доменах быстрого и медленного вращения с противоположными знаками $\partial\Omega/\partial r$ (о существовании которых впервые стало известно из гелиосеймологических измерений) характер $\nabla\rho$ -накачки оказывается различным. У ВШД ($\theta^* > 45^\circ$), в котором угол между векторами $\nabla\rho$ и Ω еще не значительный, магнитная накачка действует вниз, поскольку здесь выполняется условие $\{\varphi_2[\omega(z)] - \varphi_1[\omega(z)] \sin^2\theta\} > 0$ (рис. 2). Одновременно в ОЭД ($\theta^* < 45^\circ$) направление радиальной $\nabla\rho$ -накачки может быть различным, так как здесь знак множителя $\{\varphi_2[\omega(z)] - \varphi_1[\omega(z)] \sin^2\theta\}$ зависит от глубины. В поверхностных слоях в условиях медленного вращения ($\omega \approx 0.1-0.5$) анизотропия конвекции слаба и поэтому взаимная ориентация векторов $\nabla\rho$ и Ω еще не играет роли. В этом случае $\nabla\rho$ -эффект противодействует магнитной плавучести ($V_{pr}^T \approx 100$ м/с). Однако вблизи дна СКЗ, где физические условия соответствуют приближению умеренного вращения ($\omega \approx 5-20$), начинает сказываться ориентация векторов $\nabla\rho$ и Ω . Магнитная $\nabla\rho$ -накачка становится направленной вверх ($V_{pr}^T \approx 1$ м/с), помогая тем самым плавучести переносить тороидальное поле к поверхности. Из рис. 2 видно, что область направленной вверх $\nabla\rho$ -накачки локализована в диапазоне гелиоширот, который совпадает с «королевской зоной». Кривая нулевой скорости $V_{pr}^T(z, \theta) = 0$, где изменяется направление вертикального магнитного $\nabla\rho$ -потока, вблизи дна СКЗ начинается на широте $\theta^* = 45^\circ$. Затем она плавно приближается к поверхности при смещении от средних к низким широтам (достигая экватора на глубине $z \approx 70000$ км).

Перестройка тороидального поля в СКЗ. Рас-

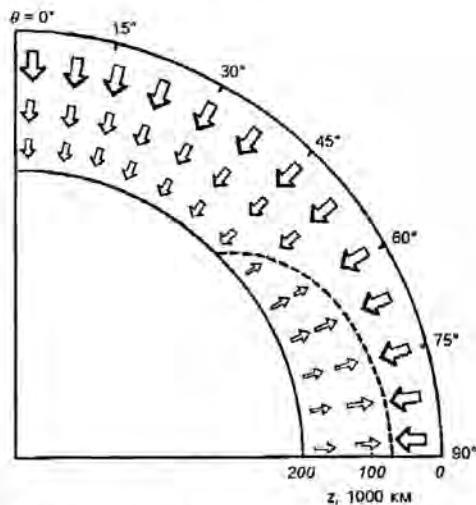


Рис. 2. Меридиональный разрез СКЗ, демонстрирующий распределение радиальной скорости магнитной накачки тороидального поля $V_p^r(z, \theta)$ по глубине z и ко широте θ . Стрелки показывают направление накачки, скорость которой изменяется от 1 м/с вблизи дна СКЗ до 100 м/с в поверхностных слоях. Штриховая кривая соответствует линии нулевой скорости $V_p^r(z, \theta) = 0$, где происходит изменение направления магнитной накачки.

смотрим баланс процессов макроскопического радиального переноса горизонтального поля отдельно для ВШД и ОЭД. Относительно простая схема переноса устанавливается у ВШД, где на всем вертикальном протяжении СКЗ выполняется условие $\{\varphi_2[\omega(z)] - \varphi_1[\omega(z)] \sin^2\theta\} > 0$. Уравнение баланса между плавучестью и направленными вниз двумя магнитными потоками вблизи дна СКЗ

$$\uparrow V_B(\beta_s^p) + \downarrow V_D(\beta_s^p) + \downarrow V_{pr}^T = 0 \quad (7)$$

дает возможность определить величину установившегося околополярного (p) магнитного поля $B_s^p = \beta_s^p B_{eq}$, всплытие которого компенсируется двумя эффектами негативной плавучести. Вертикальные стрелки \uparrow и \downarrow обозначают направления магнитных потоков (вверх или вниз). Используя выражения для скоростей всплытия (1), диамагнитного вытеснения (3) и ∇p -накачки (5), легко рассчитать параметр нормализованного установившегося околополярного поля:

$$\beta_s^p = \left| \frac{5[V_\mu + 6(\varphi_2 - \varphi_1 \sin^2\theta)V_p]}{6V_\mu - [lv/(3\gamma H_p)]} \right|^{1/2}. \quad (8)$$

Здесь скорости V_μ и V_p имеют отрицательные знаки. Вычисления показали, что два направленных вниз магнитных потока $V_p \approx 3$ м/с и $V_{pr}^T \approx 1$ м/с в состоянии заблокировать интенсивные магнитные поля в глубинах СКЗ: $\beta_s^p \approx 0.7..0.8$; $B_s^p = \beta_s^p B_{eq} \approx 300..400$ мТл ($B_{eq} = 400..600$ мТл). В результате

вблизи дна зоны конвекции должен формироваться магнитный слой сильного тороидального поля.

Таким образом, явления отрицательной магнитной плавучести, по всей видимости, служат наиболее вероятной причиной того, почему глубоко укоренившиеся сильные околополярные тороидальные поля не могут прорваться к поверхности, чтобы наблюдалась на высоких широтах в виде солнечных пятен.

Совершенно иную картину перестройки тороидального поля получаем в ОЭД. В глубоких слоях ∇p -перенос, как и магнитная плавучесть, направлен вверх. Поэтому здесь условие баланса потоков приобретает следующий вид:

$$\uparrow V_B(\beta_s^{ed}) + \downarrow V_D(\beta_s^{ed}) + \uparrow V_{pr}^T = 0. \quad (9)$$

Выражение для нормализованного установившегося приэкваториального глубинного (индекс ed) поля β_s^{ed} почти совпадает с выражением (8), за исключением отрицательного знака множителя $\varphi_2 - \varphi_1 \sin^2\theta$. В этом случае в нижней части СКЗ, где величина установившегося поля составляет $B_s^{ed} = \beta_s^{ed} B_{eq} \approx 290..380$ мТл, два направленных вверх магнитных потока (плавучесть $V_B(\beta_s^{ed}) \approx 3$ м/с и ∇p -накачка $V_{pr}^T \approx 1$ м/с) вместе способны нейтрализовать направленное вниз диамагнитное вытеснение ($V_D(\beta_s^{ed}) \approx 3$ м/с). В результате тороидальные поля, немного превосходящие величину установившегося поля B_s^{ed} , должны распространяться вверх.

В верхней половине СКЗ γ - и ∇p -эффекты изменяют свои знаки на противоположные. Теперь уже ∇p -эффекту приходится самостоятельно противостоять плавучести и турбулентному диамагнетизму. Поэтому новое условие баланса потоков

$$\uparrow V_B(\beta_s^{eu}) + \uparrow V_D(\beta_s^{eu}) + \downarrow V_{pr}^T = 0 \quad (10)$$

может обеспечить удержание только относительно умеренных по интенсивности полей. Параметр нормализованного установившегося приэкваториального поверхностного поля β_s^{eu} снова можно описать выражением (8), только теперь скорость V_μ изменяет свой знак с отрицательного на положительный. Следует помнить, что вблизи поверхности резко возрастает эффективность магнитной плавучести. Поэтому физические условия в этой области позволяют ∇p -эффекту компенсировать вынос к поверхности только слабых полей. Например, на глубинах 40–50 тыс. км, где $\uparrow V_\mu \approx 3$ м/с и $\downarrow V_{pr}^T \approx 4$ м/с ($\theta = 70^\circ$), рассчитанное значение $\beta_s^{eu} \approx 0.5$ соответствует интенсивностям установившегося поля $B_s^{eu} = \beta_s^{eu} B_{eq} \approx 150..200$ мТл ($B_{eq} = 300..400$ мТл). Поэтому верхняя часть неоднородной по плотности СКЗ играет роль своеобразного «фильтра», который блокирует вынос относительно слабых полей, но не в состоянии препятствовать подъему сильных полей ($B > 200$ мТл), которые, прорываясь в некоторых

местах к поверхности, появляются в «королевской зоне» как пятна. Причем вынос полей на поверхность зависит от фазы цикла, поскольку в модели динамо-цикла относительный изгиб магнитных силовых линий торOIDального поля под влиянием радиального градиента угловой скорости в начале цикла сильнее на средних широтах, чем на низких и вблизи экватора. Поэтому следует ожидать, что возбуждаемые торOIDальные поля становятся неустойчивыми относительно всплыивания сначала на умеренных широтах, и поэтому солнечные пятна возникают вначале именно там. Разрыв силовых трубок вследствие их всплыивания и образования пятен останавливает усиление поля B_T на соответствующей широте. Однако усиление продолжается на более низких широтах, в результате чего пояс солнечных пятен мигрирует к экватору. Таким образом, с развитием цикла критический уровень поля достигается в некотором поясе, центральная широта которого изменяется в соответствии с экспериментальным законом Шперера для солнечных пятен. Как упоминалось, этот процесс в модели $\alpha\Omega$ -динами описывается как смещение динамо-волн вдоль меридианов к экватору.

Повторные максимумы циклов солнечных пятен. Как известно, наблюдаемые на поверхности доплеровские смещения в спектральных линиях указывают на слабую крупномасштабную меридиональную циркуляцию солнечного вещества [27]. Во внешних слоях (до 15 % радиуса Солнца) это меридиональное течение направлено от экватора к полюсам [20, 25]. На средних широтах амплитуда скорости течения составляет примерно 5–10 м/с. Исходя из закона сохранения вещества, исследователи приходят к выводу, что возле нижнего основания СКЗ должно установиться меридиональное течение противоположного направления от полюсов к экватору. При этом условии вблизи полюсов вещество должно опускаться вниз, тогда как возле экватора оно поднимается из глубин к поверхности, чтобы в такой способ замкнуть меридиональную циркуляцию солнечного вещества в СКЗ.

Недавно Нанди и Чудури [33] в рамках динамо-модели с меридиональной циркуляцией предложили новый сценарий формирования активных областей на солнечной поверхности. Суть нововведения состоит в том, что направленное к экватору глубинное меридиональное течение проникает в лучистую зону ниже СКЗ немного глубже, чем это считалось раньше. Возле полюсов направленный вниз поток не позволяет торOIDальному полю подняться к поверхности. Сосредоточенная в стабильной лучистой зоне меридиональная циркуляция переносит это поле в направлении низких широт, где оно постепенно проникает в СКЗ. В результате торOIDальное поле начинает испытывать на себе

влияние магнитной плавучести только на низких широтах. Поэтому вблизи экватора плавучесть и циркуляция, которая здесь уже направлена вверх, содействуют подъему торOIDального поля к поверхности, где оно порождает пятна.

На наш взгляд, ключевую роль в возникновении пятен в «королевской зоне» играет именно ротационная ∇p -накачка. Во-первых, как нами показано, направленная вниз магнитная накачка блокирует торOIDальное поле возле дна СКЗ на всех широтах выше 45°, тогда как в механизме Нанди и Чудури меридиональная циркуляция может удерживать поле в глубинах только в относительно узком широтном интервале вблизи полюсов. Во-вторых, основной аргумент в пользу ∇p -накачки состоит в том, что область направленной вверх магнитной накачки охватывает довольно протяженный диапазон средних и низких широт, который совпадает с широтным поясом пятен. Меридиональное же течение становится направленным вверх только в узком приэкваториальном поясе, где пятна наблюдаются очень редко.

Тем не менее, направленное к экватору глубинное течение, безусловно, участвует в формировании активности солнечных пятен в течение циклов. Очевидно, именно меридиональная циркуляция несет ответственность за двойные циклы пятен, которые описываются «двугорбыми» кривыми зависимости годичных чисел Вольфа от времени. Как известно из наблюдений, среднегодичные относительные числа солнечных пятен достигают своего максимального значения спустя несколько лет после начала цикла (основной максимум). В то же время иногда можно наблюдать повторные максимумы относительных чисел пятен (сдвинутые во времени на один-два года после основных максимумов). Мы предлагаем следующую схему объяснения этого феномена. Благодаря направленному к экватору течению глубоко укорененное сильное торOIDальное поле переносится из области высоких широт к средним, а затем и низким широтам, где направленная вверх ∇p -накачка совместно с магнитной плавучестью вынуждает эти немного «запоздалые» мигрирующие поля подниматься к поверхности. В результате интенсивность пятнообразования, которая уже пошла на спад (поскольку она была обусловлена фрагментами торOIDального поля приэкваториального домена, которые поднялись на поверхность раньше), снова возрастает, потому что теперь наступила очередь подъема «запоздавшего» поля. Таким образом, открывается путь к объяснению повторных максимумов циклов солнечных пятен.

Асимметрия активности солнечных пятен в соседних циклах. Представляет также интерес вопрос о наблюдаемом чередовании максимумов ак-

тивности пятен в соседних циклах. Как известно, 11-летние циклы активности пятен группируются в пары (22-летние циклы), состоящие из менее и более высокого циклов (правило Гневышева — Оля [4] чередования максимумов кривых годичных чисел Вольфа в четных и нечетных циклах). Общепринято, что это явление имеет магнитную природу. Объяснение подобного двойного цикла уже предлагалось раньше [1, 16, 19] за счет включения в модели динамо-цикла слабого глубинного первичного полоидального поля, которое проникает в СКЗ снизу из лучистого ядра и, таким образом, приводит к амплитудной асимметрии двух полупериодов смоделированного 22-летнего магнитного цикла. Однако, на наш взгляд, на динамо-процесс в СКЗ в большей мере может оказывать влияние более мощное глубинное тороидальное поле. Уверенность в существовании этого поля появилась после того, как гелиосейсмические измерения обнаружили в недрах Солнца заметный радиальный градиент угловой скорости ($\partial\Omega/\partial r = 5 \cdot 10^{16}$ рад·с⁻¹см⁻¹ вблизи ядра [22]). Согласно нашим расчетам [6] радиальное дифференциальное вращение в лучистой зоне, действуя на остаточное радиальное поле величиной $B_r^0 \approx 1...5000$ мТл [5, 35], способно генерировать достаточно сильное стационарное тороидальное поле ($B_\varphi^0 = 1$ кТл возле солнечного ядра, $B_\varphi^0 \approx 1$ Тл на верхней границе лучистой зоны). Полученные оценки магнитной индукции подтверждаются независимыми определениями глубинного магнетизма в недавних гелиосейсмических экспериментах [17, 23, 24]. Мы полагаем, что вследствие магнитной плавучести это тороидальное поле через верхнюю границу лучистой зоны может проникать в область $\alpha\Omega$ -динамика в СКЗ. Очевидно, что здесь это стационарное поле установившегося направления будет добавляться к возбуждаемому механизмом $\alpha\Omega$ -динамика осциллирующему тороидальному полю, которое изменяет свой знак с периодом 11 лет. В таком случае амплитуда суммарного переменного тороидального поля должна немножко отличаться в соседних циклах. В результате различным будет и количество всплывающих фрагментов МСТ, что отразится на темпе пятнообразования. Согласно правилу Гневышева — Оля [4] каждый 22-летний магнитный цикл начинается четным циклом малой величины, после которого следует нечетный более мощный цикл солнечных пятен. Поэтому мы полагаем, что направление стационарного поля совпадает с направлением тороидального динамика именно в нечетных циклах. Следует иметь в виду, что мощное тороидальное поле будет значительно быстрее и эффективнее всплывать из недр к верхней границе лучистой зоны, чем слабое полоидальное поле. По-видимому, именно стационарное тороидальное поле установ-

ившегося направления, которое порождается дифференциальным вращением в лучистой зоне и оттуда проникает в СКЗ, «подпитывает» $\alpha\Omega$ -процесс и, таким образом, отвечает за чередование максимумов активности пятен в четных и нечетных циклах.

выводы

Возбуждаемое вблизи тахоклина вследствие Ω -эффекта тороидальное поле B_t в течение солнечного цикла испытывает комбинированное влияние нескольких механизмов его перестройки в объеме СКЗ: магнитной плавучести, турбулентного диамагнетизма и ротационного $\nabla\rho$ -эффекта. На высоких и околополярных широтах это поле заблокировано tandemом механизмов «антиплавучести» (турбулентным диамагнетизмом и $\nabla\rho$ -накачкой) в глубинах СКЗ, поэтому оно не может проявить себя на поверхности в виде магнитных структур, подобных солнечным пятнам.

Совсем иная картина вырисовывается на средних и низких широтах. В глубоких слоях плавучесть и направленная вверх $\nabla\rho$ -накачка вместе способны нейтрализовать и даже превзойти направленное вниз диамагнитное вытеснение поля. Поэтому тороидальное поле мигрирует вверх, пока не достигнет участка, где $\nabla\rho$ -эффект изменяет свой знак на противоположный. Выше этого уровня магнитная накачка начинает действовать уже против плавучести. Поскольку вблизи поверхности сильно увеличивается скорость магнитного всплыивания, то здесь $\nabla\rho$ -эффект может компенсировать перенос вверх только относительно слабых полей. Но он уже не в состоянии помешать подъему интенсивных тороидальных полей ($B > 200$ мТл), которые после их выноса на поверхность наблюдаются в «королевской зоне» как солнечные пятна. Максимальная широта вблизи дна СКЗ, на которой $\nabla\rho$ -эффект способствует всплыvанию полей, приблизительно отвечает параллели 45°, что хорошо согласуется с высокоширотной границей «королевской зоны».

Высказана идея о том, что комбинация направленного к экватору глубинного меридионального течения, магнитной плавучести и направленной вверх $\nabla\rho$ -накачки в приэкваториальном домене может вызвать иногда наблюдаемые повторные максимумы циклов солнечных пятен. Сделано предположение, что стационарное тороидальное поле установленного направления, которое порождается дифференциальным вращением в лучистой зоне и оттуда проникает в СКЗ, будет добавляться к возбуждаемому механизму $\alpha\Omega$ -динамика осциллирующему тороидальному полю, которое изменяет свой знак (направление) с периодом 11 лет. Имен-

но это проникающее в СКЗ глубинное тороидальное поле, на наш взгляд, ответственно за чередование максимумов активности пятен в четных и нечетных циклах (правило Гневышева — Оля).

1. Беневоленская Е. Е., Пудовкин М. И. Моделирование 22-летнего цикла солнечной активности в рамках теории динамо с учетом первичного поля // Астрон. журн.—1984.—61, № 4.—С. 783—788.
2. Вайнштейн С. И. Магнитные поля в космосе. — М.: Наука, 1983.—240 с.
3. Вайнштейн С. И., Зельдович Я. Б., Рузмайкин А. А. Торбулентное динамо в астрофизике. — М.: Наука, 1980.—352 с.
4. Гневышев М. Н., Оль А. И. О 22-летнем цикле солнечной активности // Астрон. журн.—1948.—25, № 1.—С. 18—20.
5. Дудоров А. Е. Зависимость интенсивности магнитного поля от плотности межзвездных облаков HI // Астрон. циркуляр.—1986.—№ 1146.—С. 1—3.
6. Дудоров А. Е., Криводубский В. Н., Рузмайкина Т. В., Рузмайкин А. А. Внутреннее крупномасштабное магнитное поле Солнца // Астрон. журн.—1989.—66, № 4.—С. 809—821.
7. Зельдович Я. Б. Магнитное поле при двумерном движении проводящей жидкости // ЖЭТФ.—1956.—31.—С. 154—156.
8. Кичатинов Л. Л. О магнитной гидродинамике средних полей в неоднородной турбулентной среде // Магнит. гидродинамика.—1982.—№ 3.—С. 67—73.
9. Кичатинов Л. Л., Криводубский В. Н. Вплив обертання Сонця на турбулентне перенесення великомасштабного магнітного поля у конвективній зоні // Кінематика і фізика небес. тел.—1991.—7, № 6.—С. 30—39.
10. Кичатинов Л. Л., Пилин В. В. Плавучесть среднего магнитного поля в турбулентной среде // Письма в Астрон. журн.—1993.—19, № 6.—С. 557—563.
11. Краузе Ф., Рэдлер К.-Х. Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо. — М.: Мир, 1984.—320 с.
12. Криводубский В. Н. О переносе магнитных полей в турбулентной оболочке Солнца // Астрон. журн.—1984.—61, № 2.—С. 354—365.
13. Криводубский В. Н. Перенос крупномасштабного магнитного поля Солнца, обусловленный неоднородностью плотности вещества конвективной зоны // Письма в Астрон. журн.—1987.—13, № 9.—С. 803—810.
14. Криводубский В. Н. Турбулентный перенос крупномасштабного магнитного поля во вращающейся конвективной зоне Солнца // Астрон. журн.—1992.—69, № 4.—С. 842—849.
15. Паркер Е. Космические магнитные поля: В 2-х т. — М.: Мир, 1982.—Т. 1.—608 с.; Т. 2.—480 с.
16. Пудовкин М. И., Беневоленская Е. Е. Квазистационарное первичное магнитное поле Солнца и вариации интенсивности солнечного цикла // Письма в Астрон. журн.—1982.—8, № 8.—С. 506—509.
17. Antia H. M., Chitre S. M., Thompson M. J. On variations of the latitudinal structure of the solar convection zone // Astron. and Astrophys.—2003.—399.—P. 329—336.
18. Basu S., Antia H. M. Changes in solar dynamics from 1995 to 2002 // Astrophys. J.—2003.—585.—P. 553—565.
19. Boyer D. W., Levy E. H. Oscillating dynamo magnetic field in the presence of the external nondynamo field. The influence of a solar primordial field // Astrophys. J.—1984.—277, N 2.—P. 848—861.
20. Braun D. L., Fan Y. Helioseismic measurements of the subsurface meridional flow // Astrophys. J.—1998.—508.—P. L105—L108.
21. Drobyshevskij E. M. Magnetic field transfer by two-dimensional convection and solar «semi-dynamo» // Astrophys. Space Sci.—1977.—46.—P. 41—49.
22. Duvall T. L., Dziembowski W. A., Goode P. R., et al. Internal rotation of the sun // Nature.—1984.—310.—P. 22—25.
23. Dziembowski W. A., Goode P. R. The toroidal magnetic field in the Sun // Astrophys. J.—1989.—347, N 2.—P. 540—550.
24. Dziembowski W. A., Goode P. R., Kosovichev A. G., Schou J. Signatures of the rise of cycle 23 // Astrophys. J.—2000.—537.—P. 1026—1038.
25. Giles P. M., Duval T. L., Scherrer P. H., Bogart R. S. A subphotospheric flow of material from the Sun's equator to its poles // Nature.—1997.—390.—P. 52—54.
26. Hathaway D. H., Gilman P. A., Toomre J. Convection instability when the temperature gradient and rotation vector are oblique to gravity. I. Fluids without diffusion // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.—1979.—13, N 4.—P. 289—301.
27. Hathaway D. H., Gilman P., Harvey J. W., et al. GONG observations of solar surface flows // Science.—1996.—272.—P. 1306—1309.
28. Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., et al. Dynamic variations at the base of the solar convection zone // Science.—2000.—287.—P. 2456—2460.
29. Kitchatinov L. L. Turbulent transport of magnetic fields in a highly conducting rotating fluid and the solar cycle // Astron. and Astrophys.—1991.—243, N 2.—P. 483—491.
30. Kitchatinov L. L., Rüdiger G. Magnetic field advection in inhomogeneous turbulence // Astron. and Astrophys.—1992.—260.—P. 494—498.
31. Kryvodubskyj V. N., Rüdiger G., Kitchatinov L. L. Non-linear diamagnetic transfer and magnetic buoyancy of large-scale magnetic field in the convective zone of the Sun // Бюл. Київ. ун.-ту. Астрономія.—1994.—№ 33.—С. 55—58.
32. Leighton R. B. A magneto-kinetic model of the solar cycle // Astrophys. J.—1969.—156.—P. 1—26.
33. Nandy D., Choudhuri A. R. Solar dynamo models with realistic internal rotation // Scince.—2002.—296.—1671—1674.
34. Parker E. N. The formation of sunspots from the solar toroidal field // Astrophys. J.—1955.—121.—P. 491—507.
35. Ruzmaikina T. V. The role of magnetic field in star formation // Magnetic Fields in Astrophysics. — London, 1983.—P. 267—291.
36. Schüssler M. Stellar dynamo theory // Solar and Stellar Magnetic Fields: Origins and Coronal Effects / Ed. J. O. Stenflo.—Symp. IAU 102. Zurich. 1982. — Dordrecht: Reidel, 1983.—P. 213—236.
37. Stix M. The Sun. — Berlin: Verlag, 1989.—200 p.

A ROLE OF MAGNETIC PUMPING MECHANISMS IN THE FORMATION OF A SUNSPOT «ROYAL ZONE»

V. N. Kryvodubskyj

Two «magnetic antibuoyancy» mechanisms: i) turbulent diamagnetism and ii) magnetic pumping produced by radial inhomogeneity of plasma density ($\nabla\rho$ -effect) are attracted to compensate the flux losses caused by the magnetic buoyancy in the generation region in the solar convection zone (SCZ). The Sun's rotation which endows the $\nabla\rho$ -effect with new properties is taken into account. It is shown that at high and polar latitudes antibuoyancy effects block the magnetic fields in the deep layers of the SCZ. At the same time, in the deep layers located at middle to low latitudes the rotational grad rho effect causes the upward magnetic pumping which together with buoyancy facilitates the removal of strong magnetic fields (300—400 mT) to solar surface where they then arise in the «royal zone» as sunspots.

УДК 581.17+581.84

Ю. І. Лесняк, О. Т. Демків

Інститут екології Карпат НАН України, Львів

Сприйняття і реалізація гравістимулу у протонемі мохів

Надійшла до редакції 10.03.05

Експериментально показано, що в умовах низьких температур перцепція гравістимулу відбувається, але ріст апікальних клітин блокується. Перенесення протонеми у звичайні умови середовища призводить до реалізації гравітропного згину. Встановлено, що реалізацію гравістимулу можна експериментально заблокувати інгібторами: кальцієвих каналів верапамілом у концентрації 100 і 1000 мкМ і кальцієвих помп ортovanадатом натрію — 10—100 мкМ. Екзогенні фітогормони ІОК і α-НОК у концентрації 0.1 і 1 мкМ нестотно впливали на ріст і гравітропний згин апікальних клітин протонеми, фіtotропін НФК у концентрації 100 мкМ пригнічував гравітропно залежний згин і не сильно впливав на швидкість росту верхівкових клітин протонеми.

Рослинні організми сформували тонкі механізми, за допомогою яких вони здатні постійно корегувати положення свого тіла у просторі відносно вектора сили тяжіння. У спеціалізованих рослинних клітинах просторова корекція відбувається за участю аміlopластів, які під дією сили тяжіння седиментують на нижню поверхню клітинної стінки. У протонемі листяних мохів аміloplastи також виконують роль статолітів. Ризоїди листяних мохів і печіночників мають здатність реагувати на гравітацію, хоча статоліти виявлені тільки у клітинах листостеблових мохів, а у ризоїдах печіночників їх немає. Не менш важливою особливістю гравічутливих клітин вважають [6] полярну структуру статоцитів (чутливих до гравітації клітин), а не наявність крохмалю в аміlopастах. Однак Дж. Кісс із співробітниками [9] встановили, що для коренів арабідопсису мутантної форми, у якої немає аміlopастів, гравітропна реакція відбувається набагато повільніше, ніж у дикого штаму, що може свідчити про необхідність аміlopастів для перцепції гравітропного стимулу.

Аналогічні результати були отримані для ризоїдів водорості *Chara* [8]. Зміною поживного середовища вдалося збільшити у 5—10 разів кількість статолітів у верхівковій клітині, ніж їх буває у нормі. У цих умовах гравітропний згин ризоїдів, які виростили на спеціальному поживному середовищі, збільшився у 3-4 рази порівняно з ризоїдами контрольних рослин. Крім кількості аміlopастів у гравітропізмі важливу роль відіграють також їхні розміри, бо

тільки часточки, більші від 1.0 мкм у діаметрі, здатні седиментувати у в'язкому середовищі цитозолю [10].

Апікальні клітини протонеми мохів строго поляризовані верхівковим ростом, метаболічним і функціональним апікально-базальним градієнтом [2] та апікально-базальним транспортом ІОК [11, 12]. Вони містять у субапікальній гравічутливій зоні аміlopastи, які здатні седиментувати як в умовах горизонтальної орієнтації, так і в умовах реверсного положення.

Якщо чашки з протонемою, що росте у темряві, негативно гравітропно повернуті на 90° таким чином, щоб протонема опинилася у горизонтальному положенні, то вже через 10—15 хв апікальні клітини загинаються, відновлюючи негативно гравітропний ріст. Особливість реакції протонеми гравітропних видів зумовлена тим, що сприйняття гравітації і її реалізація відбувається верхівкою апікальної клітини [7]. Зміна орієнтації росту здійснюється у результаті зміщення ростової активності у границях ростового апекса [1]. Крім того, протонема мохів сприймає апікальними клітинами, не тільки граві-, але й фотостимул. Цією ж клітиною здійснюється й реалізація обох стимулів у ростовий процес.

Експериментально було встановлено, що ріст протонеми мохів, як і інших вищих рослин залежить від температури. Хоча температурний максимум у мохів і менший, все ж при температурі, близькій до нуля, ріст припиняється.

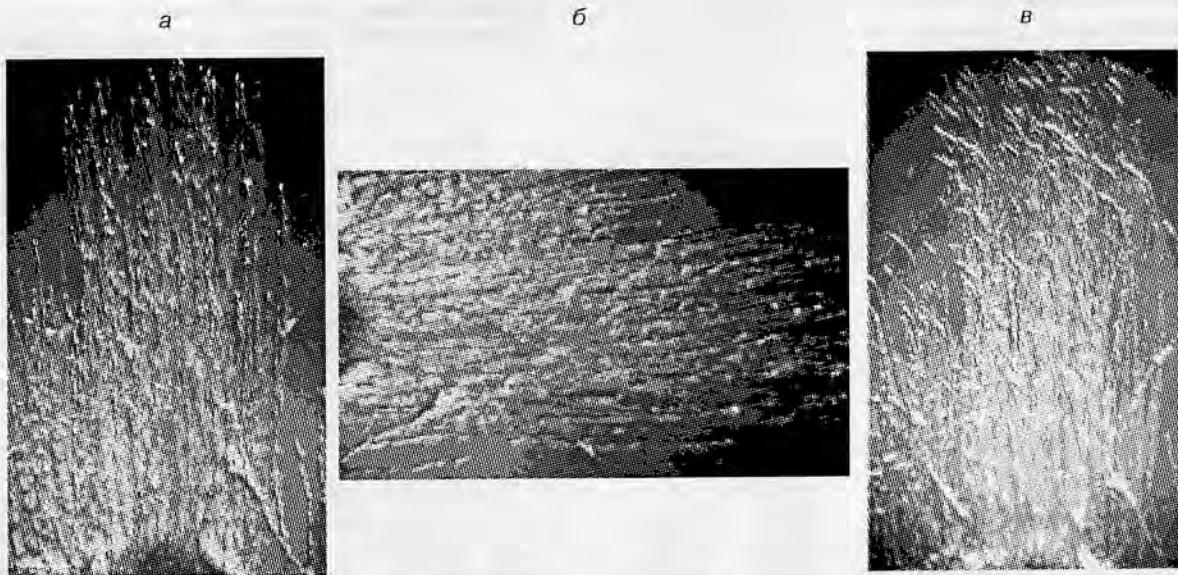


Рис. 1. Схема експерименту із гравітропною протонемою *Ceratodon purpureus*: а — контроль; б — 12 год гравістимуляції в умовах низької температури (2°C); в — згин верхівок протонеми після 12 год витримування в умовах кліностатування (20°C)

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі використовували протонему моху *Ceratodon purpureus*, яку вирощували у контрольованих умовах освітлення 2000 ± 200 лк, температури $20—22^{\circ}\text{C}$ на 16-годинному світловому дні. Семиденну протонему препарувальною голкою знімали з агару і переносили в нові чашки Петрі на агаризоване середовище, в яке додатково вносили 0.2 % глюкозу, чашки загортали темним папером і ставили вертикально. У темряві протонема росла негативно-гравітропно, утворюючи пасмо паралельних ниток. Через сім діб протонему повертали на 90° і ставили в холодильник при 2°C . Після цього протонему переносили на кліностат в умови нормальної температури, і через 4—12 год аналізували характер ростових рухів. Фітогормони, фіtotропіни та блокатори кальцієвих каналів вносили в агар перед перенесенням протонеми у темряву. Після завершення експерименту протонему фіксували розчином Карнуга, і під мікроскопом вимірювали довжину столонів та кути їхнього згину. У кожному експерименті аналізували не менше 100 столонів, з результатів вимірювань яких визначали середнє арифметичне і стандартну помилку.

Виявилося, що протонема сприймала гравістимул у темряві в умовах низької температури і реалізувала його на кліностаті під час обертання. Якщо протонему 12 год витримували на кліностаті в умовах 2°C , то ніякого гравітропного згину виявiti не вдалося. Згин проявлявся лише в умов-

вах кімнатної температури, при якій протонема мала змогу рости і одночасно з цим згинатися.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мікроскопічним аналізом протонеми виявили, що не в усіх чашках спостерігалася седиментація амілопластів; вони зміщувалися на нижню сторону клітини лише у чашках, які зазнали 4-годинної гравістимуляції. Порівняльними аналізами локалізації у субапікальній зоні апікальних клітин ми не виявили змін між чашками, які витримували більш ніж 4 год в умовах гравістимуляції, та чашками, що додатково витримувалися в умовах 2°C на кліностаті. Отримані результати можуть свідчити про те, що гравістимул може не тільки сприйматися, але й деякий час знаходиться у «законсервованому» стані у клітинах із заблокованим ростом.

На рис. 1 представлена принципова схема проведеного експерименту із протонемою *Ceratodon purpureus*. Тривалість гравістимуляції слабо впливалася на кут загину протонеми, не впливалася також тривалість витримування протонеми на кліностаті в умовах 2°C , однак тривалість росту протонеми і кути загину поступово збільшувалися із тривалістю росту протонеми в умовах нормальної температури (20°C). Сприйняття гравістимулу і його «консервацію» ми оцінювали кутом загину.

Обробка протонеми різними концентраціями ІОК та НОК виявила, що концентрації, які стимулюють

Таблиця 1. Вплив фізіологічно активних речовин на швидкість росту протонеми *Ceratodon purpureus*

Діюча речовина	Концентрація, мкМ	Швидкість росту, мкм/год
Контроль	—	29.2±2.5
ІОК	0.1	24.4±6.9
	1	28.0±3.6
НОК	0.1	26.9±6.7
	1	27.0±4.5
НФК	0.1	22.8±3.9
	1	17.5±2.2
	10	12.3±2.1

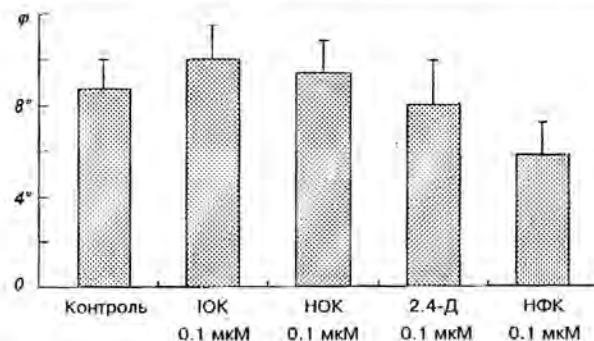


Рис. 2. Вплив фізіологічно активних речовин на гравітропний ріст протонеми *Ceratodon purpureus*

ріст протонеми, стимулювали також її загин під впливом гравістимулу, сприйнятого клітинами в умовах низької температури. Блокатори Ca^{2+} -АТФ-фази — ванадат натрію та Ca^{2+} -каналів — верапаміл гальмували швидкість росту і кути загину протонеми (рис. 3, табл. 1, 2).

Стимулюючі концентрації ІОК сприяли гравітропному згину апікальних клітин протонеми. Фітотропін НФК (нафтілфталамонова кислота) у низьких концентраціях не порушував зональний розподіл аміlopластів, неістотно знижував відсоток і величину кута гравітропного згину. Починаючи з концентрації 1.0 мкМ розпочиналося зменшення кута гравітропного згину. Вища (10 мкМ) концентрація НФК впливала на розподіл пластид та інгібувала гравітропний згин протонеми.

Фізіологічно активні речовини, у тому числі 0.1—1.0 мкМ ІОК порівняно з контролем сприяла збільшенню кута загину; НОК у такій же концентрації діяла аналогічно, але дещо слабше; 2.4-Д незначно зменшувала кут порівняно з контролем, у той час як під впливом НФК досить чітко спостерігалось зменшення кута загину, зумовленого гравістимуляцією (рис. 2, табл. 1).

Проведені дослідження впливу фітогормонів, фітотропінів на гравітропізм протонеми *Ceratodon purpureus* свідчать про участь базипетального тран-

Таблиця 2. Вплив фізіологічно активних речовин на швидкість росту протонеми *Ceratodon purpureus*

Діюча речовина	Концентрація, мкМ	Швидкість росту, мкм/год
Контроль	—	29.2±2.5
Ванадат Na	10	28.5±3.7
	100	26.0±5.5
Верапаміл	1000	18.7±3.7
	1	29.3±4.7
Ванадат Na	10	27.5±4.3
	100	18.8±5.8

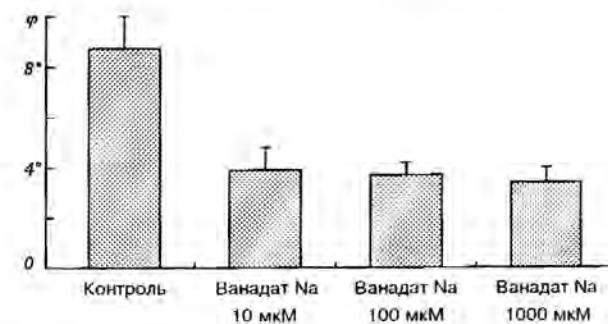


Рис. 3. Вплив ортovanадату натрію на гравітропний ріст протонеми *Ceratodon purpureus*

спорту ІОК у трансдукції гравістимулу в одній верхівковій клітині протонеми мохів. Клітини протонеми під впливом фітотропіну НФК [13], який, як відомо, зв'язується зі специфічними переносниками ІОК, блокує вихід ІОК з клітин, що впливає на характер градієнта ауксину в рецепторних апікальних клітинах і орієнтацію росту. На підставі наших та інших даних можна зробити висновок про участь полярного транспорту ІОК у гравітропізмі нитчастих структур з апікальним ростом [4].

Перетворення механічної енергії у гравітропний згин пояснюють статолітною дією аміlopластів, яка підтверджена у багатьох працях. Рух і/або тиск аміlopластів у гравітаційному полі передається на елементи цитоскелету, які пересилують сигнал на переносники виходу ауксину на сусідніх мембрanaх.

Особливістю протонеми мохів є те, що градієнт ендогенної ІОК і градієнт Ca^{2+} в апікальних клітинах мають однакову апікально-базальну напрямленість. Якщо врахувати специфіку згину апікальних клітин, яка полягає в тому, що зміна орієнтації росту відбувається внаслідок переміщення зони росту в куполі апікальної клітини, а не диференційного росту, то гіпотези гравітропізму, які розробляються для багатоклітинних органів квіткових рослин, не можна безпосередньо переносити на протонему мохів. Базипетальний транспорт ІОК в

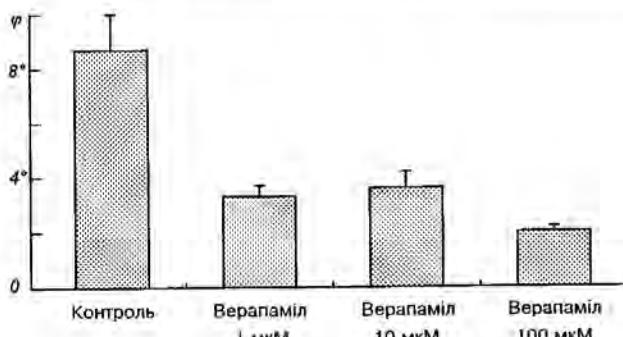


Рис. 4. Вплив верапамілу на гравітропний ріст протонеми *Ceratodon purpureus*

апікальній клітині поляризує її функціонально і с чутливим сенсором до ендогенних змін, у тому числі седиментації амілопластів. Показано, що седиментація амілопластів викликає локальне підвищення Ca^{2+} -АТФаз у зоні їхнього осідання у місцях контакту з ендомембраними [5]. Тому можна допустити, що активування Ca^{2+} -АТФаз буде індукувати зміну осі базипетального транспорту Ca^{2+} і відповідне переміщення Ca^{2+} -каналів на плазматичній мембрani клітини. Базипетальний потік Ca^{2+} буде зміщуватися від його входу в апексі верхівкової клітини.

Зміна полярного транспорту Ca^{2+} відповідним чином відкоректує потік IOK і його наслідком стане зміщення ростової зони. Якщо порушити транспорт ауксину фіtotропінами, то це заблокує ріст і сприйняття гравістимулу. Отже, у гравітропізмі апікальної клітини протонеми домінус поляризаційна, а не ростова функція IOK.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально встановлено, що сприйняття гравістимулу апікальними клітинами може відбуватися при низьких температурах (2°C), однак гравістимул реалізується лише в умовах, сприятливих для росту протонеми (20°C).

2. Низькі концентрації фітогормонів стимулюють вираженість гравістимулу.

3. Реалізація гравітропного згину здійснюється за участю потоків Ca^{2+} : блокатори кальцієвих каналів і кальцієвих помп притнічують вираженість гравітропного згину апікальних клітин протонеми (рис. 3, 4, табл.2).

- Демків О. Т., Ситник К. М. Морфогенез архегоніат. — К.: Наук. думка, 1985.—204 с.
- Демків О. Т., Федик Я. Д. Полярність клеточній прони-

цаемости и ее контроль фитохромом // Биофизика.—1977.—22, № 5.—С. 824—828.

- Демків О. Т., Федик Я. Д. Метаболічні градієнти і морфогенез протонеми *Funaria hygrometrica* Hedw. // Укр. ботан. журн.—1972.—29, № 4.—С. 434—438.
- Демків О., Хоркавців Я., Кардаш О. Гормональний контроль розвитку гаметофіту мохів // Праці Наук. Товариства ім. Шевченка.—1999.—3.—С. 39—49.
- Хоркавців О. Я., Демків О. Т., Хоркавців Я. Д. Участь кальцію у гравітропізмі протонеми моху *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb. // Космічна наука і технологія.—2003.—8, № 1.—С. 89—95.
- Busch M. B., Sievers A. Hormone treatment of roots causes not only a reversible loss of starch bud also of structural polarity in statocytes // Planta.—1990.—181.—P. 358—364.
- Chaban Ch. I., Kern V. D., Ripetskyj R. T., et al. Gravitropism in caulonemata of the moss *Pottia intermedia* // J. Bryology.—1998.—20.—P. 287—299.
- Kiss J. Z. The response to gravity is correlated with the number of statoliths in Chara rizoids // Plant Physiol.—1994.—105, N 3.—P. 937—940.
- Kiss J. Z., Hertel L., Sack F. D. Amyloplasts are necessary for full gravitropic sensitivity in roots of *Arabidopsis thaliana* // Planta.—1989.—177, N 2.—P. 198—206.
- Pollard E. C. Theoretical studies on living systems in the absence of mechanical stress // J. Theor. Biol.—1965.—8.—P. 113—123.
- Rose S., Bopp M. Uptake and polar transport of indoleacetic acid in moss rhizoids // Physiol. Plant.—1983.—58.—P. 57—61.
- Rose S., Rubery, Bopp M. The mechanism of auxin uptake and accumulation in moss protonemata // Physiol. Plant.—1983.—58.—P. 52—56.
- Schwuchow J., Michalke W., Hertel R. An auxin transport inhibitor interferes with unicellular gravitropism in protonemata of the moss *Ceratodon purpureus* // Plant Biol.—2001.—N 3.—P. 357—363.

PERCEPTION AND REALIZATION OF GRAVISTIMULATION IN PROTONEMA OF MOSSES

Yu. I. Lesnyak, O. T. Demkiv

The protonema of mosses perceives and realizes gravistimulation by apical cells of stolones. The function of gravireceptors is executed by amyloplasts, which are sedimented on the bottom part of a lateral side under the influence of gravitation. The character of distribution of amyloplasts and dynamics of sedimentation are described for different kinds of mosses. Nevertheless, the processes of transduction of gravistimulation in growth process remain unexplored. It is experimentally shown that in conditions of low temperatures the perception of gravistimulation takes place, but the growth of apical cells is blocked. When gravistimulated protonema are transferred to natural conditions of environment, gravitropic bend is realized. It is established that the realization of gravistimulation can be experimentally blocked by inhibitors: of calcium's canals by verapamils with a concentration of 10^{-4} and 10^{-3} M and calcium's pumps by ortovanadats natriums with a concentration of 10^{-5} to 10^{-4} M. Exogenous phytohormones of indole-3-acetic acid (IAA) and α -naphthyl acetate acid (NAA) with a concentration of 10^{-7} and 10^{-6} M influenced insignificantly growth and gravitropic bend of apical cells of protonema. Nevertheless, phytotropin NPA with a concentration of 10^{-4} oppressed considerably gravitropic-dependent bend and scarcely affected growth rate of apical cells of protonema.

УДК 581.17+581.84

Ю. І. Лесняк, О. Т. Демків

Інститут екології Карпат НАН України, Львів

Сприйняття і реалізація гравістимулу у протонемі мохів

Надійшла до редакції 10.03.05

Експериментально показано, що в умовах низьких температур перцепція гравістимулу відбувається, але ріст апікальних клітин блокується. Перенесення протонеми у звичайні умови середовища призводить до реалізації гравітропного згину. Встановлено, що реалізацію гравістимулу можна експериментально заблокувати інгібторами: кальцієвих каналів верапамілом у концентрації 100 і 1000 мкМ і кальцієвих помп ортovanадатом натрію — 10—100 мкМ. Екзогенні фітогормони ІОК і α-НОК у концентрації 0.1 і 1 мкМ нестотно впливали на ріст і гравітропний згин апікальних клітин протонеми, фіtotропін НФК у концентрації 100 мкМ пригнічував гравітропно залежний згин і не сильно впливав на швидкість росту верхівкових клітин протонеми.

Рослинні організми сформували тонкі механізми, за допомогою яких вони здатні постійно корегувати положення свого тіла у просторі відносно вектора сили тяжіння. У спеціалізованих рослинних клітинах просторова корекція відбувається за участю аміlopластів, які під дією сили тяжіння седиментують на нижню поверхню клітинної стінки. У протонемі листяних мохів аміloplastи також виконують роль статолітів. Ризоїди листяних мохів і печіночників мають здатність реагувати на гравітацію, хоча статоліти виявлені тільки у клітинах листостеблових мохів, а у ризоїдах печіночників їх немає. Не менш важливою особливістю гравічутливих клітин вважають [6] полярну структуру статоцитів (чутливих до гравітації клітин), а не наявність крохмалю в аміlopастах. Однак Дж. Кісс із співробітниками [9] встановили, що для коренів арабідопсису мутантної форми, у якої немає аміlopастів, гравітропна реакція відбувається набагато повільніше, ніж у дикого штаму, що може свідчити про необхідність аміlopастів для перцепції гравітропного стимулу.

Аналогічні результати були отримані для ризоїдів водорості *Chara* [8]. Зміною поживного середовища вдалося збільшити у 5—10 разів кількість статолітів у верхівковій клітині, ніж їх буває у нормі. У цих умовах гравітропний згин ризоїдів, які виростили на спеціальному поживному середовищі, збільшився у 3-4 рази порівняно з ризоїдами контрольних рослин. Крім кількості аміlopастів у гравітропізмі важливу роль відіграють також їхні розміри, бо

тільки часточки, більші від 1.0 мкм у діаметрі, здатні седиментувати у в'язкому середовищі цитозолю [10].

Апікальні клітини протонеми мохів строго поляризовані верхівковим ростом, метаболічним і функціональним апікально-базальним градієнтом [2] та апікально-базальним транспортом ІОК [11, 12]. Вони містять у субапікальній гравічутливій зоні аміlopastи, які здатні седиментувати як в умовах горизонтальної орієнтації, так і в умовах реверсного положення.

Якщо чашки з протонемою, що росте у темряві, негативно гравітропно повернуті на 90° таким чином, щоб протонема опинилася у горизонтальному положенні, то вже через 10—15 хв апікальні клітини загинаються, відновлюючи негативно гравітропний ріст. Особливість реакції протонеми гравітропних видів зумовлена тим, що сприйняття гравітації і її реалізація відбувається верхівкою апікальної клітини [7]. Зміна орієнтації росту здійснюється у результаті зміщення ростової активності у границях ростового апекса [1]. Крім того, протонема мохів сприймає апікальними клітинами, не тільки граві-, але й фотостимул. Цією ж клітиною здійснюється й реалізація обох стимулів у ростовий процес.

Експериментально було встановлено, що ріст протонеми мохів, як і інших вищих рослин залежить від температури. Хоча температурний максимум у мохів і менший, все ж при температурі, близькій до нуля, ріст припиняється.

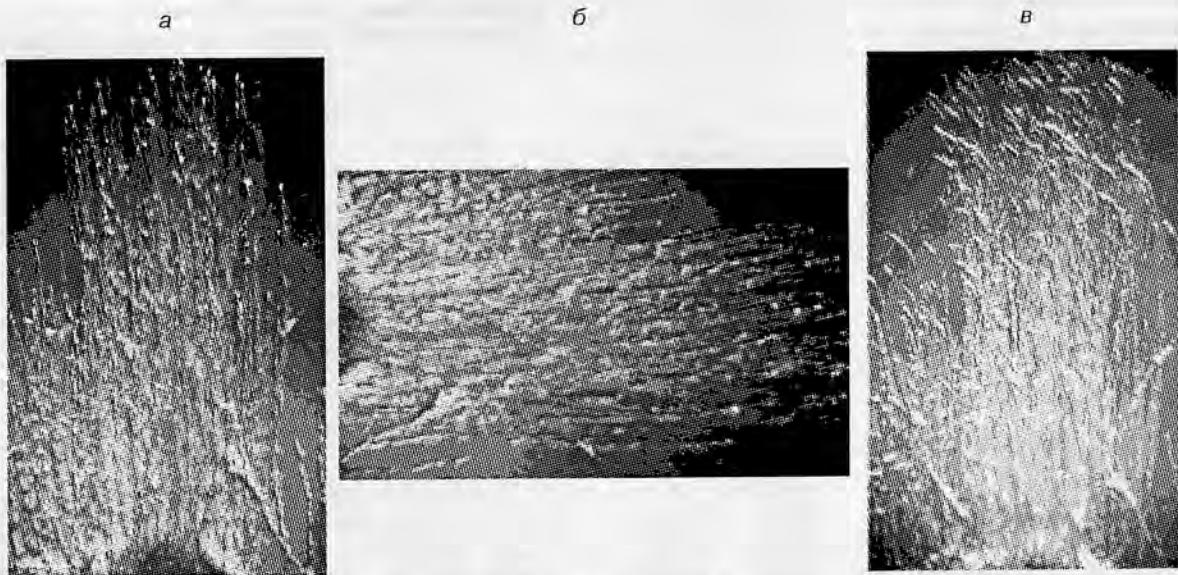


Рис. 1. Схема експерименту із гравітропною протонемою *Ceratodon purpureus*: а — контроль; б — 12 год гравістимуляції в умовах низької температури (2°C); в — згин верхівок протонеми після 12 год витримування в умовах кліностатування (20°C)

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі використовували протонему моху *Ceratodon purpureus*, яку вирощували у контрольованих умовах освітлення 2000 ± 200 лк, температури $20—22^{\circ}\text{C}$ на 16-годинному світловому дні. Семиденну протонему препарувальною голкою знімали з агару і переносили в нові чашки Петрі на агаризоване середовище, в яке додатково вносили 0.2 % глюкозу, чашки загортали темним папером і ставили вертикально. У темряві протонема росла негативно-гравітропно, утворюючи пасмо паралельних ниток. Через сім діб протонему повертали на 90° і ставили в холодильник при 2°C . Після цього протонему переносили на кліностат в умови нормальної температури, і через 4—12 год аналізували характер ростових рухів. Фітогормони, фіtotропіни та блокатори кальцієвих каналів вносили в агар перед перенесенням протонеми у темряву. Після завершення експерименту протонему фіксували розчином Карнуга, і під мікроскопом вимірювали довжину столонів та кути їхнього згину. У кожному експерименті аналізували не менше 100 столонів, з результатів вимірювань яких визначали середнє арифметичне і стандартну помилку.

Виявилося, що протонема сприймала гравістимул у темряві в умовах низької температури і реалізувала його на кліностаті під час обертання. Якщо протонему 12 год витримували на кліностаті в умовах 2°C , то ніякого гравітропного згину виявiti не вдалося. Згин проявлявся лише в умо-

вах кімнатної температури, при якій протонема мала змогу рости і одночасно з цим згинатися.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мікроскопічним аналізом протонеми виявили, що не в усіх чашках спостерігалася седиментація амілопластів; вони зміщувалися на нижню сторону клітини лише у чашках, які зазнали 4-годинної гравістимуляції. Порівняльними аналізами локалізації у субапікальній зоні апікальних клітин ми не виявили змін між чашками, які витримували більш ніж 4 год в умовах гравістимуляції, та чашками, що додатково витримувалися в умовах 2°C на кліностаті. Отримані результати можуть свідчити про те, що гравістимул може не тільки сприйматися, але й деякий час знаходиться у «законсервованому» стані у клітинах із заблокованим ростом.

На рис. 1 представлена принципова схема проведеного експерименту із протонемою *Ceratodon purpureus*. Тривалість гравістимуляції слабо впливалася на кут загину протонеми, не впливалася також тривалість витримування протонеми на кліностаті в умовах 2°C , однак тривалість росту протонеми і кути загину поступово збільшувалися із тривалістю росту протонеми в умовах нормальної температури (20°C). Сприйняття гравістимулу і його «консервацію» ми оцінювали кутом загину.

Обробка протонеми різними концентраціями ІОК та НОК виявила, що концентрації, які стимулюють

Таблиця 1. Вплив фізіологічно активних речовин на швидкість росту протонеми *Ceratodon purpureus*

Діюча речовина	Концентрація, мкМ	Швидкість росту, мкм/год
Контроль	—	29.2±2.5
ІОК	0.1	24.4±6.9
	1	28.0±3.6
НОК	0.1	26.9±6.7
	1	27.0±4.5
НФК	0.1	22.8±3.9
	1	17.5±2.2
	10	12.3±2.1

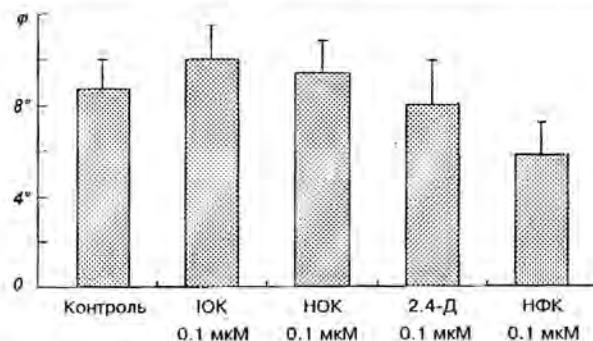


Рис. 2. Вплив фізіологічно активних речовин на гравітропний ріст протонеми *Ceratodon purpureus*

ріст протонеми, стимулювали також її загин під впливом гравістимулу, сприйнятого клітинами в умовах низької температури. Блокатори Ca^{2+} -АТФ-фази — ванадат натрію та Ca^{2+} -каналів — верапаміл гальмували швидкість росту і кути загину протонеми (рис. 3, табл. 1, 2).

Стимулюючі концентрації ІОК сприяли гравітропному згину апікальних клітин протонеми. Фітотропін НФК (нафтілфталамонова кислота) у низьких концентраціях не порушував зональний розподіл аміlopластів, неістотно знижував відсоток і величину кута гравітропного згину. Починаючи з концентрації 1.0 мкМ розпочиналося зменшення кута гравітропного згину. Вища (10 мкМ) концентрація НФК впливала на розподіл пластид та інгібувала гравітропний згин протонеми.

Фізіологічно активні речовини, у тому числі 0.1—1.0 мкМ ІОК порівняно з контролем сприяла збільшенню кута загину; НОК у такій же концентрації діяла аналогічно, але дещо слабше; 2.4-Д незначно зменшувала кут порівняно з контролем, у той час як під впливом НФК досить чітко спостерігалось зменшення кута загину, зумовленого гравістимуляцією (рис. 2, табл. 1).

Проведені дослідження впливу фітогормонів, фітотропінів на гравітропізм протонеми *Ceratodon purpureus* свідчать про участь базипетального тран-

Таблиця 2. Вплив фізіологічно активних речовин на швидкість росту протонеми *Ceratodon purpureus*

Діюча речовина	Концентрація, мкМ	Швидкість росту, мкм/год
Контроль	—	29.2±2.5
Ванадат Na	10	28.5±3.7
	100	26.0±5.5
Верапаміл	1000	18.7±3.7
	1	29.3±4.7
Ванадат Na	10	27.5±4.3
	100	18.8±5.8

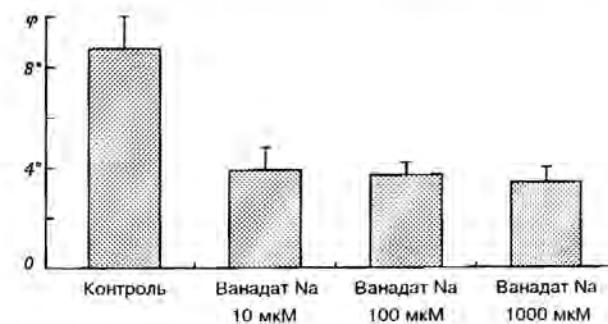


Рис. 3. Вплив ортovanадату натрію на гравітропний ріст протонеми *Ceratodon purpureus*

спорту ІОК у трансдукції гравістимулу в одній верхівковій клітині протонеми мохів. Клітини протонеми під впливом фітотропіну НФК [13], який, як відомо, зв'язується зі специфічними переносниками ІОК, блокує вихід ІОК з клітин, що впливає на характер градієнта ауксину в рецепторних апікальних клітинах і орієнтацію росту. На підставі наших та інших даних можна зробити висновок про участь полярного транспорту ІОК у гравітропізмі нитчастих структур з апікальним ростом [4].

Перетворення механічної енергії у гравітропний згин пояснюють статолітною дією аміlopластів, яка підтверджена у багатьох працях. Рух і/або тиск аміlopластів у гравітаційному полі передається на елементи цитоскелету, які пересилують сигнал на переносники виходу ауксину на сусідніх мембрanaх.

Особливістю протонеми мохів є те, що градієнт ендогенної ІОК і градієнт Ca^{2+} в апікальних клітинах мають однакову апікально-базальну напрямленість. Якщо врахувати специфіку згину апікальних клітин, яка полягає в тому, що зміна орієнтації росту відбувається внаслідок переміщення зони росту в куполі апікальної клітини, а не диференційного росту, то гіпотези гравітропізму, які розробляються для багатоклітинних органів квіткових рослин, не можна безпосередньо переносити на протонему мохів. Базипетальний транспорт ІОК в

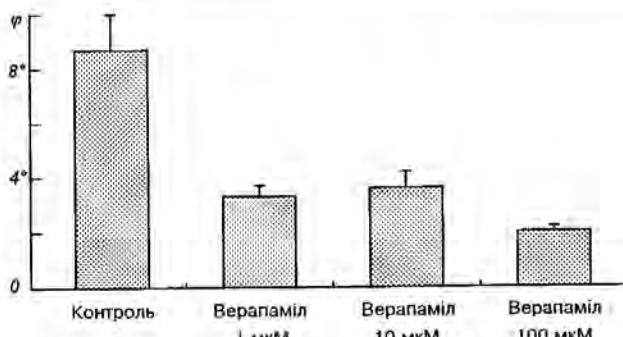


Рис. 4. Вплив верапамілу на гравітропний ріст протонеми *Ceratodon purpureus*

апікальній клітині поляризує її функціонально і с чутливим сенсором до ендогенних змін, у тому числі седиментації амілопластів. Показано, що седиментація амілопластів викликає локальне підвищення Ca^{2+} -АТФаз у зоні їхнього осідання у місцях контакту з ендомембраними [5]. Тому можна допустити, що активація Ca^{2+} -АТФаз буде індукувати зміну осі базипетального транспорту Ca^{2+} і відповідне переміщення Ca^{2+} -каналів на плазматичній мембрani клітини. Базипетальний потік Ca^{2+} буде зміщуватися від його входу в апексі верхівкової клітини.

Зміна полярного транспорту Ca^{2+} відповідним чином відкоректує потік IOK і його наслідком стане зміщення ростової зони. Якщо порушити транспорт ауксину фіtotропінами, то це заблокує ріст і сприйняття гравістимулу. Отже, у гравітропізмі апікальної клітини протонеми домінус поляризаційна, а не ростова функція IOK.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально встановлено, що сприйняття гравістимулу апікальними клітинами може відбуватися при низьких температурах (2°C), однак гравістимул реалізується лише в умовах, сприятливих для росту протонеми (20°C).

2. Низькі концентрації фітогормонів стимулюють вираженість гравістимулу.

3. Реалізація гравітропного згину здійснюється за участю потоків Ca^{2+} : блокатори кальцієвих каналів і кальцієвих помп притічують вираженість гравітропного згину апікальних клітин протонеми (рис. 3, 4, табл.2).

- Демків О. Т., Ситник К. М. Морфогенез архегоніат. — К.: Наук. думка, 1985.—204 с.
- Демків О. Т., Федик Я. Д. Полярність клеточній прони-

цаемости и ее контроль фитохромом // Биофизика.—1977.—22, № 5.—С. 824—828.

- Демків О. Т., Федик Я. Д. Метаболічні градієнти і морфогенез протонеми *Funaria hygrometrica* Hedw. // Укр. ботан. журн.—1972.—29, № 4.—С. 434—438.
- Демків О., Хоркавців Я., Кардаш О. Гормональний контроль розвитку гаметофіту мохів // Праці Наук. Товариства ім. Шевченка.—1999.—3.—С. 39—49.
- Хоркавців О. Я., Демків О. Т., Хоркавців Я. Д. Участь кальцію у гравітропізмі протонеми моху *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb. // Космічна наука і технологія.—2003.—8, № 1.—С. 89—95.
- Busch M. B., Sievers A. Hormone treatment of roots causes not only a reversible loss of starch bud also of structural polarity in statocytes // Planta.—1990.—181.—P. 358—364.
- Chaban Ch. I., Kern V. D., Ripetskyj R. T., et al. Gravitropism in caulonemata of the moss *Pottia intermedia* // J. Bryology.—1998.—20.—P. 287—299.
- Kiss J. Z. The response to gravity is correlated with the number of statoliths in Chara rizoids // Plant Physiol.—1994.—105, N 3.—P. 937—940.
- Kiss J. Z., Hertel L., Sack F. D. Amyloplasts are necessary for full gravitropic sensitivity in roots of *Arabidopsis thaliana* // Planta.—1989.—177, N 2.—P. 198—206.
- Pollard E. C. Theoretical studies on living systems in the absence of mechanical stress // J. Theor. Biol.—1965.—8.—P. 113—123.
- Rose S., Bopp M. Uptake and polar transport of indoleacetic acid in moss rhizoids // Physiol. Plant.—1983.—58.—P. 57—61.
- Rose S., Rubery, Bopp M. The mechanism of auxin uptake and accumulation in moss protonemata // Physiol. Plant.—1983.—58.—P. 52—56.
- Schwuchow J., Michalke W., Hertel R. An auxin transport inhibitor interferes with unicellular gravitropism in protonemata of the moss *Ceratodon purpureus* // Plant Biol.—2001.—N 3.—P. 357—363.

PERCEPTION AND REALIZATION OF GRAVISTIMULATION IN PROTONEMA OF MOSSES

Yu. I. Lesnyak, O. T. Demkiv

The protonema of mosses perceives and realizes gravistimulation by apical cells of stolones. The function of gravireceptors is executed by amyloplasts, which are sedimented on the bottom part of a lateral side under the influence of gravitation. The character of distribution of amyloplasts and dynamics of sedimentation are described for different kinds of mosses. Nevertheless, the processes of transduction of gravistimulation in growth process remain unexplored. It is experimentally shown that in conditions of low temperatures the perception of gravistimulation takes place, but the growth of apical cells is blocked. When gravistimulated protonema are transferred to natural conditions of environment, gravitropic bend is realized. It is established that the realization of gravistimulation can be experimentally blocked by inhibitors: of calcium's canals by verapamils with a concentration of 10^{-4} and 10^{-3} M and calcium's pumps by ortovanadats natriums with a concentration of 10^{-5} to 10^{-4} M. Exogenous phytohormones of indole-3-acetic acid (IAA) and α -naphthyl acetate acid (NAA) with a concentration of 10^{-7} and 10^{-6} M influenced insignificantly growth and gravitropic bend of apical cells of protonema. Nevertheless, phytotropin NPA with a concentration of 10^{-4} oppressed considerably gravitropic-dependent bend and scarcely affected growth rate of apical cells of protonema.

НАШІ АВТОРИ

АНТОНОВА Валентина Антонівна — провідний науковий співробітник Державного підприємства Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, кандидат технічних наук, професор.

Напрям науки — твердотільна електроніка, фізика приладів, елементів і систем.

БОДНАР Олена Миколаївна — інженер Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.

БОРЩОВ В'ячеслав Миколайович — заступник директора з наукової роботи Державного підприємства Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України.

Напрям науки — твердотільна електроніка, фізика приладів, елементів і систем.

ВОЛОШИН В'ячеслав Іванович — директор Державного підприємства «Дніпрокосмос», кандидат технічних наук.

Напрям науки — системи дистанційного зондування Землі та методики обробки космічної інформації; безпека життедіяльності і екологічний моніторинг.



ДЕМКІВ Орест Теодорович — професор кафедри фізіології і екології рослин Львівського національного університету ім. І. Франка, доктор біологічних наук; соросівський професор.

Напрям науки — фізіологія рослин.



ЗАЛЮБОВСЬКИЙ Ілля Іванович — проректор з наукової роботи Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри експериментальної ядерної фізики, член-кореспондент НАНУ, доктор фізико-математичних наук, професор. Лауреат Державної премії України 1971 і 1999 рр., лауреат премії ім. К. Д. Синельникова, лауреат премії ім. Ярослава Мудрого, Заслужений діяч науки і техніки України, кавалер орденів Трудового Червоного Прапора (1976 і 1986 рр.), «За заслуги» III ступеня (1998 р.), «Відмінник освіти України».

Напрям науки — експериментальна ядерна фізика, фізика космічних променів, радіаційна фізика.



ГОКОВ Олександр Михайлович — старший науковий співробітник кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — радіофізичні дослідження нижньої іоносфери, фізика атмосфери і нижньої іоносфери, космічна погода.

ГРИГОРЕНКО Олена Іванівна — завідувач сектору обробки та геофізичного аналізу даних Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Напрям науки — морфологія і динаміка середньоширотної іоносфери, іоносферно-плазмосферна взаємодія, іоносферні ефекти геокосмічних бур.

ГУБАРЄВ В'ячеслав Федорович — заступник директора Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — системний аналіз, теорія оптимальних рішень.

ЗАСУХА Сергій Олексійович — начальник управління Національного космічного агентства України.

Напрям науки — радіотехнічні комплекси та системи.

ІЛЬЄНКО Тетяна Володимирівна — науковий співробітник відділу аналізу перспективних космічних проблем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — системний аналіз, теорія оптимальних рішень.



КАПУСТИН Євген Іванович — перший заступник директора Державного підприємства «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ.

Напрям науки — дистанційне зондування Землі та системи космічної інформації, керування приладами космічних систем з дистанційного зондування Землі.



КАРТАШОВ Віктор Митрофанович — старший науковий співробітник кафедри експериментальної ядерної фізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — експериментальна ядерна фізика, фізика космічних променів, радиаційна фізика.



КИРИЛЛОВА Наталя Анатоліївна — головний програміст Державного підприємства «Дніпрокосмос».

Напрям науки — інформаційні технології в космічних системах, програми керування приладами космічних систем з дистанційного зондування Землі.



КИРИЛЛОВ Олексій Іванович — головний конструктор проекта Державного підприємства «Дніпрокосмос».

Напрям науки — інформаційні технології в космічних системах, програми керування приладами космічних систем з дистанційного зондування Землі.

КІРНОСОВА Маргарита Анатоліївна — головний спеціаліст з інформатики відділу аналізу перспективних космічних проблем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — системний аналіз, теорія оптимальних рішень.



КОВТУН Володимир Євгенович — старший науковий співробітник кафедри експериментальної ядерної фізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Напрям науки — фізика високих енергій, фізика космічних променів, методи ядерно-фізичного експерименту.

КОЗЛОВ Захар Володимирович — інженер Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.

КОЛОС Людмила Миколаївна — молодший науковий співробітник відділу аналізу перспективних космічних проблем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — системний аналіз, теорія оптимальних рішень.



КРИВОДУБСЬКИЙ Валерій Никифорович — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика Сонця і сонячна магнітогідродинаміка, прогнозування сонячної активності.



КУССУЛЬ Наталія Миколаївна — завідувач відділу Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, професор Національного технічного університету України, доктор технічних наук.

Напрям науки — прикладна математика.



ЛАВРЕНЮК Алла Миколаївна — науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доцент Національного технічного університету України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — прикладна математика.



ЛЯЛЬКО Вадим Іванович — директор Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, член-кореспондент НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрям науки — гідрогеологія, дистанційне зондування земної поверхні.



ЛЕБЕДЄВ Олександр Валентинович — аспірант Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Напрям науки — фізика атомного ядра, елементарних частинок і високих енергій.



ЛЕОНОВ Микола Андрійович — начальник відділу інформаційно-аналітичного забезпечення Національного антарктичного наукового центру Міністерства освіти і науки України.

Напрям науки — фізика верхньої атмосфери.



МИНКО Олег Костянтинович — науковий співробітник кафедри експериментальної ядерної фізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, старший викладач.

Напрям науки — фізика космічних променів, ядерна електроніка, методи ядерно-фізичного експерименту.



ОПАЧКО Іван Іванович — застівдувач кафедри електронних систем Ужгородського національного університету, доктор фізико-математичних наук, професор. Відмінник освіти України, член міжнародної спілки професорів Угорщини, віце-президент Закарпатського регіонального відділення Малої академії наук.

Напрям науки — квантова та фізична електроніка, фізика плазми, лазерна фізика і технологія.

ЛЕСНЯК Юрій Іванович — аспірант відділу екоморфогенезу рослин Інституту екології Карпат Національної академії наук України.

Напрям науки — фізіологія рослин.

ЛИСТРАТЕНКО Олександр Михайлович — начальник відділу Державного підприємства Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, кандидат технічних наук.

Напрям науки — твердотільна електроніка, фізика приладів, елементів і систем.

ЛОБУНЕЦЬ Олександр Георгійович — інженер-програміст Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, магістр Національного технічного університету України.

Напрям науки — прикладна математика.

ПАЗЮРА Сергій Олександрович — молодший науковий співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Напрям науки — фізика іоносфери, сонечно-земні зв'язки.

ПІДГОРОДЕЦЬКА Людмила Володимирівна — молодший науковий співробітник відділу аналізу перспективних космічних проблем Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — системний аналіз, теорія оптимальних рішень.

САМОЙЛЕНКО Людмила Іванівна — завідувачка відділу Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрям науки — системний аналіз, теорія оптимальних рішень.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч — провідний науковий співробітник Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат геологомінералогічних наук.

Напрям науки — гідрогеологія, дослідження процесів енергомасообміну в геосистемах методами математичного моделювання, обробка даних космічної зйомки з метою вирішення природоохоронних та природоресурсних задач.

СИБІРЦЕВА Оксана Миколаївна — провідний інженер Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — математичне моделювання та методи обробки даних дистанційного зондування Землі.



СКАКУН Сергій Васильович — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, магістр Національного технічного університету України.

Напрям науки — прикладна математика.

СЛИВИНСЬКИЙ Володимир Іванович — головний науковий співробітник Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», доктор технічних наук.

Напрям науки — вироби із полімерних матеріалів.

СЛИВИНСЬКИЙ Михайло Володимирович — заступник начальника відділення Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування».

Напрям науки — вироби із полімерних матеріалів.



СТАНКЕВИЧ Сергій Арсенійович — провідний науковий співробітник Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат технічних наук, доцент.

Напрям науки — оцінка інформативності оптико-електронних систем ДЗЗ, цифрова обробка та інтерпретація матеріалів аерокосмічного моніторингу.

ТАРАН Віталій Іванович — директор Інституту юносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрям науки — метод некогерентного розсіювання, високопотенціальні радари некогерентного розсіювання, фізика юносфери у збудженному стані.

ТИМЧУК Ігор Трохимович — науковий співробітник Державного підприємства Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування.

Напрям науки — твердотільна електроніка, фізика приладів, елементів і систем.



ТИРНОВ Олег Федорович — завідувач кафедри Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, кандидат фізико-математичних наук, професор, лауреат Державної премії УРСР.

Напрям науки — радіофізичні дослідження юносфери, фізика верхньої юносфери Землі.

ФЕДОРОВСЬКИЙ Олександр Дмитрович — завідувач відділу системного аналізу Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор. Диплом ім. Ю. Гагаріна.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.



ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович — професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, доктор фізико-математичних наук, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки.

Напрям науки — космічна радіофізика, фізика та екологія геокосмосу, космічна погодя.



ШЕЛЕСТОВ Андрій Юрійович — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, доцент Національного технічного університету України, Національного авіаційного університету, кандидат технічних наук.

Напрям науки — прикладна математика.



ШИМАТКО Євген Степанович — доцент кафедри Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, заступник завідувача кафедри експериментальної ядерної фізики, кандидат фізико-математичних наук, лауреат Державної премії України 1971 р.

Напрям науки — експериментальна ядерна фізика, фізика космічних променів, радіаційна фізика.

ШПОРТЮК Зіновія Михайлівна — старший науковий співробітник Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — математичне моделювання процесів енергомасообміну в геосистемах, методи обробки даних дистанційного зондування Землі.

ЯКИМЧУК Владислав Григорович — головний науковий співробітник Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.