

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

ІСТОРІЯ - АКТУАЛЬНІСТЬ

ДОСЛІДЖЕННЯ

Академічні публікації та реферати з космічної науки та технологій

КИЇВ

АРХІВ 10, № 1, 2004

KYIV

ЗМІСТ

Григоренко Е. І., Лысенко В. Н., Пазюра С. А., Таран В. І., Черногор Л. Ф. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года

Григоренко Е. И., Пазюра С. А., Пуляев В. А., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Динамические процессы в ионосфере во время геокосмической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 года

Кузнецов Е. И., Зубко В. П., Заяць С. В. Міжнародна координація діяльності з супутникового спостереження Землі

Rekha Agarwal Mishra, Rajesh K. Mishra Semi-diurnal variation in cosmic ray intensity under different geomagnetic conditions

Белокриницкая Л. М., Белявский А. В., Крученый Г. М. Українська національна система моніторинга УФ-Б-радіації

Драновський В. І., Закржевський А. Е., Хорошилов В. С. Динамика деформируемой космической системы тел с программно изменяемой конфигурацией

CONTENTS

- 4 *Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Paziura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. Anomalous ionospheric storm on 21 March 2003*
- 12 *Grigorenko Ye. I., Paziura S. A., Puliaiev V. A., Taran V. I., Chernogor L. F. Dynamic processes in the ionosphere during the geospace storm on 30 May and solar eclipse on 31 May 2003*
- 26 *Kuznetsov E. I., Zubko V. P., Zaiats S. V. International activity coordination of satellite Earth observations*
- 35 *Pexa Agarwal Mishra, Radjesh K. Mishra Півдбова варіація інтенсивності космічних променів у різних геомагнітних умовах*
- 41 *Belokräničskaya L. M., Belyavsky A. V., Kruchenitsky G. M. Ukrainian National system of UV-B irradiance monitoring*
- 45 *Dranovskiy V. I., Zakrzhevskiy A. E., Khoroshylow V. S. Dynamics of a deformed space system of bodies with programmed change of the configuration*

- Федоровский А. Д., Артиушенко М. В., Козлов З. В. Параметрический синтез космических систем зондирования Земли на основе генетического метода: постановка задачи и пути решения*
- Шатихін В. Є., Семенов Л. П., Артеменко Ю. Г., Борисенко В. М., Геленко О. О. Коливання, викликані пружними виносними елементами конструкції космічного апарату*
- Хода О. А. Центр анализа GPS-даних в ГАО НАН України: тестові результати*
- Абросимов В. М., Кovalчук А. Н., Малевинський С. В., Пнігин Г. І., Савченко В. В., Шульга А. В. Изучение объектов в ближнем космосе с помощью телескопа АЗТ-8, оснащенного ПЗС-камерой*
- Овсяников В. В., Попель В. М., Ольшевский А. Л., Попель П. В. Компактный антенный полигон для экспериментальной отработки антенн космических аппаратов*
- Міщенко Л. Т., Савенков С. М., Оберемок Є. А. Застосування лазерної мюллера-полариметрії для дослідження здорових та вірусінфікованих рослин пшениці сорту Апогей, вирощених за умов модельованої мікрогравітації*
- Мурадян Х. К., Тимченко А. Н., Утко Н. А., Бадова Т. А., Безруков В. В. Терморегуляция, дыхательный коэффициент и активность ключевых ферментов антиоксидантной системы в печени и миокарде крыс при остром гипергравитационном стрессе*

ЮВІЛЕЙ

НАШІ АВТОРИ

НОВИНИ КОСМІЧНИХ АГЕНТСТВ СВІТУ

- 54** *Fedorovskyi A. D., Artiushenko M. V., Kozlov Z. V. Parametric synthesis of space systems for remote sensing of the Earth on the basis of the genetic method*
- 61** *Shatikhin V. Ye., Semenov L. P., Artemenko Yu. H., Borysenko V. M., Helenko O. O. Oscillations caused by flexible attached elements of satellite constructions*
- 70** *Khoda O. The GPS data analysis centre in the Main Astronomical Observatory: Test results*
- 79** *Abrosimov V. M., Kovalchuk A. N., Malevinskii S. V., Pinigin G. I., Savchenko V. V., Shulga A. V. Investigation of near-Earth space objects by the use of the telescope AZT-8 with a CCD camera*
- 85** *Ovsyanikov V. V., Popel' V. M., Ol'shevskiy A. L., Popel' P. V. The compact antenna range for experimental improvement of space vehicles antennas*
- 91** *Mishchenko L. T., Savenkov S. M., Oberemok Ye. A. Application of laser Mueller-polarimetry to the investigation of healthy and infected by the wheat streak mosaic virus Apogee variety wheat grown under simulated microgravity conditions*
- 99** *Muradian Kh. K., Timchenko A. N., Utko N. A., Badova T. A., Bezrukov V. V. Thermoregulation, respiration quotient and key antioxidant enzyme activities in the liver and heart of rats under hypergravity stress*

105 JUBILEES

111 OUR AUTHORS

116 NEWS FROM SPACE AGENCIES

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, В. Н. Лысенко¹, С. А. Пазюра¹,
В. И. Таран¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери НАНУ і МОНУ, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года

Надійшла до редакції 15.10.03

Наведено результати дослідження двофазної іоносферної бурі 20—21 березня 2003 р., найсильнішу негативну фазу якої можна віднести до аномальної, оскільки вона протікала на фоні помірного збурення геомагнітного поля ($A_p = 29$, $K_p = 5$). Особлива увага приділена діагностиці процесів, що супроводжували зміну фаз бурі, які відбулися в період заходу Сонця протягом 17:00—18:00 УТ. Докладно розглянуті механізми формування глибокого негативного іоносферного збурення.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосферная буря проявляется как глобальное возмущение параметров ионосферы, вызываемое геомагнитной бурей. Вследствие многообразия характера взаимодействия различных процессов в гекосмосе каждая буря индивидуальна, и прогнозировать ее развитие сложно. Изучение каждой бури дает новую информацию для понимания формирующих ее процессов. Большинами возможностями в их диагностике располагают радары некогерентного рассеяния (НР), позволяющие проводить комплексные исследования параметров ионосферной плазмы в широком диапазоне высот.

Целью работы является изучение двухфазной ионосферной бури 20—21 марта 2003 г., сильнейшую отрицательную фазу которой можно отнести к аномальной, поскольку она протекала на фоне умеренного возмущения геомагнитного поля ($A_p = 29$, $K_p = 5$). Измерения проводились на харьковском радаре НР 19—23 марта в соответствии с международным календарем координированных наблюдений методом НР по программе Storms/TIMED/LTCS. Радар работал в режиме двухимпульсного зондирования, в диапазоне высот 100—550 км с высотным разрешением около 10 км. Подробное описание радара и режимов его работы даны в работе [8].

© Е. И. ГРИГОРЕНКО, В. Н. ЛЫСЕНКО, С. А. ПАЗЮРА,
В. И. ТАРАН, Л. Ф. ЧЕРНОГОР, 2004

Представлены результаты исследования динамических процессов в ионосфере, сопровождавших смену фаз бури. Ценность этих результатов определяется тем, что вопрос о характере чередования фаз бури изучен мало из-за недостатка наблюдательных данных. Подробно рассмотрены механизмы, контролирующие начало и развитие глубокого отрицательного ионосферного возмущения. Буря сопровождалась генерацией волновых возмущений в ионосфере. Исследованы также ионосферные возмущения, связанные с проникновением в средние широты магнитосферных электрических полей.

Результаты настоящей работы кратко описаны в работе [3].

СОСТОЯНИЕ ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Магнитной буре предшествовала серия интенсивных рентгеновских вспышек на Солнце, которые сопровождались выбросами корональной массы, но геoeffективность возмущений на Солнце была невысокой. Их результатом явилась умеренная (по классификации [9]) магнитная буря 20—21 марта 2003 г. с индексами $A_p = 21$ и 29 , $K_p = 5$, $D_{st} = -57$ нТл. Буря началась внезапно 20 марта около 04:00 (здесь и далее UT). Начальной фазе соответствовало увеличение индекса D_{st} , который характе-

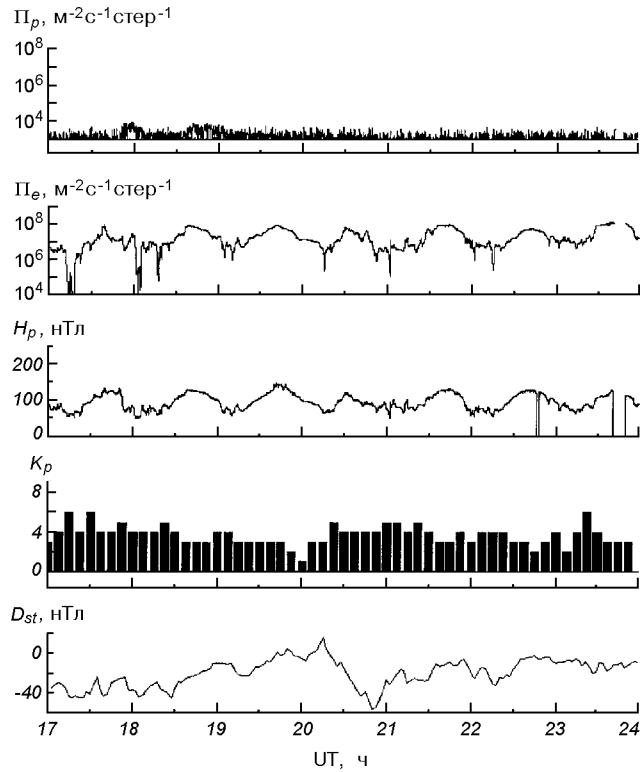


Рис. 1. Временные вариации потоков протонов (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов (ИСЗ GOES-12), H_p -составляющей геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), K_p - (Air Force Weather Agency) и D_{st} -индексов (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) в период 17–23 марта 2003 г. [<http://solar.sec.noaa.gov/weekly>]

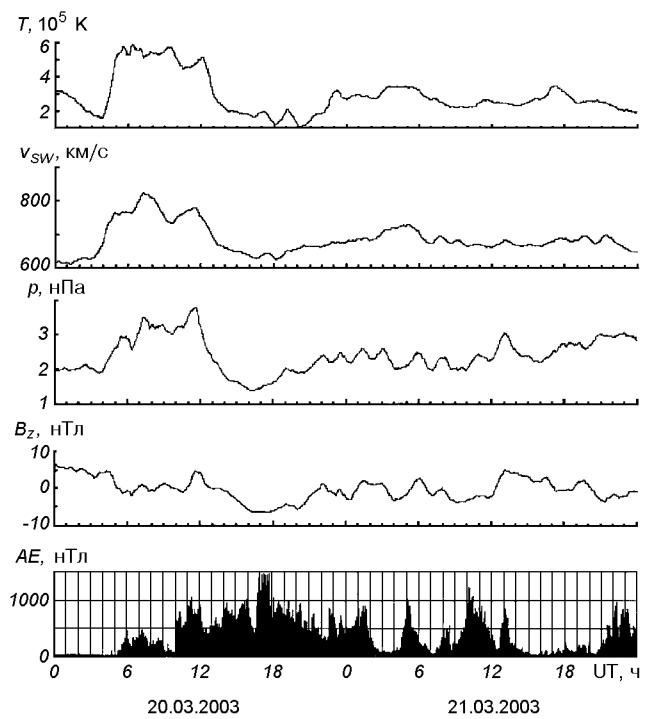


Рис. 2. Временные вариации параметров солнечного ветра: температуры T , радиальной скорости v_{sw} и динамического давления ρ (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor); а также составляющей B_z межпланетного магнитного поля (ACE Satellite — Magnetometer) и AE -индекса 20–21 марта 2003 г. (WDC Kyoto)

ризует изменения магнитного поля на Земле, от -1 нТл в 03:00 до 15 нТл в 06:00, после чего началась главная фаза бури с понижением D_{st} до -57 нТл в 20:00, а затем фаза восстановления с постепенным нарастанием D_{st} до конца цикла измерений. Началу бури предшествовал скачок параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП), в том числе рост скорости СВ от ~ 600 км/с до максимальной величины более 800 км/с. Этот поток СВ, сжимающий магнитосферу, ответственен за начальную фазу магнитной бури. Вскоре после начала бури произошел поворот вектора ММП к югу с максимальным отклонением B_z около -6 нТл после 16:00. С вариациями B_z и D_{st} коррелировали значения аврорального индекса AE . Они достигли значения 1500 нТл 20 марта около 18:00 и характеризовали усиление авроральных электроструй во время последовательности суббурь. Солнечная активность

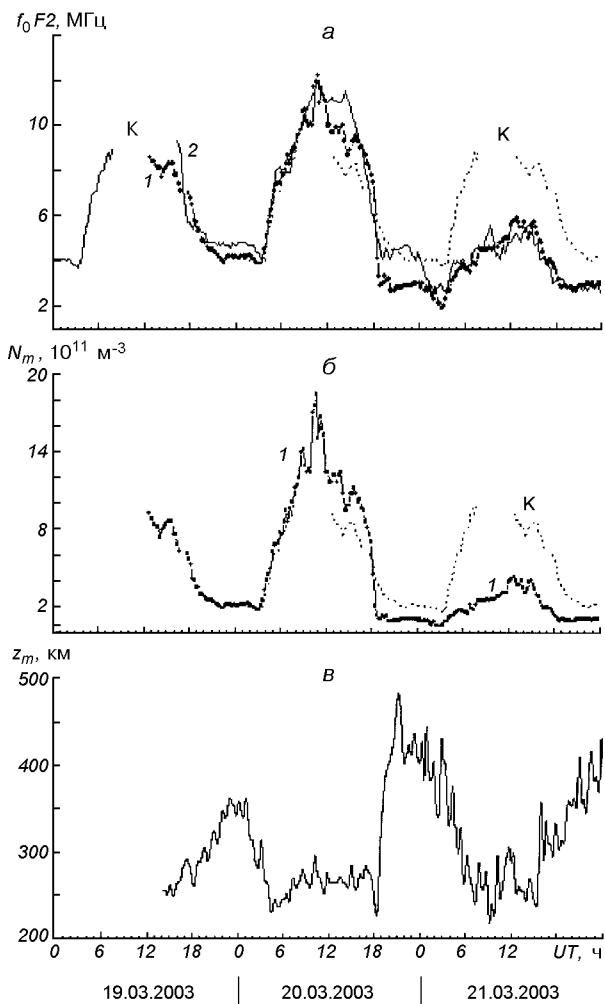
(СА) в период измерений была средней: индекс $F_{10.7}$ изменялся от 108 до 89 ед., среднемесячное значение $F_{10.7}$ составляло около 132 ед. Основные параметры геокосмической обстановки приведены на рис. 1 и 2. Ежедневные данные об активности Солнца и потоках частиц, полученные из интернета (<http://solar.sec.noaa.gov/weekly>), приведены в табл. 1 и 2.

МОРФОЛОГИЯ ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ

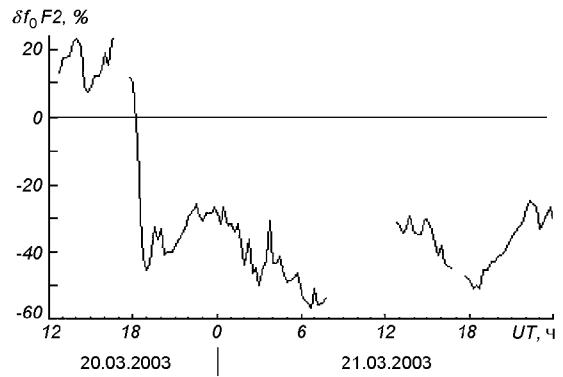
Магнитная буря вызвала двухфазную ионосферную бурю. Положительная фаза носила характер длительного (примерно в течение 6 ч) возмущения с наибольшим отклонением δf_0F2 около $+20\%$ (см. рис. 4). Смена фаз произошла в течение 17:00–18:00. Отрицательная фаза была более интенсивной, максимальное отклонение δf_0F2 составило -60% , ее

Таблица 1. Данные о солнечной активности

Дата Март 2003 г.	$F_{10.7}$	Число солнечных пятен	Площадь солнечных пятен (10^{-6})	Рентгеновский фон	Количество рентгеновских вспышек			Количество оптических вспышек				
					C	M	X	S	1	2	3	4
17	125	80	1080	B 3.0	6	0	1	2	1	0	0	0
18	118	64	1010	B 4.2	10	2	1	5	4	1	0	0
19	108	53	650	B 3.6	16	4	0	6	2	2	0	0
20	97	45	400	B 2.1	1	1	0	1	1	0	0	0
21	91	40	200	B 1.6	2	0	0	0	0	0	0	0
22	89	40	70	B 1.4	3	0	0	0	0	0	0	0
23	93	43	110	B 1.3	2	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 3. Вариации значений f_0F2 , N_m и z_m 19—21 марта в Харькове (1), Сан-Вито (2) и в контрольный день 19 марта — Сан-Вито и Харьков (K)Таблица 2. Данные о потоках протонов и электронов с энергиями E_p и E_e

Дата, март 2003 г.	Потоки протонов, $10^7 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ стер}^{-1}$			Потоки электронов, $10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ стер}^{-1}$
	$E_p > 1$ МэВ	> 10 МэВ	> 100 МэВ	
17	2300	15	2.3	0.84
18	4000	22	2.4	1.9
19	2800	15	2.4	2.2
20	3400	12	2.1	1.3
21	7000	11	2.4	2.5
22	8400	12	2.7	1.6
23	5500	12	2.7	3.5

Рис. 4. Вариации отклонения критической частоты δf_0F2 в течение двухфазной ионосферной бури 20/21 марта 2003 г.

запаздывание относительно начала магнитной бури составило около 14 ч. На рис. 3, а показаны вариации критических частот f_0F2 , полученных из ионограмм станции вертикального зондирования «Базис» в Харькове и станции в Сан-Вито (географические координаты: 40° N, 17° E). Последние привлечены для выбора контрольных (невозмущенных) суток (19 марта). В Харькове в течение

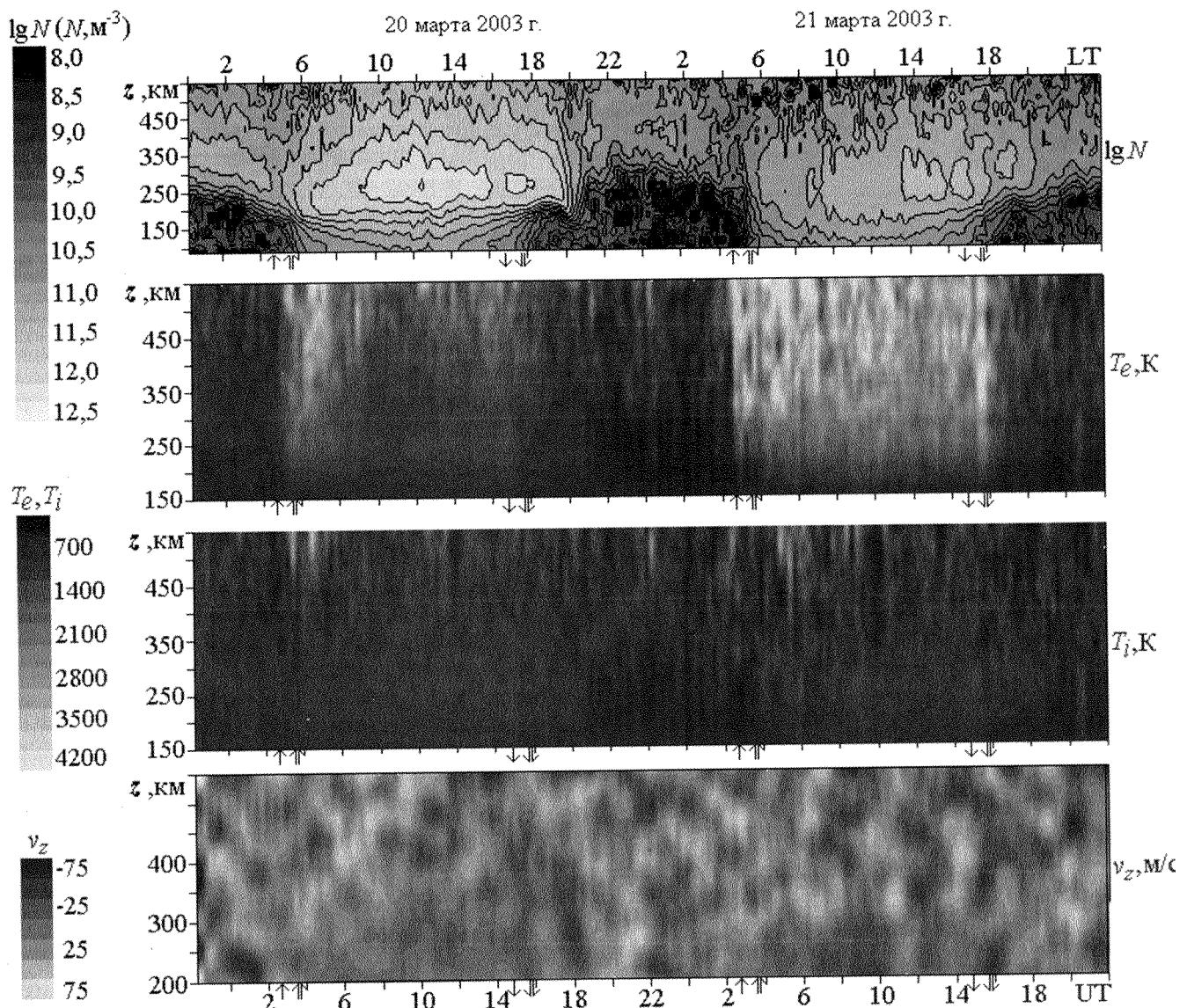


Рис. 5. Вариации параметров ионосфера 20/21 марта 2003 г. по данным харьковского радара НР. Панели сверху вниз: логарифм концентрации электронов ($\lg N$); температуры электронов T_e и ионов T_i ; вертикальная составляющая скорости переноса плазмы v_z

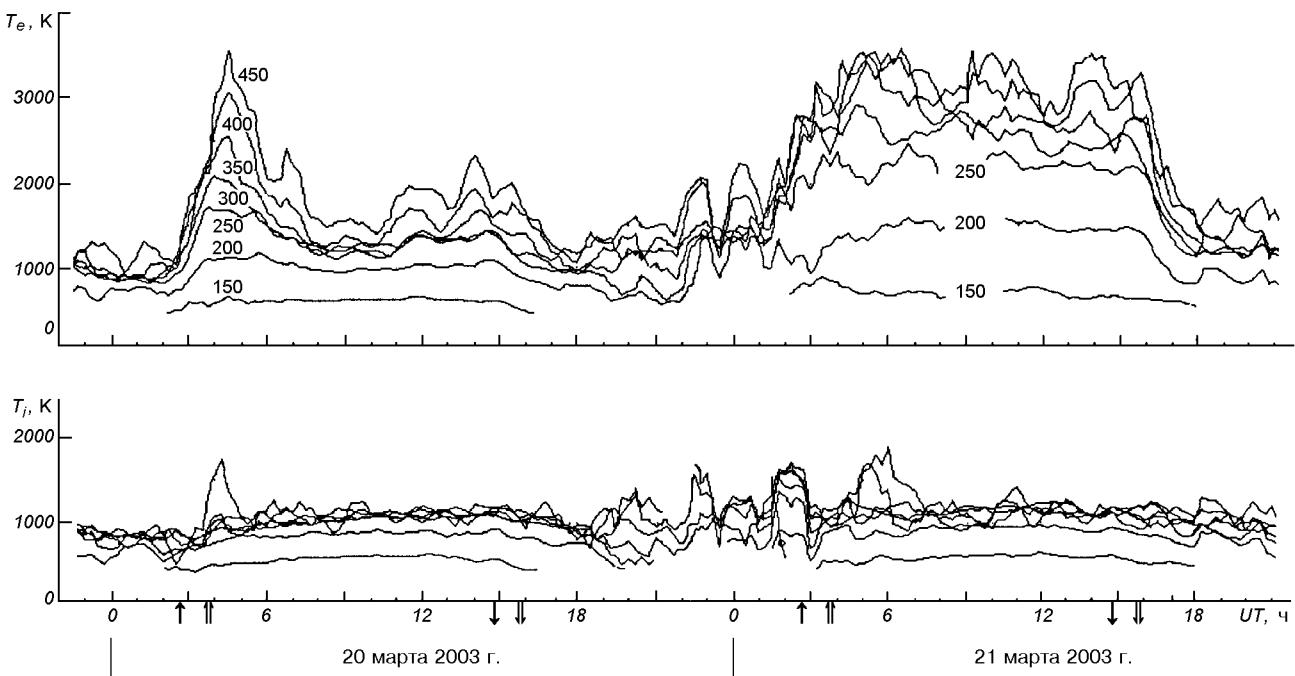


Рис. 6. Температуры T_e и T_i 20/21 марта 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

отрицательной фазы бури электронная концентрация N_m в максимуме области F уменьшилась примерно в 2—5 раз (рис. 3, б и 5). Рис. 5 дает наглядную картину поведения основных параметров ионосферы в диапазоне высот 100—550 км во время бури. Рис. 4 иллюстрирует вариации отклонения критической частоты δf_0F2 в течение двухфазной ионосферной бури 20—21 марта 2003 г. (по сравнению с контрольным днем 19 марта).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Положительная фаза сопровождалась увеличением f_0F2 на 1.6 МГц, что соответствовало увеличению N_mF2 примерно в 1.5 раза (рис. 3, б и 5). При этом высота максимума слоя z_mF2 возросла по сравнению с контрольным днем 19 марта (по данным харьковского радара) примерно на 40 км (рис. 3, в). Температура электронов на высоте 300 км в 14:00 составляла $T_e = 1300$ К, тогда как в спокойный день $T_e = 1700$ К. Значения температуры ионов $T_i = 1000\ldots1050$ К практически совпадали в возмущенные и контрольные сутки (рис. 5 и 6).

Отрицательная фаза началась 20 марта около 18:00 и интенсивно развивалась в течение 21 марта и первой половины дня 22 марта. Максимальное

уменьшение f_0F2 по сравнению с контрольным днем наблюдалось 21 марта около 07:00 и составило 5.1 МГц, что соответствовало уменьшению N_mF2 в 5.3 раза (рис. 3, б и 5). Уменьшение N отмечалось во всем диапазоне высот 100—550 км. На рис. 3, в приведены временные вариации высоты z_mF2 . С 14:00 19 марта и почти до полудня 20 марта поведение z_mF2 было характерным для слабо возмущенной среднеширотной ионосферы: ночью значения $z_mF2 \approx 340\ldots350$ км превышали дневные значения, равные примерно 250 км.

В возмущенные дни 20—21 марта наблюдалось увеличение z_mF2 по сравнению с контрольным периодом 19—20 марта примерно на 100—130 км около местной полуночи и на 100 км вблизи восхода Солнца. В спокойный день в 14:00 на высоте 300 км $T_e = 1700$ К, в отрицательную фазу бури (21 марта) $T_e = 2400$ К. Значения температуры ионов $T_i = 1000\ldots1050$ К практически совпадали с контрольным днем (рис. 5 и 6).

ОБСУЖДЕНИЕ

Положительная фаза наблюданной бури относится к категории Long Duration Positive Storm Effects [11]. Физические механизмы, которые поддержи-

вают длительную положительную фазу, и особенности ее проявления изучены недостаточно. В свете современных представлений возможны следующие причины положительных возмущений [4, 5, 11]. Одной из них может быть дрейф слоя F2 вверх, в область более низкой рекомбинации, за счет усиления меридиональных ветров, направленных к экватору. Усиление ветра происходит в результате крупномасштабных возмущений термосферной циркуляции, связанных с высокоширотным нагревом термосферы (в авроральной зоне) [4, 7]. Другим механизмом может быть изменение состава нейтральной атмосферы, которое в отличие от отрицательной фазы протекает с увеличением содержания атомарного кислорода и отношения $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$ за счет возмущения термосферной циркуляции, приводящего к оседанию легких компонентов газа в низких и средних широтах. Согласно работе [18] первый механизм наиболее эффективен в дневное время, когда интенсивно протекают процессы ионообразования, тогда как роль второго механизма более существенна ночью. Значительный вклад в положительную фазу может вносить также высыпание мягких частиц с энергиями $E \leq 1$ кэВ в область дневного каспа, где они поглощаются на высотах области F (200–300 км), вызывают ее разогрев и меридиональную циркуляцию, которая переносит газ, обогащенный атомарным кислородом, к экватору [5]. Взаимодействие этих механизмов, связанных с двумя разными каналами передачи энергии солнечного ветра в полярную ионосферу, может создавать большое разнообразие ионосферных бурь.

Рассмотрена возможность реализации первого механизма в нашем случае, т. е. дрейфа слоя F2 вверх за счет усиления меридионального ветра к экватору. Сравнение результатов измерений с данными для спокойных суток, в качестве которых выбраны сутки 22–23 сентября 1998 г. [13] с близкими гелиогеофизическими параметрами (равноденствие, средняя солнечная активность, но на восходящей ветви 23-го солнечного цикла), показало разные значения v_z : -13 м/с во время возмущения на высоте 300 км около полудня 20 марта 2003 г. и -25 м/с на этой же высоте в спокойный день 22–23 сентября 1998 г. Если допустить, что в течение умеренной магнитной бури дополнительные электрические поля в средних широтах были незначительными, а также пренебречь изменением нейтрального состава при $A_p = 21$, тогда из v_z можно получить, что во время возмущения меридиональная составляющая скорости ветра v_{nx} увеличилась примерно на 30 м/с. Это привело к увеличению высоты $z_m F2$ примерно на 50 км. Эти оценки

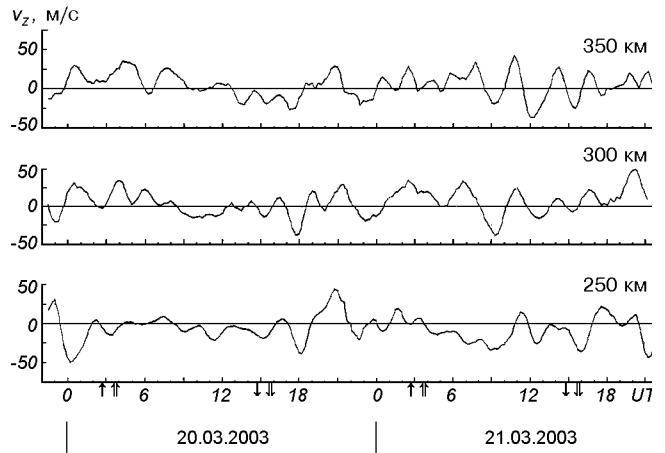


Рис. 7. Вариации скорости v_z во время бури (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

блики к результатам эксперимента: $z_m F2$ имела значения около 280 и 240 км в возмущенный и спокойный день соответственно.

Отрицательная фаза относится к числу аномальных, поскольку она сопровождалась уменьшением в 2–5 раз электронной концентрации N на фоне магнитного возмущения умеренной интенсивности. Исследования показали, что модель MSIS-86 не может объяснить столь заметное уменьшение $N_m F2$ только за счет изменения нейтрального состава так же, как и во время бури 25 сентября 1998 г. [13]. Возможные механизмы формирования отрицательного возмущения ионосферы рассмотрены ниже.

Процессы, сопровождавшие смену фаз бури. Смена фаз бури произошла примерно с 17:00 до 18:00. Метод НР позволяет осуществить диагностику этого явления на основе рассмотрения сопутствующих процессов. Анализ показал, что смена фаз сопровождалась быстрым уменьшением высоты $z_m F2$ на 50 км, а затем увеличением почти на 200 км. Уменьшение $z_m F2$, по-видимому, могло быть связано с усилением поля над Харьковом при значении зональной составляющей $E_y \approx -15$ мВ/м, направленной на запад [1, 14, 15]. Увеличение $z_m F2$ могли вызвать следующие причины. Одна из них — регулярное обращение меридионального термосферного ветра v_{nx} к экватору в заходный период, аналогично спокойным условиям [1, 6]. Сравнение с контрольными датами [13] показало, что оно дало увеличение $z_m F2$ на 50 км, которое обеспечила скорость $w = 32$ м/с при значении меридиональной

составляющей $v_{nx} \approx 90$ м/с (здесь w — суммарная скорость вертикального переноса плазмы за счет ветрового увлечения и электромагнитного дрейфа). Вторым фактором остается дополнительное усиление ветра v_{nx} примерно на 30 м/с, которое произошло в предшествующие часы и явилось одной из обсуждавшихся причин начальной, положительной фазы бури. Оно дало увеличение высоты z_mF2 еще на 50 км. Оставшийся подъем слоя F2 примерно на 100 км мог быть вызван увеличением скорости w за счет электромагнитного дрейфа $v_{\perp z}$. Оценки дали значение $v_{\perp z} \approx 60$ м/с, при этом зональная составляющая поля над Харьковом должна была иметь значение $E_y \approx 15...20$ мВ/м [1]. Итак, перепад высоты z_mF2 вниз на 50 км, а затем вверх на 200 км мог быть связан с проникновением магнитосферного поля в средние широты с зональной составляющей, изменяющей направление с запада на восток и имеющей значения -15 мВ/м и $+15...+20$ мВ/м. При этом вариации z_mF2 коррелировали с изменениями скорости v_z от -40 м/с до $+20$ м/с на высоте 300 км (рис. 7, данные усреднены) в течение 17:00—19:00. Эффект, очевидно, был вызван импульсом магнитосферного электрического поля во время суббури, которая сопровождалась увеличением индекса AE в 17:00 и затем спадом его около 18:00 (рис. 2). При $AE = 1200...1500$ нТл усиление поля в высоких широтах составило $E \approx 80...100$ мВ/м [6, 7]. Такое поле, проникнув в средние широты, могло достичь там рассчитанной величины $|E_y| \approx 15 ... 20$ мВ/м и внести изменения в z_mF2 .

Процессы, контролирующие начало и развитие отрицательного возмущения. Смена фаз бури произошла в заходный период, когда в спокойный день 19 марта в течение 17:00—18:00 критическая частота f_0F2 уменьшилась от 7.1 до 6.5 МГц, т. е. на 0.6 МГц. В возмущенный день 20 марта f_0F2 уменьшилась от 8.3 до 6.0 МГц, т. е. на 2.3 МГц. При этом уменьшение f_0F2 сопровождалось необычным уменьшением высоты z_mF2 на 50 км в течение одного часа. Именно оно могло положить начало отрицательной бури, вызвав уменьшение N в 1.9 раза за счет увеличения скорости рекомбинации при снижении высоты слоя, на который наложилось завершение процессов ионообразования в заходный период. После резкого увеличения z_mF2 на 200 км процесс падения N нарастал, достигнув значения около 5 раз в утренние (с 06:00) и дневные часы 21 марта. Увеличению интенсивности отрицательной бури, по-видимому, способствовали эффекты высокоширотного джоулева нагрева атмосферы, вы-

званного магнитной бурей. Таких эффектов два: перестройка глобальной термосферной циркуляции и изменение нейтрального состава [4, 7, 10, 21]. Возмущенная циркуляция обычно формирует раннюю, положительную fazу бури, если магнитная буря начинается днем, как в нашем случае [11]. Перестройка состава происходит под действием возмущенной циркуляции и начинается позже. Она сопровождается повышением содержания молекулярных компонентов термосферы $N(N_2)$ и $N(O_2)$ в высоких и средних широтах, что увеличивает коэффициент рекомбинации, ускоряет потери ионов O^+ и способствует дальнейшему углублению отрицательной бури в ночное время.

С восходом Солнца 21 марта на фоне низких значений N и малой теплопередачи от электронов к ионам, которая пропорциональна N^2 , происходил быстрый нагрев плазмы. Температура электронов к 05:00 достигла дневных значений $T_e = 2000...3500$ К на высотах 250...450 км. При таких условиях в дневное время включается еще один механизм — колебательного возбуждения молекул N_2 [11, 16, 17, 19—21], который становится существенным при значениях $T_e \geq 1500$ К [1, 2, 20, 22]. Увеличивается вклад этих молекул в увеличение коэффициента рекомбинации, что ведет к развитию глубокой депрессии N на высотах F-области, наибольшего значения она достигла в предполуденные часы.

выводы

Приведены результаты исследования двухфазной ионосферной бури 20—21 марта 2003 г. Показано, что возможной причиной быстрой смены фаз бури явился импульс электрического поля над Харьковом с составляющей $E_y \approx \mp 15$ мВ/м, связанный с проникновением магнитосферного электрического поля в средние широты во время суббури с индексом $AE = 1200...1500$ нТл. Импульс электрического поля над Харьковом, по-видимому, вызвал необычное в заходный период уменьшение высоты z_mF2 на 50 км и внес вклад в последовавший быстрый подъем слоя F2 на 200 км. В последнем событии на эффект поля наложились регулярное обращение меридионального термосферного ветра v_{nx} к экватору в заходный период и дополнительное увеличение v_{nx} за счет высокоширотного джоулева нагрева атмосферы во время магнитной бури. Показано, что уменьшение электронной концентрации N за счет уменьшения высоты z_mF2 при смене фаз могло положить начало аномальной отрицательной ионосферной бури. Дальнейшее развитие депрессии N

было связано с изменением нейтрального состава в ночное время, к которому с восходом Солнца и увеличением температуры T_e до 2000...3500 К добавился вклад колебательно-возбужденных молекул N_2 в увеличение скорости рекомбинации. Особенностью данной бури были также квазипериодические колебания высоты $z_m F2$, коррелирующие с вариациями скорости v_z (см. также [12]).

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1987.—528 с.
2. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИЭР.—1969.—57, № 3. —С. 6—30.
3. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 г. // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тез. — Кацивели, Крым, 2003.—С. 113.
4. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия.—1985.—25, № 5.—С. 705—721.
5. Данилов А. Д., Морозова Л. Д., Миркович Э. Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэрономия.—1985.—25, № 5.—С. 768—772.
6. Кринберг И. А., Ташилин А. В. Ионосфера и плазмосфера. — М.: Наука, 1984.—189 с.
7. Серебряков Б. Е. Исследование процессов в термосфере во время магнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия.—1982.—22, № 5.—С. 776—781.
8. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
9. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
10. 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.
11. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms — a Review // Space Sci. Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
12. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Ionospheric wave-like disturbances (WLD) following the September 23, 1998 solar flare from Kharkiv incoherent scatter radar observations // 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 2002a. P. 2278.
13. 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 2002b. P. 2280.
14. 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. 26359—26366.
15. Foster J. C., Rich F. J. Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 26367—26372.
16. Mikhailov A. V., Fürster 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.
17. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime Thermosphere Above Millstone Hill During Severe Geomagnetic Storms // J. Geophys. Res.—1997.—102.—P. 17275—17282.
18. Mikhailov A. V., Skoblin M. G., Fürster M. Daytime F2-layer positive storm effect at middle and lower latitudes // Ann. Geophys.—1995.—13.—P. 532—540.
19. 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.
20. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., et al. 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.
21. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., et al. Ionospheric Effects of the March 1990 Magnetic Storm: Comparison of Theory and Measurement // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A12.—P. 23359—23365.
22. 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.

ANOMALOUS IONOSPHERIC STORM ON 21 MARCH 2003

Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko, S. A. Paziura,
V. I. Taran, L. F. Chernogor

Our results of the study of the two-phase ionospheric storm in 20—21 March 2003 are presented. The strongest negative phase of the storm can be considered as anomalous one because it was proceeding on the background of moderate geomagnetic disturbance ($A_p = 29$, $K_p = 5$). Special attention is paid to the diagnostic of processes accompanying the change of storm phase that occurred during sunset period (17:00—18:00 UT). The mechanisms forming a deep negative ionospheric disturbance are discussed in detail.

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9:520.86

Е. И. Григоренко¹, С. А. Пазюра¹, В. А. Пуляев¹,
В. И. Таран¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери НАНУ і МОНУ, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків

Динамические процессы в ионосфере
во время геокосмической бури 30 мая
и затмения Солнца 31 мая 2003 года

Надійшла до редакції 15.10.03

Наведено результати дослідження відгуку області F і зовнішньої іоносфери на надпотужну магнітну бурю 29—31 травня 2003 р. (максимальний індекс $K_p = 8$). Спостереження проведено за допомогою радара некогерентного розсіяння в Харкові. Зареєстровано глибоке падіння електронної концентрації, підйом висоти максимуму шару F2, незвичайно сильний нагрів плазми, зменшення відносної концентрації іонів водню в головну фазу бурі, зміна процесів іоносферно-магнітосферної взаємодії. Геокосмічна буря супроводжувалася також генерацією хвильових збурень в іоносфері. Розглянуто особливості реакції іоносфери на часткове (73 %) затмінення Сонця 31 травня 2003 р., що відбувалось після сходу Сонця на фоні відновлюальної фази магнітної бури. Показано, що під час затмінення відбувалася короткочасна (2—3 г) перебудова іоносфери до нічних умов. Досліджені також ефекти магнітного збурення, сонячного спалаху й особливості поведінки іоносфери у період після сходу Сонця, що накладалися на реакцію іоносфери на затмінення Сонця.

ВВЕДЕНИЕ

Расположение харьковского радара некогерентного рассеяния (геомагнитная широта 45.7° , $L = 1.9$) дает возможность исследовать эффекты, связанные с процессами ионосферно-магнитосферного взаимодействия глубоко во внутренней плазмосфере. Эти эффекты становятся значительными во время сильных геокосмических возмущений, которые охватывают не только высокие широты, но проникают также в густонаселенные средние широты, дестабилизируя технологическую деятельность человека и воздействуя на его здоровье. С помощью харьковского радара некогерентного рассеяния (НР) метрового диапазона (158 МГц) на протяжении почти трех циклов солнечной активности проводится изучение ионосферы в зависимости от состояния космической погоды. Исследования отклика слоя F2 и внешней ионосферы на сверхсильную магнитную бурю 29—31 мая 2003 г. (максимальный индекс $K_p = 8$) выполнено на харьковском радаре 30—31

мая в соответствии с международным календарем координированных наблюдений методом НР по программе Low/High Latitude. Анализ результатов показал, что буря вызывала значительные изменения структуры, динамики, теплового режима ионосферной плазмы и процессов ионосферно-магнитосферного взаимодействия. Ниже дано объяснение этих эффектов в терминах термосферных возмущений, изменения ионного состава, усиления джоулева нагрева в высокоширотной атмосфере, проникновения магнитосферных электрических полей, высыпания энергичных частиц и влияния других факторов.

Особенностью проведенного цикла наблюдений явилось еще одно интересное событие — затмение Солнца 31 мая 2003 г., которое происходило на фоне восстановительной фазы рассматриваемой геомагнитной бури. Частное затмение протекало с 02:16 до 04:17 (здесь и далее время UT), с максимальной фазой в 03:14 и максимальным коэффициентом покрытия солнечного диска около 0.73. Из-

Таблица 1. Данные о солнечной активности

Дата, 2003 г.	$F_{10.7}$	Число солнечных пятен	Площадь солнечных пятен (10^{-6})	Рентгеновский фон	Количество рентгеновских вспышек			Количество оптических вспышек				
					C	M	X	S	1	2	3	4
26 мая	125	65	400	B 3.5	4	2	0	1	2	0	0	0
27 мая	129	116	680	B 4.3	3	2	1	4	2	2	0	0
28 мая	130	116	1130	B 5.9	16	0	1	17	1	0	0	0
29 мая	138	98	1150	B 3.0	1	2	1	1	2	1	0	0
30 мая	117	62	940	B 3.3	4	0	0	8	1	0	0	0
31 мая	113	57	670	B 4.5	4	1	0	4	0	1	0	0
01 июня	112	66	720	B 6.8	7	5	0	3	0	0	0	0

вестно, что солнечные затмения предоставляют уникальную возможность исследования особенностей взаимодействия солнечного излучения с верхней атмосферой Земли. Радары некогерентного рассеяния позволяют осуществить достаточно полную диагностику вариаций параметров околосолнечной плазмы, сопутствующих затмению Солнца. Наблюдения с помощью харьковского радара НР показали, что экранировка солнечного излучения привела к изменению баланса ионизации в F2-слое ионосферы, которое сопровождалось направленным вниз потоком ионов из плазмосферы, уменьшением электронной концентрации N в максимуме слоя и температур электронов T_e и ионов T_i , изменением ионного состава внешней ионосферы и процессов ионосферно-плазмосферного взаимодействия. Важной особенностью проведенного наблюдения явилось то, что затмение Солнца протекало на фоне восстановительной фазы магнитной бури и, кроме того, в послевосходный период, примерно через 2 ч после прохождения терминатора на высоте ионосферного слоя F2. К тому же начало затмения Солнца совпало с интенсивной солнечной вспышкой. Эти факторы наложили заметный отпечаток на характер реакции ионосферы на затмение.

Целью работы является экспериментальное исследование динамических процессов в ионосфере в широком диапазоне высот (200—1500 км), сопутствовавших сверхсильной геокосмической буре и частному затмению Солнца.

Результаты работы кратко описаны в работах [3, 4].

ХАРАКТЕРИСТИКА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Сверхсильная (по классификации [12]) магнитная буря наблюдалась 29—31 мая 2003 г. Она была инициирована приходом 29 мая в 11:50 и 18:30 двух наложившихся импульсов плотности солнечной плазмы, которым предшествовали вспышки

Таблица 2. Данные о потоках протонов и электронов с энергиями E_p и E_e

Дата, 2003 г.	Потоки протонов, $10^9 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ стер}^{-1}$			Потоки электронов, $10^9 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1} \text{ стер}^{-1}$
	$E_p > 1 \text{ МэВ}$	$> 10 \text{ МэВ}$	$> 100 \text{ МэВ}$	
26 мая	5.9	0.11	0.027	1800
26 мая	4.2	0.11	0.026	510
26 мая	170	2.6	0.060	310
26 мая	2400	29	0.032	480
26 мая	520	2.5	0.018	5.0
26 мая	160	8.0	0.180	36
1 июня	28	0.67	0.022	180

класса X1.3 и X3.6 и выбросы корональной массы 27 и 28 мая. Приход первого облака сопровождался поворотом к югу составляющей B_z межпланетного магнитного поля (ММП), которая достигла значения — 15 нТл. В ночь на 30 мая B_z резко повернула на север. После прихода второго облака скорость солнечного ветра увеличилась почти до 800 км/с. При этом значительно увеличились температура, плотность и динамическое давление солнечного ветра. Буря имела внезапное начало 29 мая около 12:20, главная фаза развивалась медленно, быстрое уменьшение D_{st} до значения — 131 нТл произошло с 23.00 29 мая до 03.00 30 мая, фаза восстановления наблюдалась до конца суток 31 мая. 29, 30 и 31 мая индексы $A_p = 89, 49, 17$, а максимальные значения $K_p = 8, 8, 5$ соответственно. На спутнике GOES-8 (W75) были зарегистрированы два всплеска потока протонов с энергией более 10 МэВ: поток 28—30 мая, усилившийся более чем в 200 раз в результате вспышек класса X, произошедших 27 и 28 мая, и поток 31 мая с 04:40 до 14:40, который усилился почти в 70 раз и был связан со вспышкой класса M9.3, произошедшей в 02:18—03:38. Поток электронов с энергией более 2 МэВ, измеряемый геосинхронным спутником

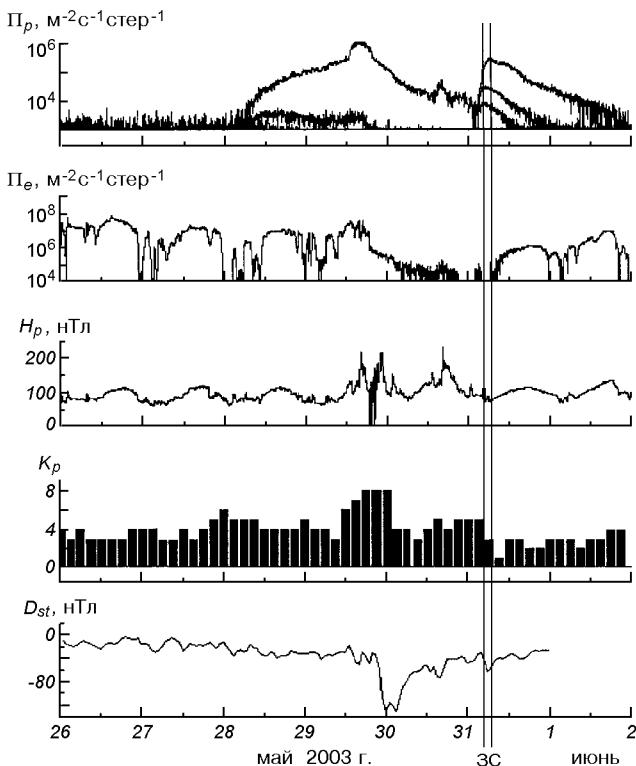


Рис. 1. Временные вариации потоков протонов (ИСЗ GOES-8 (W75)) и электронов (ИСЗ GOES-12), H_p -составляющей геомагнитного поля (ИСЗ GOES-12), K_p - (Air Force Weather Agency) и D_{st} -индексов (WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University) в период 26 мая — 1 июня 2003 г. [<http://solar.sec.noaa.gov/weekly>]

GOES-12, достиг высоких значений 26, 27 и 29 мая. Основные параметры геокосмической обстановки приведены на рис. 1 и 2. Ежедневные данные об активности Солнца и потоках частиц, полученные из интернета (<http://solar.sec.noaa.gov/weekly>), приведены в табл. 1 и 2.

СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ

Исследования проведены с помощью единственного в среднеширотной Европе радара НР, расположенного вблизи г. Харькова (геомагнитные координаты: 45.7° , 117.8° географические координаты: 49.6° N, 36.3° E). Рабочая частота радара — 158 МГц, максимальная мощность передатчика достигает 3.6 МВт (средняя мощность — 100 кВт), поляризация — круговая. Коэффициент усиления зенитной 100-м параболической антенны — около 12700 (эффективная площадь близка к 3700 м^2 ,

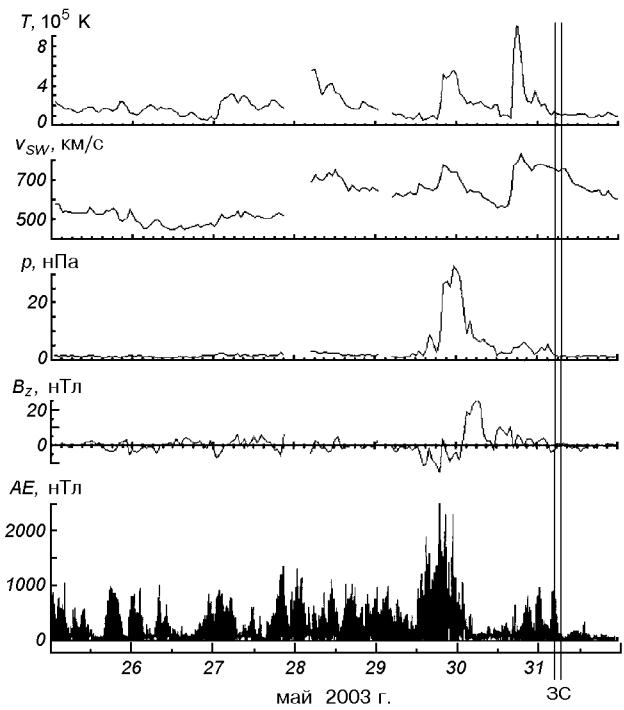


Рис. 2. Временные вариации параметров солнечного ветра: температуры T , радиальной скорости v_{sw} и динамического давления ρ (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor); а также составляющей B_z межпланетного магнитного поля (ACE Satellite — Magnetometer) и AE-индекса 25 — 31 мая 2003 г. (WDC Kyoto)

ширина луча — 1°). Температура системы составляет 570—1320 К, шумовая температура входных цепей радиоприемного устройства достигает 120—240 К. В рассматриваемом цикле наблюдений радар работал в режиме зондирования 800-мкс импульсами, который обеспечивает измерение параметров внешней ионосферы, в том числе ионного состава, до высот 1500 км. Подробнее радар описан в работе [11]. Работа радара НР сопровождалась функционированием ионозонда типа «Базис».

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ РЕАКЦИИ ИОНОСФЕРЫ НА ГЕОКОСМИЧЕСКУЮ БУРЮ

Вариации концентрации электронов N в максимуме слоя F2. Магнитная буря вызвала интенсивную отрицательную ионосферную бурю, время запаздывания которой относительно начала геомагнитной бури составило примерно 8 ч. На рис. 3, а показаны

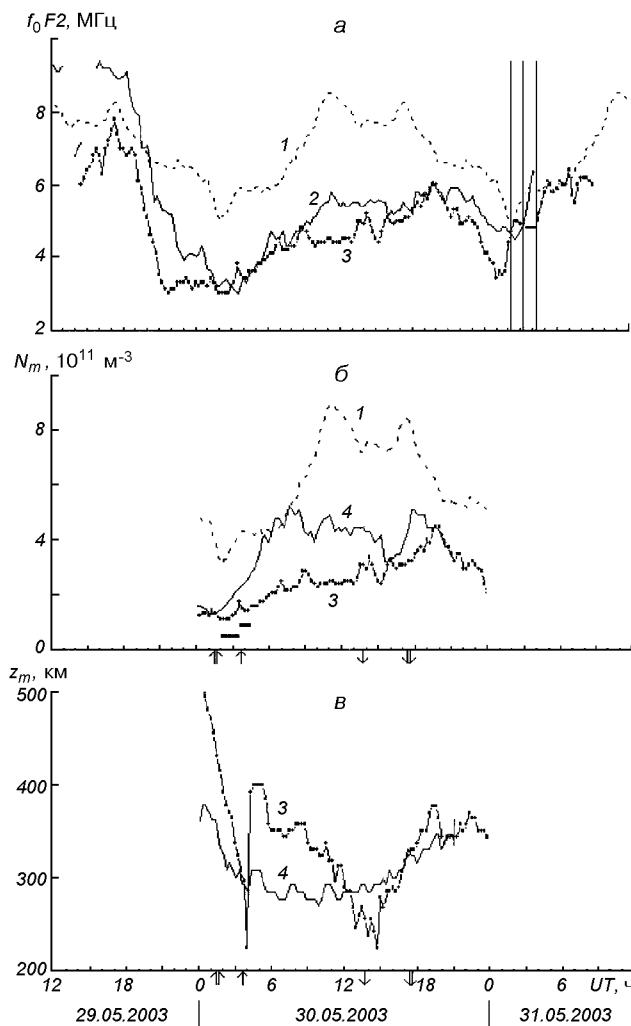


Рис. 3. Вариации значений $f_0 F2$, N_m и $z_m F2$ 29—31 мая в Харькове (кривая 3), Сан-Вито (2), в контрольный день 19/20 мая, Сан-Вито (1) и в спокойный день 26/27 мая 1998 г. (4). Стрелки обозначают моменты восхода (вверх) и захода (вниз) Солнца на поверхности Земли в Харькове (двойная стрелка) и в магнитосопряженной точке (одинарная), вертикальные линии — моменты начала, максимального покрытия и окончания затмения Солнца

вариации критических частот $f_0 F2$, полученных из ионограмм станции вертикального зондирования «Базис» в Харькове (кривая 3) и станции в Сан-Вито (кривая 2, географические координаты: 40° N, 17° E). Последние привлечены для выбора контрольных (невозмущенных) суток (19—20 мая, кривая 1) и оценки характера ионосферного возмущения. Вариации N_m в спокойный день (19—20 мая) соответствовали характеру регулярного поведения среднеширотной ионосферы в условиях лета средней солнечной активности. Его отличительной чер-

той было наличие двух максимумов, вблизи полуночи и в заходный период, причем вечерний максимум ($f_0 F2 \approx 8.3$ МГц) был сопоставим с дневным ($f_0 F2 \approx 8.5$ МГц), что характерно для спада солнечной активности. В возмущенный день 30 мая максимальное отклонение критической частоты $\delta f_0 F2$ в Харькове достигло около -50% ночью и -45% днем. Значение N_m уменьшилось ночью, в течение главной фазы бури, примерно в четыре раза и днем в три раза (рис. 3, б и 4). Рис. 4 дает наглядную картину глубокой депрессии N в диапазоне высот 230...750 км, а также изменения других параметров ионосферы. Видно, что постепенное восстановление N началось 30 мая после 08:00 и продолжалось до конца измерений.

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 измерений 26—27 мая 1998 г., а для сравнения скорости переноса плазмы — сутки 23—24 июня 1998 г. Эти даты по параметрам гелиогеофизической 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., а также такого редкого явления, как затмение Солнца 31 мая, эффекты которого наложились на эффекты бури.

Следует отметить необычное явление, которое наблюдалось 30 мая вблизи восхода Солнца. В спокойный день 26—27 мая 1998 г. (рис. 3, б, кривая 4) с 02:00 до 05:00 утра с началом процесса ионизации в атмосфере критическая частота слоя F2 плавно увеличивалась от $f_0 F2 = 3.5$ до 5.6 МГц (на рис. 3, б приведены величины $N_m = 1.24 \cdot 10^{10} \cdot (f_0 F2)^2$, где $f_0 F2$ берется в МГц). В рассматриваемый возмущенный день 30 мая 2003 г. (рис. 3, а, б, кривая 3) процесс увеличения $f_0 F2$ от 3.0 до 3.8 МГц наблюдался с 02:00 до 03:15, затем он сменился необычным уменьшением $f_0 F2$ до 3.4 МГц на протяжении часа, после чего увеличение $f_0 F2$ продолжалось. На рис. 3, б эти интервалы времени обозначены горизонтальными линиями). Падение $f_0 F2$ проходило на фоне снижения высоты максимума области F ионосферы, включая резкий скачок $z_m F2$ вниз и затем вверх (см. ниже).

Variations of height $z_m F2$ in control day 26—27 June 1998 and during ionospheric storm 30 May 2003 are shown in Fig. 3, в (curve 3). It is known, that behavior of $z_m F2$ during days is

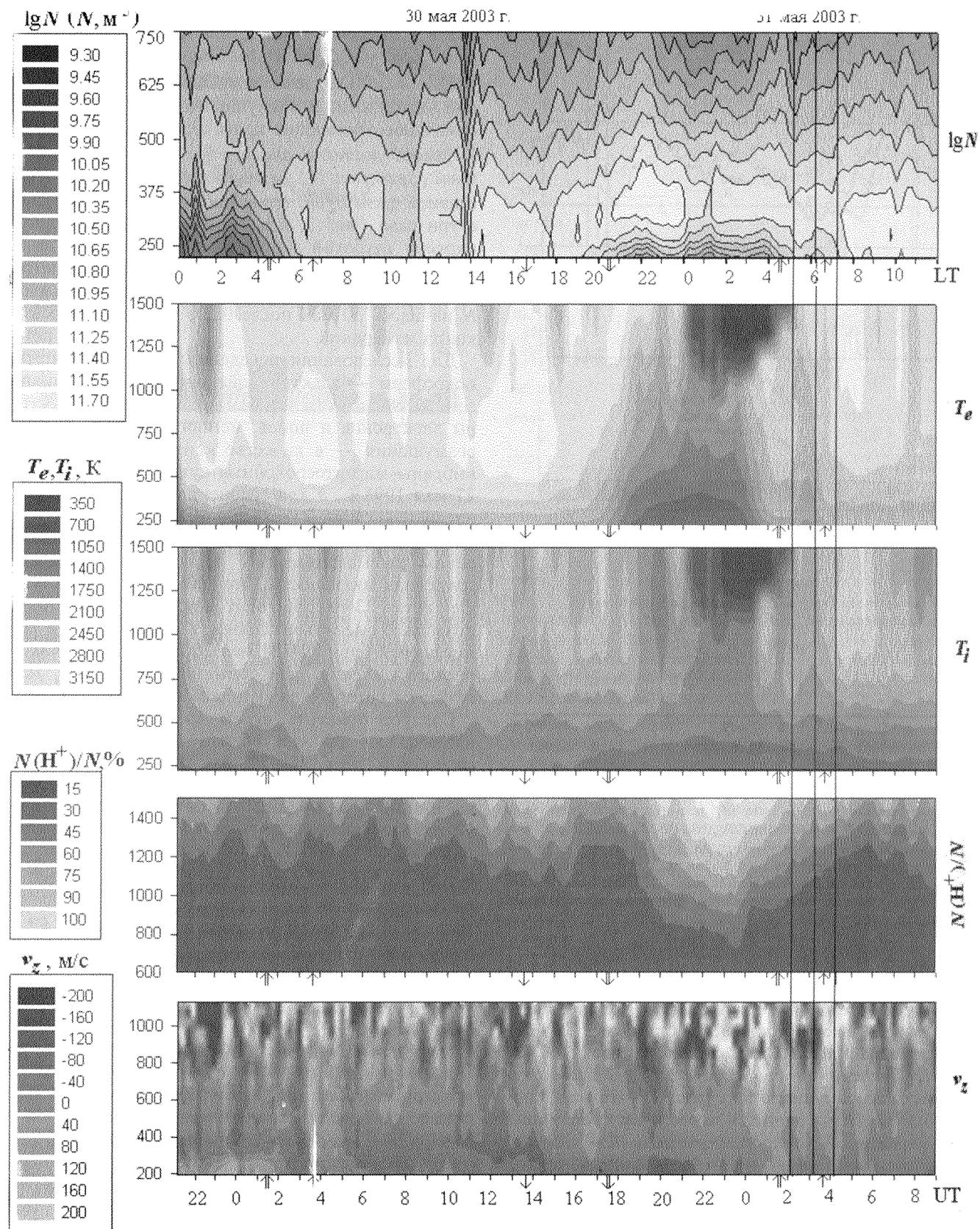


Рис. 4. Вариации параметров ионосферы 30—31 мая 2003 г. по данным харьковского радара НР. Панели сверху вниз: логарифм концентрации электронов ($\lg N$); температуры электронов T_e и ионов T_i ; относительная концентрация ионов водорода $N(\text{H}^+)/N$; вертикальная составляющая скорости переноса плазмы v_z

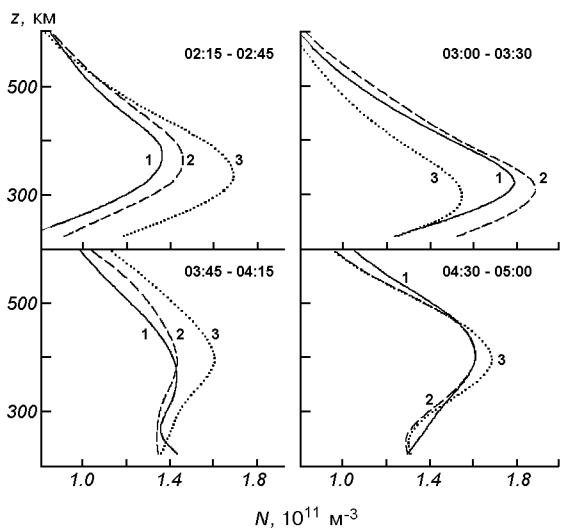


Рис. 5. Высотные профили 1—3 электронной концентрации N в восходный период возмущенного дня 30 мая 2003 г. для последовательных моментов времени (через 15 мин)

связано как с суточными вариациями фотохимических процессов, так и с изменением направления термосферных ветров: меридиональная составляющая ветра ночью направлена к экватору и поднимает слой на более высокие уровни, а днем она обращена к полюсу, что вызывает уменьшение $z_m F2$. Видно, что в спокойный день высота слоя F2 изменялась примерно от 270 км днем до 370 км ночью, а в возмущенный день 30 мая 2003 г. (кривая 3) она была больше $z_m F2$ почти на 160 км около местной полуночи, достигнув примерно 530 км, и на 80 км — вблизи полудня.

Рассмотрим особенности необычного явления, связанного с падением $f_0 F2$ в восходный период (см. выше). Оно сопровождалось значительным снижением $z_m F2$ до примерно 320 км, на фоне которого в 03:45 произошла быстрая деформация высотного распределения N с расслоением профиля на два слоя и преобладанием нижнего слоя на высоте 240 км, что привело к снижению высоты максимума слоя почти на 80 км. В течение следующих 15 мин концентрация N нижнего слоя уменьшилась, и восстановился главный максимум области F2 на высоте 400 км в 04:00. Расслоение и деформация профиля N , увеличение толщины слоя сохранялись по крайней мере до 05:00. Эти эффекты имели признаки внезапного прохождения внутренней гравитационной волны (ВГВ). Высотные профили электронной концентрации в последовательные моменты времени (через 15 мин), демонстрирующие необычное поведение ионосферы в те-

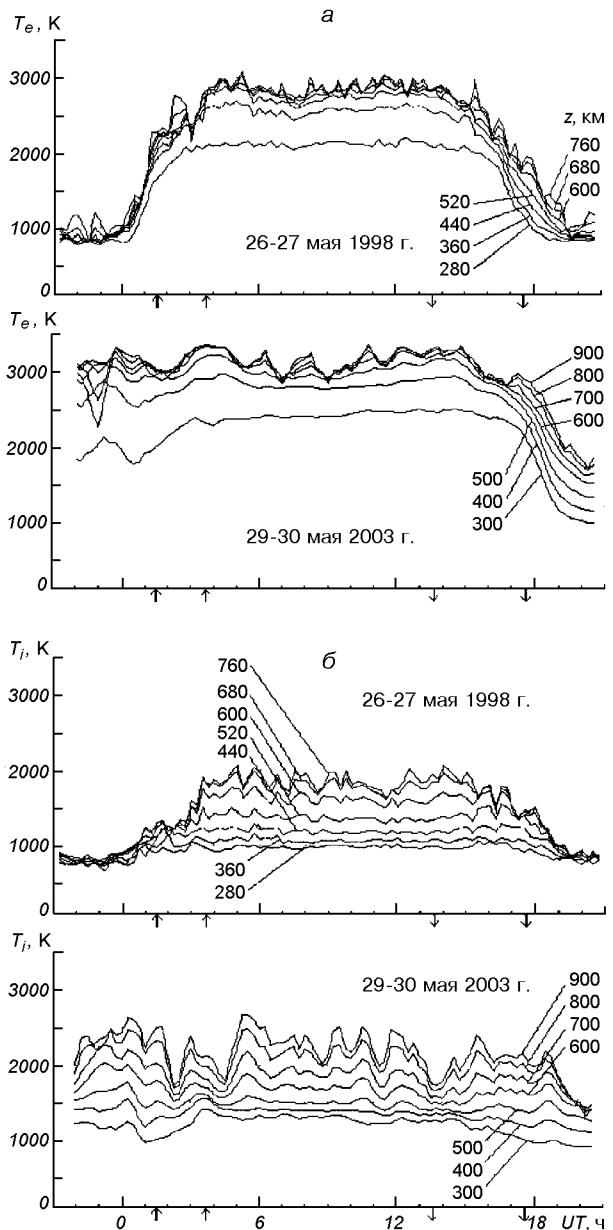


Рис. 6. Температуры T_e и T_i в спокойный день 26/27 мая 1998 г. и возмущенный день 29/30 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

чение около 02:00—05:00, приведены на рис. 5. В магнитосфере этим событиям предшествовали поворот составляющей B_z межпланетного магнитного поля к северу и резкое уменьшение динамического давления солнечного ветра.

Вариации температур электронов T_e и ионов T_i в контрольный день 26—27 мая 1998 г. и во время бури 29—30 мая 2003 г. показаны на рис. 6.

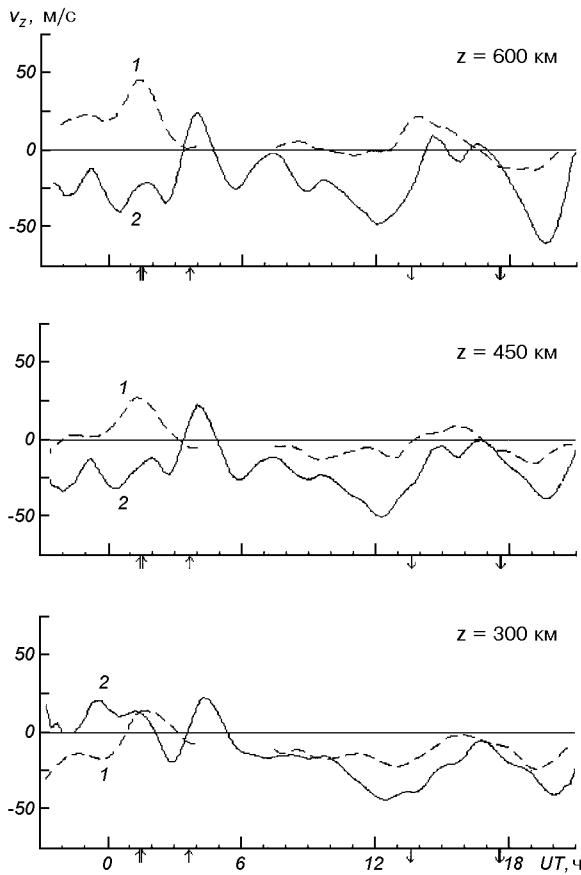


Рис. 7. Вариации скорости v_z на разных высотах: кривая 1 — в спокойный день 23/24 июня 1998 г., кривая 2 — возмущенный день 29/30 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 105 мин с шагом 15 мин)

В главную фазу магнитной бури, в ночь 29—30 мая, уменьшение концентрации электронов в четыре раза сопровождалось необычно сильным нагревом плазмы: температура электронов превысила 2000 К на высоте 300 км и 3200 К на высоте 800 км, а ионов — 1200 и 2400 К на тех же высотах (см. рис. 4 и 6). Такое явление в наших широтах наблюдалось крайне редко.

Вариации скорости переноса плазмы v_z в возмущенный и спокойный день 23—24 июня 1998 г. на разных высотах приведены на рис. 7. Видно, что характер суточных вариаций v_z в сравниваемые дни был подобным. Утренний всплеск скорости v_z в спокойный день характеризует регулярные изменения v_z и связан с восходом Солнца, когда процессы фотоионизации начинают преобладать над рекомбинацией ионов O^+ в остывшей за ночь атмосфере, и избыток плазмы уносится вверх. В возмущенный день отмечалось в основном увеличение модуля

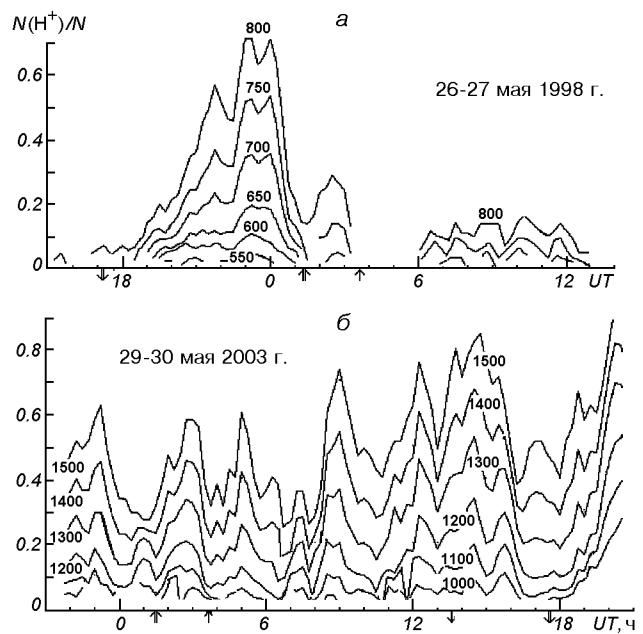


Рис. 8. Вариации относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N$: а — в контрольный день 26/27 мая 1998 г., б — в возмущенный день 29/30 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

отрицательных значений v_z , а также необычное колебание v_z в восходный период (около 02.00—05.00), которое накладывалось на утреннее поведение скорости v_z и изменяло ее знак. Колебание v_z относится к вышеупомянутому нарушению утреннего увеличения N на фоне резкого уменьшения и увеличения высоты $z_m F2$ (см. рис. 3).

Вариации относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N$ на фиксированных высотах для спокойного и возмущенного дней показаны на рис. 8. В течение магнитной бури ночью наблюдалось уменьшение $N(H^+)/N$ более чем на порядок величины (см. также рис. 4). Около полудня 30 мая на высотах 1200—1500 км отмечалось необычное увеличение $N(H^+)/N$ до значений 0.2—0.7, что превысило ночные значения примерно в 1.2 раза.

Волновые возмущения. Магнитная буря сопровождалась генерацией волновых возмущений концентрации электронов с относительной амплитудой $\delta_N = \Delta N/N$ в ночное время (18.00—02.00) около 10—20 %, а днем — 3...5 % и преобладающим периодом $T \approx 20$ мин. В ночь с 29 на 30 мая и днем 30 мая волновые возмущения наблюдались в диапазоне высот 140—550 км, а в последующую ночь — лишь на высотах 140—270 км. Очевидно, они имели различную физическую природу.

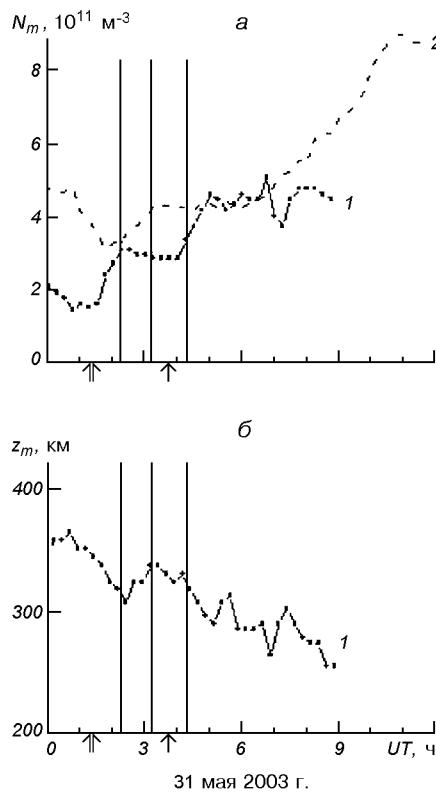


Рис. 9. Вариации: *а* — величины N_m в Харькове (кривая 1) и в контрольный день (кривая 2); *б* — величины $z_m F2$ в Харькове в день затмения Солнца 31 мая 2003 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА ЗАТМЕНИЕ СОЛНЦА

Вариации N *в максимуме слоя F2 и высоты максимума.* Магнитная буря, начавшаяся 29 мая, вызвала отрицательную ионосферную бурю, которая еще продолжалась 31 мая. Сравнение с контрольной датой 19–20 мая (по данным станции вертикального зондирования в Сан-Вито) показало, что 31 мая, в восстановительной фазе магнитной бури, ионосферная буря стала ослабевать, и отклонение критической частоты $\delta f_0 F2$ в Харькове, которое 30 мая достигало -50% , уменьшилось до -35% (см. рис. 3, *а*). При этом уменьшение электронной концентрации N_m в максимуме слоя F2, которое 30 мая составило четыре раза ночью и три раза днем, уменьшилось соответственно до 2.5 и 1.5 раз (см. рис. 9, *а* и 4). Во время затмения на фоне возмущения и связанного с ним общего низкого уровня электронной концентрации отмечалось отклонение от утреннего нарастания N , которому соответствовало уменьшение $f_0 F2$ на 0.2–0.4 МГц,

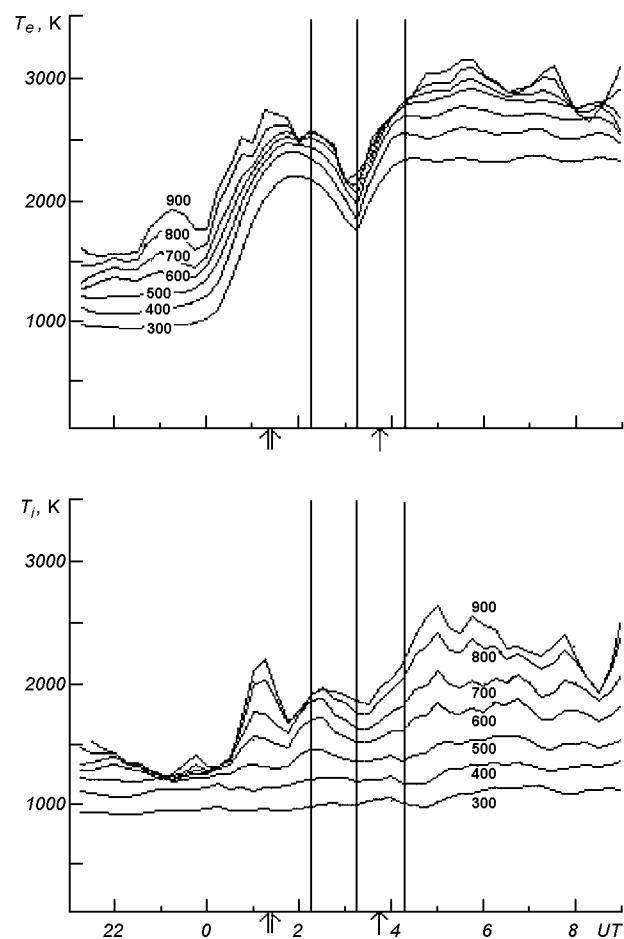


Рис. 10. Вариации T_e и T_i в день затмения Солнца на высотах $z = 300 \dots 900$ км (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

т. е. на 4–8 %, и уменьшение N_m на 9–17 % (рис. 9, *а* и 4). Уменьшение N сопровождалось увеличением высоты $z_m F2$ примерно на 30 км, почти центрированным относительно максимальной фазы затмения (рис. 9, *б* и 4).

Вариации температур электронов T_e и ионов T_i . Во время затмения Солнца наблюдалось малоинерционное (характерное время становления не более 100 с [1]) уменьшение T_e примерно на 500 К (рис. 4 и 10). Поведение $T_e(t)$ практически повторяло изменения во времени потока солнечного излучения. В течение затмения уменьшение T_i на высотах 300–400 км было малым, но с увеличением высоты величина эффекта возрастала. При $z = 800$ км уменьшение T_i достигло 300 К. Важно, что этот эффект был инерционным. Время его запаздывания составляло примерно 30–15 мин для $z \approx 400 \dots 800$ км.

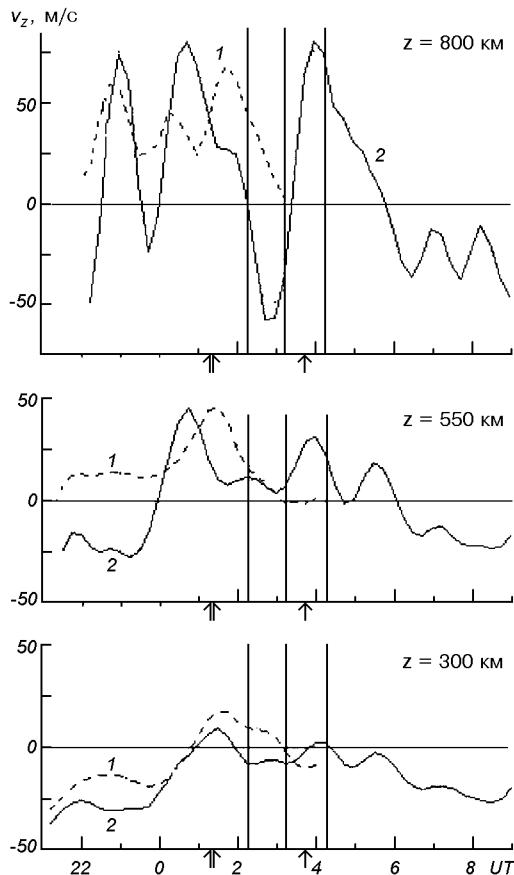


Рис. 11. Вариации скорости v_z на высотах 300, 550 и 800 км: 1 — в контрольный день, 2 — в день затмения Солнца (скользящее усреднение на интервале 75 мин с шагом 15 мин)

Вариации скорости переноса плазмы. Временные зависимости вертикальной составляющей скорости движения плазмы v_z для 31 мая 2003 г. и контрольного дня (выбраны спокойные сутки 23–24 июня 1998 г.) приведены на рис. 11 (данные получены с помощью скользящего усреднения на интервале 75 мин с шагом 15 мин). Видно, что характер суточных вариаций v_z в разные дни был подобным. Отличие наблюдалось во время затмения Солнца. Оно привело к тому, что на основное утреннее увеличение v_z наложилось малоинерционное уменьшение скорости v_z (см. рис. 4 и 11), почти центрированное относительно максимальной фазы затмения. Уменьшение v_z по сравнению с контрольным днем наблюдалось в диапазоне высот 250–850 км примерно с 01:00 до 03:00 (рис. 11). Высотные профили v_z (в виде исходных сеансов с 15 мин усреднением сигнала) в характерные моменты времени до затмения, в максимальной его фазе, после затмения, а также ночью приведены на рис. 12.

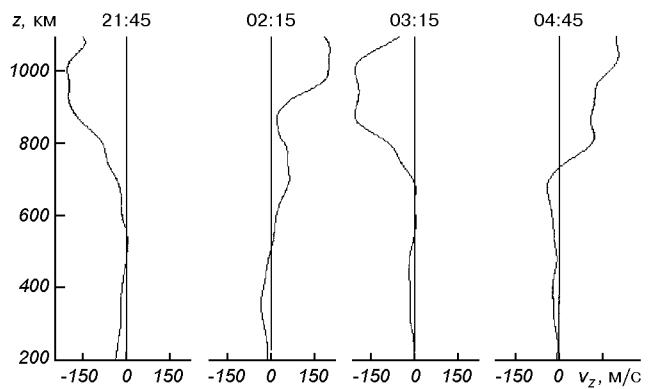


Рис. 12. Высотные профили скорости v_z в ночь 30/31 мая 2003 г. (21:45), до затмения Солнца 31 мая 2003 г. (02:15), в максимальной его фазе (03:15) и после затмения (04:45)

Видно, что перед началом затмения (02:15) процессы вертикального переноса плазмы уже перестроились к дневным условиям: $v_z \leq 0$ при $z \leq 500$ км, а выше $v_z > 0$, т. е. высотный профиль v_z имел вид, характерный для стандартной дневной ионосферы [20]. На стадии максимальной фазы затмения (03:15) скорость v_z стала нисходящей, достигла значений $-100\ldots-200$ м/с, а профиль v_z изменил характер и стал аналогичным ночному профилю (21:45) и теоретическому профилю, рассчитанному для ночного слоя F [20]. Примерно после 03:30 восстановился дневной характер профиля $v_z(z)$ (см. рис. 12, профиль для 04:45). Из рис. 12 следует, что во время затмения процессы переноса и обмена плазмой между ионосферой и протоионосферой изменяют характер и становятся аналогичными ночным условиям, т. е. затмение подобно наступлению кратковременной ночи.

Вариации концентрации ионов H^+ . Временные зависимости относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N$ на фиксированных высотах для спокойного дня (выбраны сутки 26–27 мая 1998 г.) и дня с затмением приведены на рис. 13. Видно, что затмение Солнца вызывало нарастающее с высотой увеличение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N$ во внешней ионосфере, которое составило около 10 и 20 % на высотах 1100 и 1500 км (см. также рис. 4).

На рис. 14 приведены высотные профили $N(H^+)$ для четырех характерных моментов времени: непосредственно перед началом затмения, вблизи максимального покрытия, вскоре после затмения Солнца и в середине ночи. Видно, что вблизи максимума затмения (03:00) концентрация H^+ увеличилась за счет притока ионов из плазмосферы.

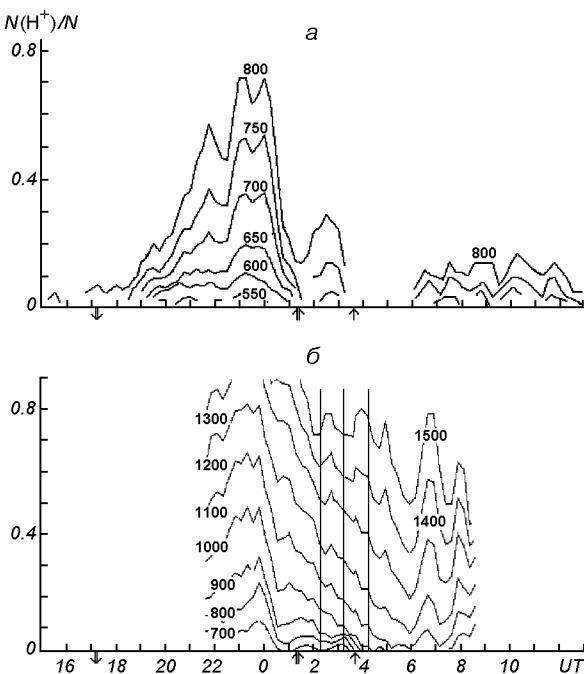


Рис. 13. Вариации относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N$: *а* — в контрольный день 26/27 мая 1998 г., *б* — в день затмения Солнца 31 мая 2003 г. (скользящее усреднение на интервале 45 мин с шагом 15 мин)

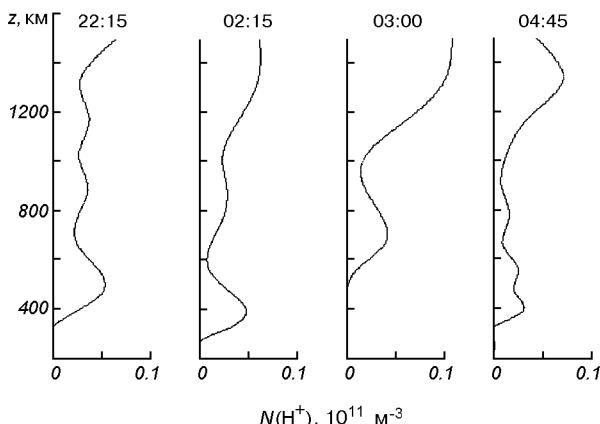


Рис. 14. Высотные профили концентрации ионов водорода $N(H^+)$ для характерных моментов времени: в середине ночи 30/31 мая 2003 г. (22:15), непосредственно перед началом затмения 31 мая (02:15), вблизи максимального покрытия (03:00) и вскоре после затмения (04:45)

Форма профиля соответствовала нисходящему потоку плазмы и стала аналогичной ночным условиям (профилю для 22:15). До затмения (02:15) и после него (04:45) форма профиля H^+ больше соответствовала дневным условиям и восходящему потоку плазмы [20].

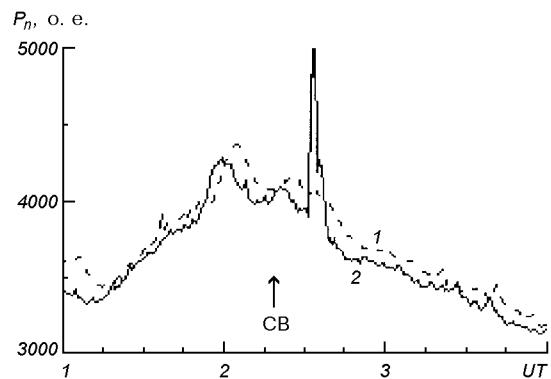


Рис. 15. Вариации мощности шумового радиоизлучения на частоте 158 МГц: 1 — 30 мая, 2 — во время солнечной вспышки (СВ) 31 мая 2003 г.

Эффекты затихающей бури в поведении ионов H^+ проявились в том, что относительная концентрация $N(H^+)/N$ ночью 31 мая составляла около 0.2 на высоте 800 км и превышала значение в главную фазу бури примерно в 4—6 раз. Вблизи местного полудня значения $N(H^+)/N \approx 0.2—0.6$ на высотах 1200...1500 км, т. е. уменьшились по сравнению с ночных значениями примерно в четыре раза.

Эффекты солнечной вспышки класса M 9.3. Около 03:30 был зафиксирован всплеск на 35—40 % мощности шумового радиоизлучения околоземной плазмы на частоте 158 МГц в полосе частот 260 кГц (рис. 15). Он обусловлен, скорее всего, перестройкой ионосферно-магнитосферного взаимодействия, вызванной вспышкой, и излучением высывающихся из радиационного пояса частиц [16].

ФИЗИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАВШИХ ИОНОСФЕРНУЮ БУРИЮ

Variации N_m и $z_m F2$. Уменьшение N_m во время бури, ночью до четырех раз и днем до трех раз, по-видимому, в какой-то мере объясняется изменением нейтрального состава с уменьшением отношения $N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, которое связано с высокоширотным нагревом термосферы (за счет высыпания энергичных частиц и усиления авроральных электроструй) и перестройкой глобальной термосферной циркуляции [6, 8, 10]. Следует предположить также значительный вклад колебательного возбуждения молекул N_2 в увеличение скорости рекомбинации ионов O^+ [15, 21, 22, 25, 26, 28], который резко увеличивается при значени-

ях $T_e \geq 1500$ К [6, 7, 26, 30]. В нашем случае $T_e = 2000\ldots3200$ К, в том числе в ночное время. После полуночи причиной падения N могло быть смещение к экватору главного ионосферного провала, как и во время бури 25 сентября 1998 г. [17]. Оно было обнаружено при анализе глобальных карт полного электронного содержания (TEC), построенных по данным навигационной системы GPS [2].

В качестве одной из причин увеличения $z_m F2$ во время бури примерно на 160 км ночью и на 80 км вблизи полудня, наряду с усилением меридионального ветра к экватору [15, 28], рассматривается эффект проникновения магнитосферных электрических полей в средние широты [6, 15, 19, 28] за счет продолжительного (более суток) высapsulation протонов и электронов с потоком около $10^8 \text{ м}^{-2}\text{s}^{-1}\text{стер}^{-1}$. Результатом последнего является повышение проводимости нижележащей ионосферы, закорачивающей экранирующее поле поляризации (вторую систему продольных токов) [6]. Когда преобладает второй механизм, оценка сверху E_y по величине изменения $z_m F2$ дает максимальные значения поля 25 мВ/м ночью и 20 мВ/м днем.

Вариации T_e и T_i . В качестве возможной причины очень сильного нагрева плазмы в главную фазу магнитной бури рассматривается смещение горячей зоны вместе с плазмопаузой [6] на меньшие L -оболочки (для Харькова $L = 1.9$) в условиях высокой геомагнитной активности (три 3-часовых интервала с $K_p = 8$ в ночь 29—30 мая).

Вариации v_z . Необычное нарушение утреннего нарастания N на фоне резкого перепада $z_m F2$ вниз-вверх и деформации слоя, которые сопровождались волновым возмущением скорости v_z , могло быть вызвано проникновением в средние широты электрического поля с зональной составляющей $E_y \approx -20$ мВ/м, направленной на запад [19], и приходом ВГВ [6, 23, 24]. В магнитосфере этим событиям предшествовали резкий спад динамического давления солнечного ветра и поворот составляющей B_z межпланетного магнитного поля с юга на север.

Вариации относительной концентрации ионов H^+ . Уменьшение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N$ более чем на порядок величины, которое наблюдалось ночью, в главную фазу бури, можно объяснить опустошением магнитной силовой трубы [6, 9, 13, 27]. Необычное увеличение $N(H^+)/N$ до значений 0.2—0.7, которое отмечалось днем 30 мая на высотах 1200…1500 км, по-видимому, связано с уменьшением давления плазмы в области F2 из-за высокой скорости рекомбинации ионов O^+ и депрессии N слоя F2 в результате бури, что ведет к увеличению потока плазмы

из протоносферы, к увеличению $N(H^+)$ и свидетельствует о начавшейся стадии наполнения геомагнитной силовой трубы после главной фазы бури [6, 13, 18].

ФИЗИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ, СОПУТСТВОВАВШИХ ЗАТМЕНИЮ СОЛНЦА

Вариации N_m и $z_m F2$. По мере покрытия солнечного диска уменьшение потока солнечного излучения вызвало нарушение сложившегося баланса между процессами ионообразования, потеря и переноса плазмы, возник направленный вниз поток плазмы из протоносферы [1, 5, 14, 29, 31], который противодействовал основному восходящему утреннему потоку. Их взаимодействие, по-видимому, не могло компенсировать сложившееся в процессе затмения Солнца преобладание потерь в слое, что привело к уменьшению N_m на 9—17 % и отклонению от утреннего увеличения N_m , которое наблюдалось в спокойный день. Преобладанием потерь в слое F2 можно объяснить также и увеличение примерно на 30 км высоты $z_m F2$, которое было почти центрировано относительно максимальной фазы затмения.

Вариации T_e и T_i . Во время затмения Солнца уменьшение T_e примерно на 500 К, почти синхронное на всех высотах, объясняется высокой теплопроводностью электронного газа. Степень уменьшения T_i увеличивалась с высотой за счет уменьшения концентрации нейтральных компонентов и теплообмена ионов с нейтральным газом. На высотах 300…400 км уменьшение T_i было незначительным, на высоте 800 км оно составило 300 К. Ниже 300 км T_i достигла, по-видимому, значения температуры нейтралов T_n и оставалась постоянной. Изменения T_i , в отличие от T_e , запаздывали относительно начала затмения на 30—15 мин за счет высокой теплоемкости и низкой теплопроводности ионного газа [1, 5, 14, 29].

Вариации v_z . В период, почти симметричный относительно максимальной фазы затмения, на высотах 250—850 км на утренний всплеск восходящей скорости плазмы наложилась направленная вниз скорость, которая увеличивалась после начала затмения. Такое поведение v_z объясняется уменьшением интенсивности ионизирующего излучения Солнца, которое привело к преобладанию потерь ионов O^+ и дополнительному потоку плазмы из внешней ионосферы, препятствующему выводу слоя F2 из состояния диффузационного равновесия [1, 5, 31].

Вариации относительной концентрации ионов H^+ . Наблюдения 31 мая интересны тем, что в них отражены эффекты двух высокоэнергичных геофизических событий: затмения Солнца и геокосмической бури. Рассмотрим эти эффекты. Увеличение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N$ во время затмения Солнца, которое составило 10 и 20 % на высотах 1100 и 1500 км, связано с уменьшением интенсивности ионизирующего излучения Солнца. Результатом этого стал нисходящий поток плазмы из протоионосферы, который привел к увеличению $N(H^+)$ [1]. Эффекты затихающей бури проявились в том, что относительная концентрация $N(H^+)/N$ ночью 31 мая превышала значение в главную фазу бури примерно в 4—6 раз. Вблизи местного полудня на высотах 1200—1500 км отмечались значения $N(H^+)/N \approx 0.2\ldots 0.6$. Это свидетельствовало о процессе наполнения геомагнитной силовой трубы после главной фазы бури и постепенном увеличении концентрации ионов H^+ [6, 13, 18].

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ИОНОСФЕРЫ НАД ХАРЬКОВОМ НА ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА 31 МАЯ 2003 Г. И 11 АВГУСТА 1999 Г.

Затмение Солнца 11 августа 1999 г. [1] по своим пространственным характеристикам было аналогично рассматриваемому затмению 31 мая 2003 г., т. е. оно было частным с близким максимальным значением функции покрытия Солнца около 0.73. Его отличие состояло в том, что оно протекало вблизи полудня, т. е. в квазистационарной дневной ионосфере, и в магнитоспокойных условиях. Отсюда на фоне общих сопутствующих эффектов, подобных наступлению кратковременной ночи в ионосфере, наблюдались и определенные особенности реакции ионосферы, зависящие от геофизической обстановки. Рассмотрим их кратко.

К числу подобных ионосферных эффектов двух рассматриваемых затмений относятся: практически одинаковое уменьшение N , которое в максимуме области F составило 15 и 9—17 % в 1999 и 2003 гг. соответственно; одинаковое увеличение высоты $z_m F2$ на 30 км; близкие значения уменьшения температуры электронов на высотах 200—700 км (на 400—600 и 500 К) и несколько большее падение температуры ионов в 1999 г. (до 600 К), чем в 2003 г. (до 300 К); увеличение концентрации ионов водорода, которое составило на высоте 1100 км 30 % в 1999 г. и 10 % в 2003 г. (различие в абсолютных значениях вариации параметров ионосферы можно объяснить разным временем затмения).

К числу отличий в реакции ионосферы относятся: эффекты сложения нисходящей скорости плазмы, обусловленной затмением Солнца, с регулярным восходящим утренним всплеском скорости, результатом которого явилась неполная компенсация потока плазмы из протоионосферы и процессов потерь в области F2 и уменьшение N в течение всего времени затмения в 2003 г.; некоторая асимметрия вариации параметров ионосферы (температуры электронов и ионов, вертикальной скорости плазмы и др.), обусловленная значительным изменением зенитного угла Солнца в моменты первого и последнего контактов затмения; эффекты магнитного возмущения в 2003 г., которые проявлялись в том, что затмение протекало на фоне стадии наполнения геомагнитной силовой трубы после главной фазы бури и увеличения относительной концентрации ионов водорода.

ВЫВОДЫ

1. Сверхсильная магнитная буря 29—31 мая 2003 г. ($A_p = 89, 49, 17$) вызвала сильнейшую отрицательную ионосферную бурю. Обнаружены редкие для средних широт эффекты геокосмической бури.

2. К числу необычных эффектов бури относятся значительное (до четырех раз) уменьшение электронной концентрации N в области F2 ионосферы и сильный нагрев плазмы (ионов и электронов) до 2500—3200 К ночью, в течение главной фазы бури ($K_p = 8$). Причиной таких изменений могла быть деформация магнитосферы во время сверхсильной магнитной бури, сопровождаемая, по-видимому, смещением главного ионосферного провала, а также горячей зоны вместе с плазмопаузой на меньшие L -оболочки (для Харькова $L = 1.9$). Результатом необычного нагрева плазмы могло быть увеличение вклада колебательного возбуждения молекул N_2 в увеличении скорости потерь ионов O^+ и в наблюдаемое уменьшение N в слое F2.

3. Зарегистрировано увеличение высоты z_m максимума слоя F2, которое в течение главной фазы бури достигло 160 км. Увеличение $z_m F2$ могло быть обусловлено проникновением магнитосферных электрических полей в средние широты за счет продолжительного (более суток) высыпания протонов и электронов с потоками около $10^8 \text{ м}^{-2}\text{s}^{-1}\text{стэр}^{-1}$, которое привело к повышению проводимости нижней ионосферы, закорачивающей экранирующее поле поляризации. Оценка сверху E_y по величине изменения $z_m F2$ дала максимальные значения поля 25 мВ/м ночью и 20 мВ/м днем.

4. Обнаружено уменьшение относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N$ более чем на порядок величины в течение главной фазы бури и увеличение $N(H^+)/N$ до значений 0.2—0.7 на высотах 1200—1500 км в дневное время. Эти эффекты вероятно вызваны истощением магнитной силовой трубы и последующим ее наполнением. Они свидетельствуют о перестройке процессов ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

5. Зарегистрировано необычное волновое возмущение скорости v_z в восходный период на фоне нарушения утреннего увеличения N , резкого перепада $z_m F2$ вниз-вверх и деформации слоя. Эффект, по-видимому, был вызван проникновением в средние широты импульса электрического поля с составляющей $E_y \approx -20$ мВ/м, направленной на запад. Его источником в магнитосфере мог быть резкий поворот составляющей B_z межпланетного магнитного поля с юга на север и изменение динамического давления солнечного ветра.

6. Затмение Солнца 31 мая 2003 г. вызвало целый комплекс процессов на всех высотах, напоминающий кратковременную (около 2—3 ч) перестройку околоземной среды к ночных условиям.

7. На стадии максимальной фазы затмения Солнца скорость переноса плазмы v_z изменила направление, достигла $-100\ldots-200$ м/с, и профиль $v_z(z)$ стал подобен ночному. Это свидетельствует о нарушении баланса ионизации в слое F2 во время затмения, результатом которого стал нисходящий поток плазмы, диффундирующей из плазмосферы в область сложившегося в результате затмения преобладания потерь.

8. Затмение Солнца вызвало отклонение от утреннего увеличения N , которое сопровождалось уменьшением $f_0 F2$ на 4—8 %, уменьшением N_m на 9—17 % и увеличением высоты $z_m F2$ на 30 км.

9. Затмение Солнца привело к малоинерционному уменьшению температуры электронов T_e примерно на 500 К и уменьшению температуры ионов T_i , нарастающему с высотой до 300 К на высоте 800 км, с запаздыванием 30—15 мин.

10. Результатом затмения Солнца явилось нарастающее с высотой увеличение относительной концентрации ионов водорода во внешней ионосфере, которое составило 10—20 % на высотах 1100—1500 км.

11. Исследована реакция ионосферы на солнечную вспышку 31 мая класса M 9.3, которая почти совпала с началом затмения. Зафиксирован всплеск на 35—40 % мощности шумового радиоизлучения околоземной плазмы на частоте 158 МГц примерно через 17 мин после начала солнечной вспышки.

Всплеск обусловлен, скорее всего, вызванной вспышкой перестройкой ионосферно-магнитосферного взаимодействия и излучением высывающихся из радиационного пояса частиц.

12. Установлено, что на эффекты затмения Солнца 31 мая 2003 г. в ионосфере накладывались утренний всплеск восходящей скорости плазмы, характерный для периода восхода Солнца, дополнительное увеличение $N(H^+)/N$, связанное с ионосферным возмущением, а также эффекты солнечной вспышки класса M 9.3, вызвавшей, по-видимому, перестройку ионосферно-магнитосферного взаимодействия. Эти факторы определили описываемые отличия от поведения ионосферы во время затмения Солнца 11 августа 1999 г., которое протекало в дневной квазистационарной ионосфере в магнитоспокойных условиях.

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 // Заруб. радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.—2002.—№ 2.—С. 25—63.
2. 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.
3. Ботовский В. К., Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я. и др. Особенности вариаций параметров ионосферы во время геокосмической бури 30 мая 2003 года // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тез. — Кацивели, Крым, 2003.—С. 142.
4. Ботовский В. К., Григоренко Е. И., Пазора С. А. и др. Эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года, развивающиеся на фоне восстановительной фазы магнитной бури // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тез. — Кацивели, Крым, 2003.—С. 143.
5. Бойтман О. Н., Калихман А. Д., Таццилин А. В. Среднеширотная ионосфера в период полного солнечного затмения 9 марта 1997 г. 1. Моделирование эффектов затмения // Геомагнетизм и астрономия.—1999.—39, № 6.—С. 45—51.
6. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1987.—528 с.
7. Бэнкс П. М. Тепловая структура ионосферы // ТИИЭР.—1969.—57, № 3.—С. 6—30.
8. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и астрономия.—1985.—25, № 5.—С. 705—721.
9. Кринберг И. А., Таццилин А. В. Ионосфера и плазмосфера. — М.: Наука, 1984.—189 с.
10. Серебряков Б. Е. Исследование процессов в термосфере во время магнитных возмущений // Геомагнетизм и астрономия.—1982.—22, № 5.—С. 776—781.
11. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и астрономия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
12. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастро-

- номия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
13. Bailey G. J., Moffett R. J., Murphy J. A. Calculated daily variations of O⁺ and H⁺ at mid-latitudes. II. Sunspot maximum results // *J. Atmos. and Terr. Phys.*—1979.—41.—P. 471—482.
 14. Baron M. J., Hunsucker R. D. Incoherent scatter radar observations of the auroral zone ionosphere during the total solar eclipse of July 10, 1972 // *J. Geophys. Res.*—1973.—78, N 31.—P. 7451—7460.
 15. 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.
 16. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Taran V. I., Tyrnov O. F. Ionospheric wave-like disturbances (WLD) following the September 23, 1998 solar flare from Kharkiv incoherent scatter radar observations // 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 2002a. P. 2278.
 17. 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 2002b. P. 2280.
 18. Evans J. V., Holt J. M. Nighttime proton fluxes at Millstone Hill // *Planet. Space Sci.*—1978.—26, N 8.—P. 727—744.
 19. Foster J. C., Rich F. J. Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.*—1998.—103.—P. 26367—26372.
 20. Geisler J. E., Bowhill S. A. An investigation of ionosphere-protonosphere coupling // *J. Atmos. and Terr. Phys.*—1965.—27, N 457.—P. 1119.
 21. Mikhailov A. V., Foster J. C. Daytime thermosphere above Millstone Hill during severe geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.*—1997.—102.—P. 17275—17282.
 22. Mikhailov A. V., Fürstner 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.
 23. Mishin E., Foster, J. C., Potekhin A. P., et al. Ionospheric perturbations caused by quasi-periodic magnetic disturbances during the September 25, 1998 storm, in *EOS Trans. AGU*, 81 N 48, Fall Meeting, F 947, San Francisco, USA, 2000.
 24. 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, in *EOS Trans. AGU*, 82 N. 20. Spring Meeting, S 291, San Francisco, USA, May 15, 2001.
 25. 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.
 26. Pavlov A. V., Buonsanto M. J., Schlesier A. C., et al. 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.
 27. 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.
 28. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., et al. Ionospheric effects of the March 1990 magnetic storm: Comparison of theory and measurement // *J. Geophys. Res.*—1994.—99, N A12.—P. 23359—23365.
 29. Salah J. E., Oliver W. L., Foster J. C., et al. Observations of the May 30, 1984, Annular solar eclipse at Millstone Hill // *J. Geophys. Res.*—1986.—91, N A.—P. 1651—1660.
 30. 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.
 31. Sterling D. L., Hanson W. B., Woodman R. F. Synthesis of data obtained at Jicamarca, Peru, during the September 11, 1969, eclipse // *Radio Sci.*—1972.—7, N 2.—P. 279—289.

DYNAMIC PROCESSES IN THE IONOSPHERE DURING THE GEOSPACE STORM ON 30 MAY AND SOLAR ECLIPSE ON 31 MAY 2003

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

Some results of the F region and topside ionosphere response to the 29—31 May 2003 severe geomagnetic storm (maximum index $K_p = 8$) are presented. The observations are carried out with the Kharkov incoherent scatter radar. Considerable storm effects in the ionosphere were revealed. Among them were deep electron density N depletion, uplifting in the peak height z_m F2, unusual heating of plasma, decrease of relative concentration of hydrogen ions in the main phase of the storm, infringement of processes of the ionosphere-magnetosphere interaction. The geospace storm was also accompanied by generation of wave-like ionosphere disturbances. Some features of the ionosphere response to the 73 % solar eclipse on 31 May 2003 occurred after sunrise during the recovery phase of the geomagnetic storm are considered. It is shown that, during the eclipse, short-time (2—3 h) reforming the ionosphere to night conditions takes place. The effects of magnetic disturbance, solar flare and the peculiarities of ionosphere behaviour during sunrise period, that were being imposed on the ionosphere response to the solar eclipse, are also discussed.

УДК 528.8(15):629.78

Е. І. Кузнєцов, В. П. Зубко, С. В. Заяць

Національне космічне агентство України, Київ

Міжнародна координація діяльності 3 супутникового спостереження Землі

Надійшла до редакції 05.12.03

Приведені цілі, принципи, організаційна структура і напрямки діяльності Комітету супутникового спостереження Землі (CEOS), як головної міжнародної організації, що координує цю важливу сферу космічних досліджень і технологій.

ВСТУП

Питання стану та майбутнього планети Земля як складної системи взаємопов'язаних середовищ, процесів і явищ завжди знаходилося в центрі уваги світової громадськості. Особливо актуальними є дослідження глобальних змін, які відбуваються на нашій планеті в останнє десятиліття, і характеризуються підвищеннем техногенного впливу на навколошне природне середовище, збільшенням втрат від катастрофічних та не передбачених завчасно гідрометеорологічних явищ і таке інше.

З методичної точки зору філософських і технічних принципів відомо, що для повного та об'єктивного дослідження системи необхідно вийти за її межі, а саме це і зумовлює принципово важливу роль використання космічного простору в дослідженнях процесів і явищ, які відбуваються на Землі.

Значення космічної діяльності для соціально-економічного та культурного розвитку людства підтверджується багатьма аспектами і на найвищих рівнях. Так, на III конференції ООН з дослідження та мирного використання космосу (UNISPACE III), що проходила в 1999 р. у Відні (Австрія), було прийнято декларацію про космос та розвиток людства. У ній зокрема зазначено, що космічні дослідження і використання космосу мають важливе значення для фундаментальних знань про Всесвіт, освіти, здоров'я, моніторингу довкілля, управління природними ресурсами та надзвичайними ситуаціями, метеорологічного прогнозування і моделювання клімату, супутникового зв'язку та навігації.

На Всесвітньому форумі зі сталого розвитку, який проходив на найвищому рівні у Йоханнесбурзі (ПАР) в 2002 р., також відзначалося, що не може бути сталого розвитку без достовірної інформації про стан Землі та навколошнього середовища. Космічні апарати для спостереження Землі є первинним, а у багатьох випадках і єдиним джерелом даних для наукових досліджень, широкого кола оперативних, політичних та комерційних використань, таких як управління прісноводними ресурсами, вдосконалення розуміння глобального вуглецевого циклу, моніторингу міжнародних договорів з навколошнього середовища.

На Третій українській конференції з перспективних космічних досліджень, що проходила у вересні 2003 р. в Кацивелі (Крим) і в якій брало участь близько 250 вчених та фахівців, також підкреслювалась важливість використання аерокосмічних дистанційних методів для вирішення багатьох задач в нашій державі. Особливо це стосується моніторингу та ефективного використання сільськогосподарських, лісових та морських ресурсів, захисту довкілля і попередження надзвичайних ситуацій.

З метою міжнародної координації цивільних космічних програм для спостереження і дослідження нашої планети у 1984 р. був створений Комітет супутникового спостереження Землі (CEOS — Committee on Earth Observation Satellites). Об'єднавши 43 космічні агентства, інші національні та міжнародні організації, CEOS став головним міжнародним форумом для узгодження програм супутниковых спостережень Землі, а також взаємодії цих

програм з користувачами дистанційних даних і всесвітніми інформаційними ресурсами. Координаційна роль цього комітету також важлива для багатьох інших міжнародних ініціатив, насамперед партнерства зі стратегії інтегрованого глобального спостереження (IGOS-P), що було започатковане у 1998 р. з метою оптимального узгодження критичних вимог до супутниковых і наземних систем для спостереження Землі.

У листопаді 2003 р. виповнилося десять років, як НКАУ стало членом CEOS, який є найавторитетнішою міжнародною організацією в одному з основних напрямків космічної діяльності — дистанційному зондуванні Землі (ДЗЗ).

ПРИНЦИПИ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ДІЯЛЬНОСТІ CEOS

CEOS був створений за рекомендацією ради експертів з дистанційного зондування Землі з космосу під егідою Міжнаціональної промислової робочої групи з розвитку, технологій та зайнятості і, таким чином, з самого початку забезпечував міжнародну взаємодію та координацію діяльності з супутникового спостереження Землі. Доцільність цього, з одного боку, обумовлена тим, що багато важливих питань ДЗЗ є глобальними за своєю природою і вимагають відповідних рішень, які знаходяться за межами повноважень і ресурсів окремих держав. З іншого боку, є потреба у проведенні великої кількості геофізичних вимірювань з різними просторовими, часовими і метрологічними вимогами, що теж потребує відповідного узгодження. Жодна програма, агентство чи держава не можуть забезпечити всіх вимог до спостережень, що необхідні для вивчення та покращання розуміння нашої планети як цілісної системи.

Комітет супутникового спостереження Землі відіграє важливу роль в цьому питанні шляхом координації, необхідної гармонізації і досягненні максимальної ефективності програм космічних спостережень серед країн, які представлені своїми організаціями. Як видно з табл. 1 і 2, станом на 2003 р. CEOS об'єднує 23 члени, а це більшість світових агентств, що відповідають за цивільні програми супутникового спостереження Землі і 20 асоційованих членів, якими можуть бути:

- державні організації міжнародного чи національного статусу, що розробляють програми супутникових спостережень Землі чи суттєво підтримують програми наземного забезпечення;
- діючі координаційні та наукові групи чи державні установи з міжнародним статусом, що суттєво підтримують діяльність CEOS.

Головними цілями діяльності CEOS визначено:

- отримання максимальної користі від супутникового спостереження Землі шляхом кооперації членів у плануванні запусків (табл. 3, 4) і запровадження сумісності даних, форматів, послуг, результатів та політик;
- бути центром координації міжнародної діяльності з супутникового спостереження Землі;
- узгодження політики і обмін технічною інформацією для підтримки, взаємодоповнення та сумісності систем спостереження і управління даними.

Вищим керівним органом CEOS є щорічне пленарне засідання, яке організовує і проводить один з членів, що по черзі обирається головувати на відповідний рік. Постійно діючим органом комітету, що координує діяльність між пленарними сесіями, є секретаріат, який очолює головуюча організація. До нього входять також представники Європи (ESA), США (NASA/NOAA) і Японії (STA/NASDA). При цьому ESA відповідає за довідник CEOS, базу даних та щорічний бюллетень, NASA — за щорічну консолідовану доповідь, а STA/NASDA — за інформаційні листи і брошури.

Головна діяльність CEOS, структура якого наведена на рис. 1, зосереджена в робочих групах та підрозділах.

Важливим напрямком діяльності CEOS є змінення і поліпшення функціонування механізмів глобального комплексного спостереження за нашою планетою. Одним з таких механізмів є Інтегрована глобальна стратегія спостереження (IGOS — Integrated Global Observing Strategy), що наведена на рис. 2, і яка була започаткована у 1998 році як система партнерства 14 міжнародних інституцій. Стратегія охоплює такі основні напрямки:

- спостереження за океаном;
- глобальний контроль за викидами вуглецю;
- моніторинг хімічного стану атмосфери;
- глобальні гідроцикли;
- геологічні небезпеки;
- коралові рифи.

Основним завданням IGOS є постійний моніторинг і збір даних в зазначені сферах з метою оперативного використання інтегрованої інформації для прийняття практичних рішень та заходів в інтересах суспільства. Стратегія спрямована на використання супутниковых, дрифтерних, наземних технологій і систем спостереження у практичній діяльності, зокрема в таких важливих сферах, як прогнозування кліматичних змін, геологічних та гідрологічних процесів і попередження їхніх можливих негативних наслідків, сільському та лісному господарствах, морському, рибному господарстві,

Таблиця 1. Члени CEOS

ASI	(Agenzia Spaziale Italiana) — Космічне агентство Італії
BNSC	(British National Space Centre) — Британський національний космічний центр
CAST	(Chinese Academy of Space Technology) — Китайська академія космічних технологій
CNES	(Centre National d'Etudes Spatiales) — Національний центр космічних досліджень, Франція
CONAE	(Comision Nacional de Actividades Espaciales) — Національна комісія з космічної діяльності, Аргентина
CSA	(Canadian Space Agency) — Космічне агентство Канади
CSIRO	(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) — Незалежна організація наукових і промислових досліджень, Австралія
DLR	(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt) — Німецький аерокосмічний центр
EC	(European Commission) — Європейська Комісія (Австрія, Бельгія, Великобританія, Греція, Данія, Ірландія, Іспанія, Італія, Люксембург, Нідерланди, Німеччина, Норвегія, Португалія, Франція, Швеція)
ESA	(European Space Agency) — Європейське космічне агентство (Австрія, Бельгія, Великобританія, Данія, Ірландія, Іспанія, Італія, Нідерланди, Німеччина, Норвегія, Португалія, Фінляндія, Франція, Швеція, Швейцарія, Канада на правах асоційованого члена)
EUMETSAT	(European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites) — Європейська організація з експлуатації метеорологічних супутників (Австрія, Бельгія, Великобританія, Греція, Данія, Ірландія, Іспанія, Італія, Люксембург, Нідерланди, Німеччина, Норвегія, Португалія, Туреччина, Фінляндія, Франція, Швеція, Швейцарія)
INPE	(Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) — Національний інститут космічних досліджень, Бразилія
ISRO	(Indian Space Research Organization) — Індійська організація космічних досліджень
KARI	(Korea Aerospace Research Institute) — Корейський інститут аерокосмічних досліджень
MEXT/NASDA	(Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology / National Space Development Agency of Japan) — Міністерство освіти, культури, спорту, науки і технологій / Національне агентство космічного розвитку Японії
NASA	(National Aeronautics and Space Administration) — Національна адміністрація з аеронавтики та космосу, США
NRSCC	(National Remote Sensing Center of China) — Китайський національний центр дистанційного зондування
NSAU	(National Space Agency of Ukraine) — Національне космічне агентство України
NOAA	(National Oceanic and Atmospheric Administration) — Національна адміністрація з океанології та атмосфери, США
Roshydromet	(Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environment Monitoring) — Російська федерація служба з гідрометеорології та моніторингу навколошнього середовища
Rosaviakosmos	(Russian Aviation and Space Agency) — Російське авіаційно-космічне агентство
SNSB	(Swedish National Space Board) — Національна рада Швеції з космосу
USGS	(United States Geological Survey) — Геологічна служба США

Таблиця 2. Асоційовані члени CEOS

CCRS	(Canada Centre for Remote Sensing) — Канадський центр дистанційного зондування
CRI	(Crown Research Institute) — Королівський дослідний інститут, Нова Зеландія
CSIR	(Satellite Applications Centre (SAC) / Council for Scientific and Industrial Research) — Центр з використання супутників / Рада з питань наукових і промислових досліджень, Південна Африка
ESCAP	(Economic and Social Commission of Asia and Pacific) — Комісія ООН з соціально-економічних питань Азіатсько-Тихookeанського регіону
FAO	(Food and Agriculture Organization) — Організація ООН з питань продовольства та сільського господарства
GCOS	(Global Climate Observing System) — Система глобального спостереження за кліматом, Міжнародна программа
GISTDA	(Geo-Informatics and Space Technology Development Agency) — Агентство з розвитку геоінформаційних і космічних технологій, Таїланд
GOOS	(Global Ocean Observing System) — Система глобального спостереження за океанами, Міжнародна программа
GTOS	(Global Terrestrial Observing System) — Система глобального спостереження за суходолом, Міжнародна программа
ICSU	(International Council for Science Unions) — Міжнародна рада наукових товариств
IGBP	(International Geosphere-Biosphere Programme) — Міжнародна программа з питань геосфери і біосфери
IOC	(Inter-governmental Oceanographic Commission) — Міжурядова океанографічна комісія
IOCCG	(International Ocean Colour Coordinating Group) — Міжнародна координаторська група з дослідження кольору океану
ISPRS	(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) — Міжнародне товариство з фотограметрії і дистанційного зондування
NRSC	(Norwegian Space Centre) — Норвезький космічний центр
OSTC	(Federal Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs) — Федеральна служба з питань науки, техніки та культури, Бельгія
UNEP	(United Nations Environment Programme) — Програма ООН з навколошнього середовища
UNOOSA	(United Nations Office of Outer Space Affairs) — Установа ООН з питань космічної діяльності
WCRP	(World Climate research Programme) — Всесвітня програма з дослідження клімату, ООН
WMO	(World Meteorological organisation) — Всесвітня метеорологічна організація, ООН

Таблиця 3. Полярно-орбітальні супутники для спостереження Землі

Закінчення табл. 3.

Супутники	Роки									Цільове призначення				
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	атмо-сфера	суходіл	моря, океани	снігове та льодове покриття	гравітаційні поля
HypSEO	ÉÉÉÉ ÉÉÉÉÉÉÉÉ									*				
CRYOSAT	△△△ △△△△△△△△△△△△									*			*	
Cloudsat	△△△△△△△△△									*				
SAOCOM 1A	△△ △△△△△△△△△△△△△△△△△△									*	*		*	
OCEANSAT-2	ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ									*	*	*		
VCL	△△△△△△△△									*				
ISS	△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△									*				
TERRASAR-X	△△△ △△△△△△△△△△△△△△△△△△△△									*				
NMP EO-3	△△ △△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△									*	*	*	*	
GOCE	△△ △△△△△△△△													*
SSR-1, 2	ÉÉ ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ									*				
METOP 1-3	△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△									*	*	*	*	
BISSAT	ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ										*			
REFIR	ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ										*			
MEGHA TROPIQUES	△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△△									*				
SMOS	△△△△△△△△△△△△△△△△△△										*			
TERRASAR	ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ										*			
VISIR	ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ									*	*	*		
FOURIER	ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ										*			*
ESPERIA	ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ										*			*
RISAT 1	ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ									*	*	*		
NPP	△△△ △△△△△△△△△△△△△△△△△△									*	*	*	*	
PICARD	△△△ △△△△△△△△△△△△△△△△										*			
ADM-Aeolus	△△△△△△△△△△△△△△△△△△										*			
GCOM-A1	ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ										*			
GPM	ÉÉ ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ										*			
ESA FUTURE MISSIONS	ÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉÉ									*	*	*		
NPOESS	△△△△△△△△△△△△									*	*	*		

Умовні позначення: Δ — експлуатуються, \mathbb{E} — створюються

Таблиця 4. Геофізичні та геостаціонарні супутники для спостереження Землі

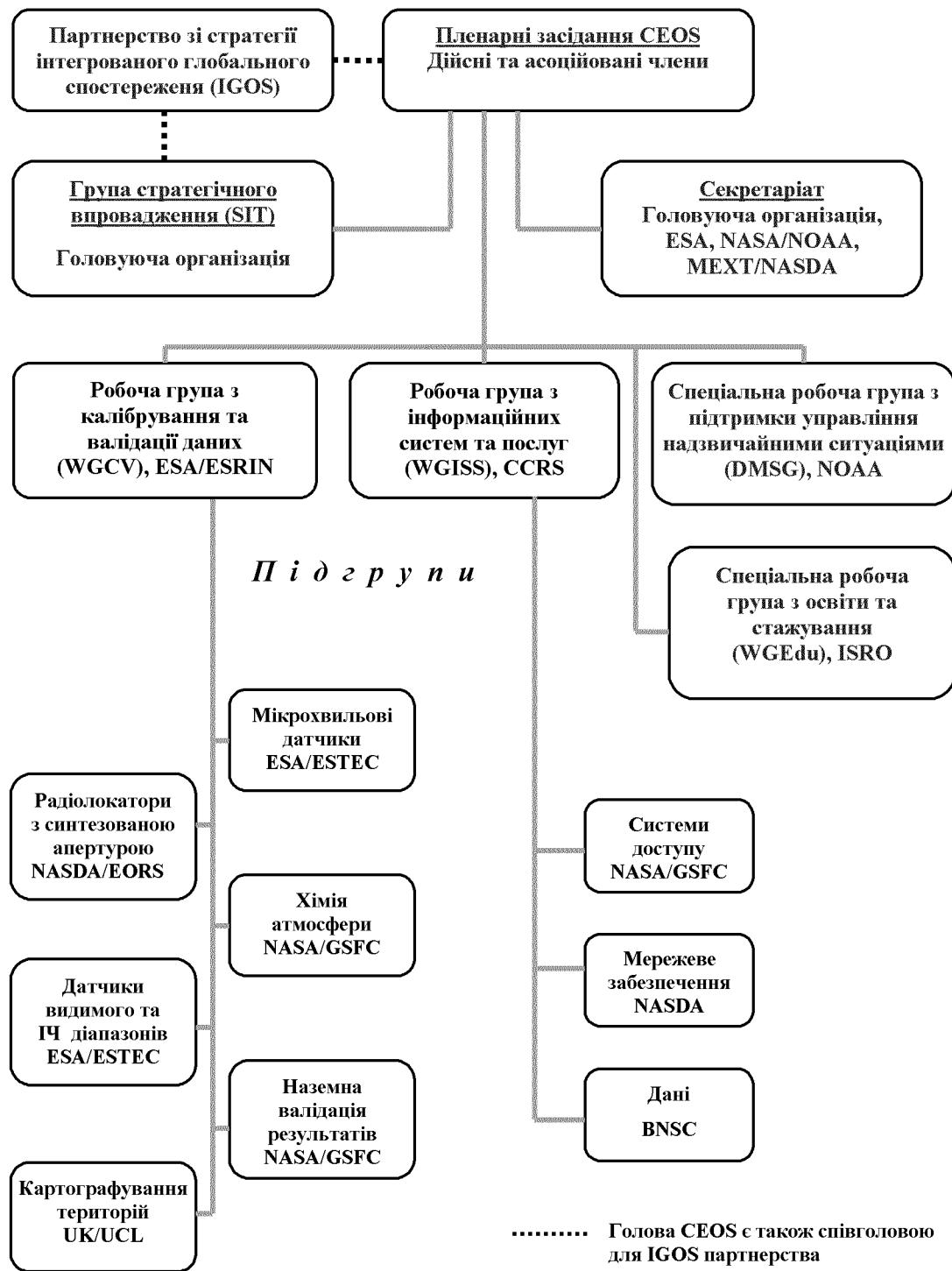


Рис. 1. Структура Комітету супутникового спостереження Землі (CEOS)

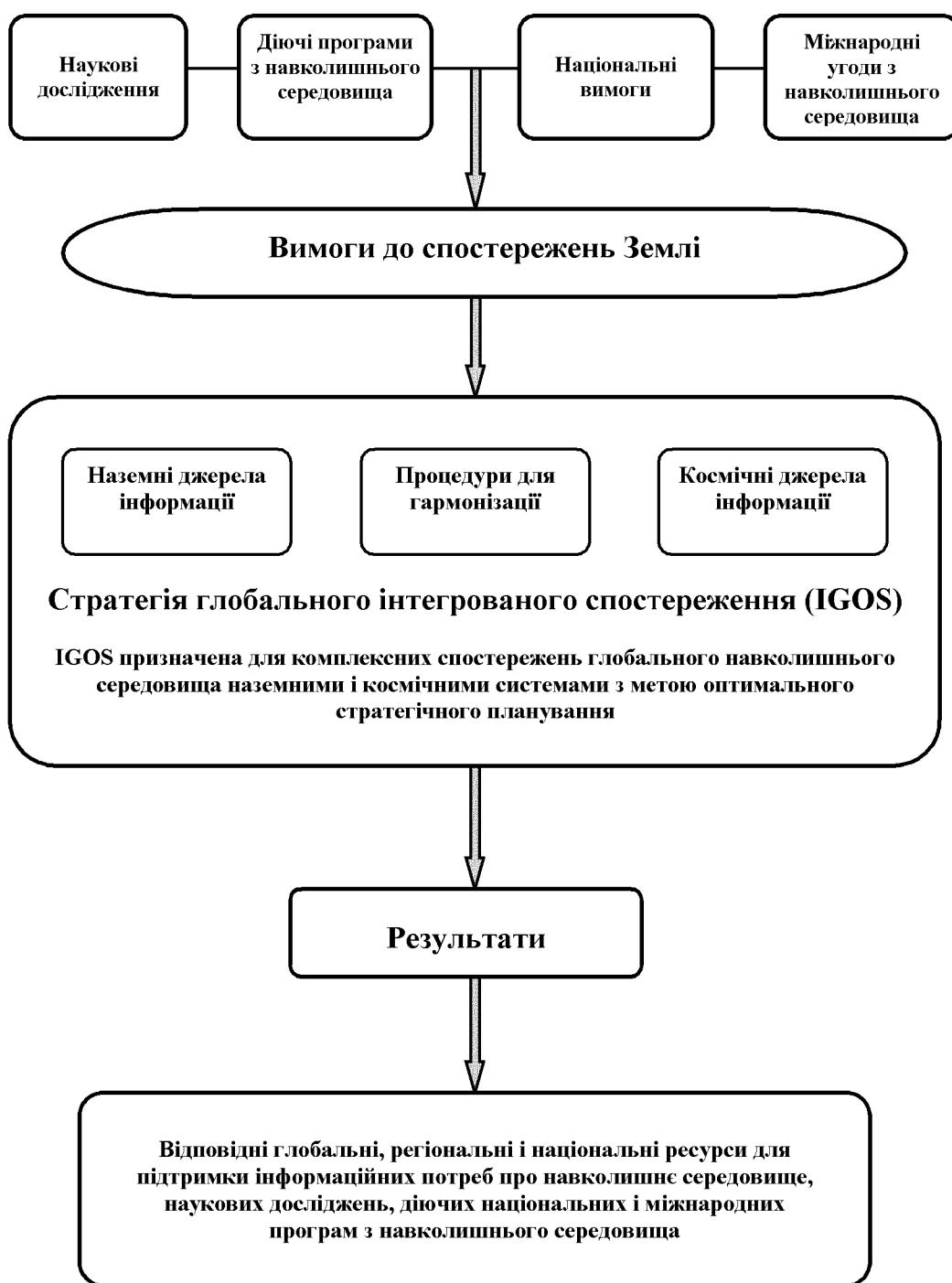


Рис. 2. Концепція IGOS

охороні здоров'я тощо. В рамках згаданої стратегії здійснюється цілий ряд спільних проектів ЮНЕСКО в галузі гідрології, геології, екології, океанографії. Важливим питанням є забезпечення доступу до інформації і даних IGOS країн, що розвиваються, та її ефективного прикладного використання.

Завдяки моніторингу кліматичних змін, геологічних і гідрологічних процесів вдалося спрогнозувати деякі природні явища і мінімізувати їхні негативні наслідки, наприклад повені в Німеччині у 2000 р., феномен Ель-Ніньо та інші. На базі цих прогнозів були вжиті оперативні заходи, що дозволили мінімізувати наслідки затоплень в Німеччині та тихоокеанського узбережжя країн Америки і Азії. Основна увага звертається на прикладне застосування результатів спостережень та зібраних даних. Наприклад, останнім часом досягнуто позитивних результатів у застосуванні космічних технологій в галузі епідеміології. Завдяки спостереженням і дослідженням був встановлений зв'язок між феноменом Ель-Ніньо/Аль-Ніньо та активізацією деяких захворювань і епідемій, викликаних комахами та бактеріями-збудниками.

В рамках IGOS Європейське космічне агентство співпрацює з ЮНЕСКО у реалізації спостережень за біосферними та природними заповідниками, а також моніторингу і збереження пам'яток всесвітньої спадщини. Наприклад, проводиться постійне спостереження за багатьма природними ресурсами Африки, а також за зміною рівня води у Венеції з метою аналізу і вироблення рекомендацій і вжиття практичних заходів для збереження цього міста — унікального культурного надбання людства.

Здійснюється спільна діяльність IGOS/ЮНЕСКО в галузі океанографії, зокрема в рамках Міжурядової океанографічної комісії (МОК). Успішно здійснюється цілий ряд проектів в галузі кліматології, захисту і управління морськими екосистемами (зокрема прибережними зонами), збереження ресурсів океану, навігаційної безпеки. Завданням, що постає сьогодні, є інтеграція даних всіх модулів GOOS (супутникові, дрифтерні, корабельні, наземні технології та системи) в єдину інтегровану систему даних та вироблення ефективних механізмів їхнього широкого прикладного використання.

IGOS сприяє вирішенню проблем водних ресурсів шляхом комплексного аналізу глобальних спостережень і створення інтегрованої системи моніторингу та управління водними ресурсами, як наземними, так і підземними, а також гідроекологічними системами. Актуальним питанням є застосування глобальних досліджень і даних в інтересах конкретних країн та регіонів, зокрема спільні зусилля з метою збереження і раціонального використання водних

ресурсів у контексті Міжнародного року прісної води (2003 рік).

Важливою складовою діяльності в галузі попередження геологічних небезпек і ризиків (землетруси, вулкани, зсуви тощо) є прогнозування георизиків, тобто визначення зон ризику і оцінка ступеня їхньої вразливості з метою вжиття заходів із попередження та мінімізації наслідків можливих катастроф. Останнім часом почала активно формуватися загальна міжнародна система швидкого реагування та надання допомоги населенню, що потерпіло внаслідок природних катастроф. Важливим завданням є зміцнення цієї системи.

В рамках IGOS функціонує також глобальна система спостереження і контролю за хімічним станом атмосфери, зокрема за викидами вуглецю.

Таким чином, партнерство з IGOS розглядається як об'єднання трьох глобальних систем спостереження (океану, суші і клімату) під егідою CEOS разом із FAO, ICSU, IOC-UNESCO, WMO за участю міжнародних агентств-спонсорів (IGBP, WCRP, IGFA).

Спостереження за океанами віднесено до пріоритетів, що обумовлені наступними чинниками:

- впливом на клімат та цикли води і енергії;
- використанням океанів як джерела харчових ресурсів;
- забезпеченням навігації і глибоководних комунікацій;
- регулюванням антропогенного навантаження на прибережну зону і використанням рекреаційного потенціалу;
- надійним і оперативним отриманням даних за допомогою супутниковых спостережень (температури поверхні, рівня моря, приводного вітру, кольору води);
- діючою ефективною міжнародною політикою щодо глобальної океанічної системи спостереження (угоди про моря, кліматичні зміни, біорозмаїття і таке інше).

На теперішній момент досягнуто істотного прогресу у здійсненні спостереження океану. Такі експерименти, як WOCE і початковий етап GOOS були виконані завдяки координації багатьох зусиль, що спонсорувалися IOC, WMO, ICSU, UNEP, FAO, CEOS. Планується серія нових проектів, серед яких глобальний океанічний експеримент з асиміляцією даних (GODAE), схвалений групою стратегічного запровадження (SIT) CEOS, а також запропонований міжнародною координаційною групою з кольору океану (IOCCG) океанічний біологічний проект, метою якого є реалізація стратегії пізнання біогеохімічних процесів в океані і його екосистемі. Результатом цих проектів повинно ста-

ти створення інтегрованої системи контактних морських і дистанційних супутниковых компонентів системи спостереження. В організаційному плані багато країн створюють національні комітети GOOS. Актуальною проблемою поточного моменту є продовження довгострокових океанічних спостережень і розвиток нових технологій спостережень та методів прогнозу стану морського середовища за допомогою супутників RADARSAT, ERS/ENVISAT, Aqua, ICESAT.

Роботи, що виконуються НКАУ за розділом «Дистанційне зондування Землі» Загальнодержавної (Національної) космічної програми України, також спрямовані на підтримку стратегії інтегрованого глобального спостереження Землі і тісну міжнародну взаємодію у використанні даних діючих та створюваних систем спостереження Землі різного рівня. У бюллетені CEOS «Towards an Integrated Global Observing Strategy» («В напрямку до стратегії інтегрованого глобального спостереження») увійшли надані НКАУ матеріали з розділу ДЗЗ космічної програми України.

Слід відзначити, що українські супутники «Січ-1», «Океан-О», «Січ-1М» включені в усі категорії вирішуваних задач. А саме: дослідження атмосфери — 4 задачі (всього 10), земної поверхні — 2 задачі (всього 6), океану — 4 задачі (всього 6), льодового та снігового покриву — 3 задачі (всього 3).

Це — визнання найавторитетнішим міжнародним комітетом з питань ДЗЗ важливості і доцільності створення та експлуатації космічної системи спо-

стереження Землі «Січ» як складової інтегрованої системи глобального спостереження, а також Європейської програми глобального моніторингу навколошнього середовища та безпеки (GMES).

1. Космічне право України: Збірник нормативно-правових актів та міжнародних угод / Відп. ред. О. О. Негода, Ю. С. Шемщученко. — Київ: Видав. Дім «Ін Юр», 1999.—264 с.
2. CEOS Annual Report.—2002.
3. Earth Observation Handbook, CEOS. — 2002.
4. CEOS Newsletter. — 2002.—N 18, 19.
5. IGOS. For the Monitoring of our Environment from Space and from Earth. — 2002.—January.
6. Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP) Newsletter. — 2002.—N 1, 2.
7. Resources in Earth Observation. — 2000.—CEOS CD-Rom.—Rev. 3.
8. Towards an Integrated Global Observing Strategy // CEOS Yearbook, 1997.
9. Coordination for the next decade // CEOS Yearbook, 1995.
10. Зубко В. П., Іськов П. Я., Подолюк І. Я., Стефанишин Я. І. Огляд стану та тенденцій розвитку дистанційного зондування Землі // Космічна наука і технологія.—1998.—4. № 5/6.—С. 67—87.

INTERNATIONAL ACTIVITY COORDINATION OF SATELLITE EARTH OBSERVATIONS

E. I. Kuznetsov, V. P. Zubko, S. V. Zaiats

We consider aims, principles, structure and activity directions of the Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) as the main international organization for the coordination of the space research and technology area.

Таблиця 5. Список скорочень

CEOS	Комітет супутникового спостереження Землі	IGFA	Міжнародна група фінансових агентств для дослідження глобальних змін
CEOP	Програма координації довгострокових спостережень	IGOS	Стратегія інтегрованого глобального спостереження
DMSG	Спеціальна робоча група з підтримки управління надзвичайними ситуаціями	SIT	Група стратегічного впровадження (CEOS)
ESRIN	Європейський інститут космічних досліджень	UCL	Лондонський університецький коледж
ESTEC	Європейський центр космічних досліджень та технологій	WGCV	Робоча група з калібрування та валідації (затвердження) даних
EORC	Дослідний центр спостереження Землі (Японія)	WGEdU	Спеціальна робоча група з освіти та стажування
GOFC	Проект з глобальних спостережень за лісами	WGISS	Робоча група з інформаційних систем та послуг
GSFC	Центр космічних польотів ім. Годдарда (NASA)		

Rekha Agarwal Mishra¹, Rajesh K. Mishra²

¹Govt. Autonomous Model Science College, Jabalpur (M. P.) India 482 001

²Tropical Forest Research Institute, Jabalpur (M. P.) India 482 001

Semi-diurnal variation in cosmic ray intensity under different geomagnetic conditions

Received 11.12.2004

A new concept of data analysis is attempted for studying the long/short term daily variations in cosmic ray (CR) intensity recorded with neutron monitors/meson telescopes. Fourier technique was applied on four different groups of days chosen according to their different geomagnetic conditions. The selected groups are 60 quietest days (60 QD), 120 quiet days (120 QD), continuous quiet days (CQD) and all days (AD) in a year. CQD is a new set of days selected on the basis of A_p and K_p values. These are the days when transient magnetic variations are supposed to be regular and smooth continuously for a span of at least three days. The criterion of selection is based upon the mathematical manipulation with A_p index. The data of Deep River neutron monitoring station are used for the period 1985—1995 to investigate, for a comparative study, the semi-diurnal anisotropy in CR intensity on 60 QD, 120 QD, CQD and AD. It is observed that 60 QD are most suitable to the anisotropic studies on short/long term basis. The time/spatial variations in the amplitude and phase of the semi-diurnal anisotropy become more pronounced for 60 QD for the period under investigation.

INTRODUCTION

Cosmic ray intensity exhibits a daily variation composed of a prominent diurnal component and also a semi-diurnal component of lesser amplitude. CR intensity observed on the ground is subject to the solar semi-diurnal variation of extraterrestrial origin [31]. The existence of CR anisotropy in the interplanetary medium is direct consequence of the modulation produced by the Sun. Studies of the solar semi-diurnal variation have been made by many authors [4, 16, 17] to obtain information on solar modulation in various conditions of heliosphere.

Ahluwalia [4] has found the semi-diurnal variation to be more prominent at equatorial locations. The dependence of the semi-diurnal variation on the median asymptotic latitude λ_m of viewing of the detector is given by $\cos^2 \lambda_m$, independent of the primary rigidity [8]. Ables et al. [1] pointed out that the direction of maximum of the semi-diurnal component in free space is nearly perpendicular to the average direction of the interplanetary magnetic field (IMF). Agrawal [2] has reported some of the salient features of semi- and three-diurnal variations of CR. It has been found that the amplitude reduces roughly

by a factor of 4 to 5 each time as one advances to higher harmonics when logarithmic scales are used to represent Fourier analysed average amplitude and phase. The mean amplitude of the semi-diurnal variation [36] associated with geomagnetically disturbed days is observed smaller than on geomagnetic quiet days. Further, on geomagnetic disturbed days the solar daily variation is only diurnal in character and semi-diurnal variation is significant only on geomagnetic quiet days. The low average amplitude of the semi-diurnal variation [4] on geomagnetically disturbed days compared with geomagnetically quiet days is primarily due to the large variability of the time of maximum of the semi-diurnal variation on disturbed days.

Agrawal [3] and Bieber and Evenson [12] have preferred to investigate the daily variation in CR intensity on long/short term basis performing the analysis for AD in a year, whereas Kumar et al. [24] have studied long/short term daily variation on geomagnetically 60 QD. Jadhav et al. [22] found that the semi-diurnal amplitude remains high during high amplitude anisotropic wave trains and contributes significantly on such days. Nigam et al. [30] have calculated the average value of amplitude and phase

of semi-diurnal variation for positive sector group, negative sector group and mixed polarity group. Sabbah [35] calculated the diurnal variation for days with high, intermediate and low interplanetary magnetic field (IMF) magnitude. Thus, a question arises as to what type of days will be more suitable for performing long/short term analysis of CR intensity. Therefore, apart from AD and 60 QD, two more types of days, i. e., 120 QD and CQD, have been considered for the comparative studies of semi-diurnal anisotropy over a period of 11 years. An attempt was made to study the variational features of semi-diurnal time of maximum and its amplitude on different groups of days selected under different criteria depending on A_p values.

Ballif et al. [10] correlated K_p and A_p with the mean fluctuations in amplitude of IMF, which in turn is related to diffusive component of convection-diffusion theory. A_p is also found to be related with solar wind velocity, which is related to convective component of convection-diffusion theory. The semi-diurnal variations are produced by the diffusion and convection of cosmic rays in the interplanetary space [26]. The amplitude of semi-diurnal variation is found to be proportional to the solar activity [19]. Ahluwalia [5], on the long term behaviour of the three harmonics of cosmic ray daily variation, showed that although a high degree of year to year variability exists, a trend with solar activity is evident. A significant semi-diurnal variation for the period 1953–1992 has been observed [8], although its amplitude and phase change from year to year.

EXPERIMENTAL DATA AND THEIR ANALYSIS

The pressure corrected data of Deep River Neutron Monitor (NM) (cutoff rigidity = 1.02 GV, latitude = -46.1° N, longitude = 282.5° E, altitude = 145 m) has been subjected to Fourier analysis for the period 1985–1995 after applying the trend correction. A detailed comparative study of semi-diurnal anisotropy in CR intensity on four different groups of days selected under different criteria based on the values of A_p index has been performed over a period of one solar activity cycle (SAC). Thus, the data are analysed for four different phases of solar cycle, such as solar minimum activity period (1986), ascending phase of SAC (1988), solar maximum period (1991) and descending phase of SAC (1995). The days with extraordinarily large amplitude, if any, have not been taken into consideration. While performing the analysis of the data all those days are discarded having more than three continuous hourly data

missing. For the purpose of study four groups of days are selected as follows:

(i) **All days:** This means all the 365/366 days in a year. The days are termed as AD.

Quiet days: Days on which the transient magnetic variations are regular and smooth, are said to be magnetically quiet or calm or Q days. The criterion of selection is based upon A_p and K_p values. There are two types of Q days:

(ii) **60 Quiet days:** According to solar geophysical data (SGD) five quietest days in a month are selected. These days are called the International quiet-quiet-days or QQ days. Thus, 60 Q days in a year; termed as 60 QD.

(iii) **120 Quiet days:** First ten Q days in a month. Thus, 120 Q days in a year; termed as 120 QD.

(iv) **Continuous quiet days:** 60/120 quiet days selected are discrete and scattered all over in a year's span of 365 days. In many cases the quiet days are preceded or followed by the days having larger values of geomagnetic disturbance index. Such days may be disturbed days. To avoid such days and to get a set of days having values of A_p index low continuously at least for three days, a group of days called continuous quiet days (CQD) is being selected [23].

RESULTS AND DISCUSSION

The values of amplitude (A , %) and phase (P , hrs) of the semi-diurnal anisotropy of CR intensity obtained on a day to day basis for 60 QD, 120 QD, CQD and AD in a year were plotted histographically for all the four phases of solar activity cycle (SAC), i. e., ascending phase of SAC, solar maximum period, descending phase of SAC and solar minimum. One of them is shown in Fig. 1, drawn for the year 1986 which corresponds to solar minima for the 22nd solar cycle. It is observed that during the year 1986 the prominent peak of the phase lies in the same interval of 03 ± 01 hr for all the four groups of days. The sharpness of the prominent peak is maximum in case of 60 QD.

Considering the semi-diurnal amplitude for the year 1986, almost 80 % distribution is confined to a very narrow interval of 0.00–0.16 % for all the four groups of days but the height of the peak is maximum in case of 60 QD. As the level of the solar activity is low, the trend for the distribution of amplitude remains the same for all the four groups. It is observed that the general trend as shown by the distribution for the phase and amplitude for all the four types of days is quite comparable. The distribution in most cases is sharper in case of 60 QD,

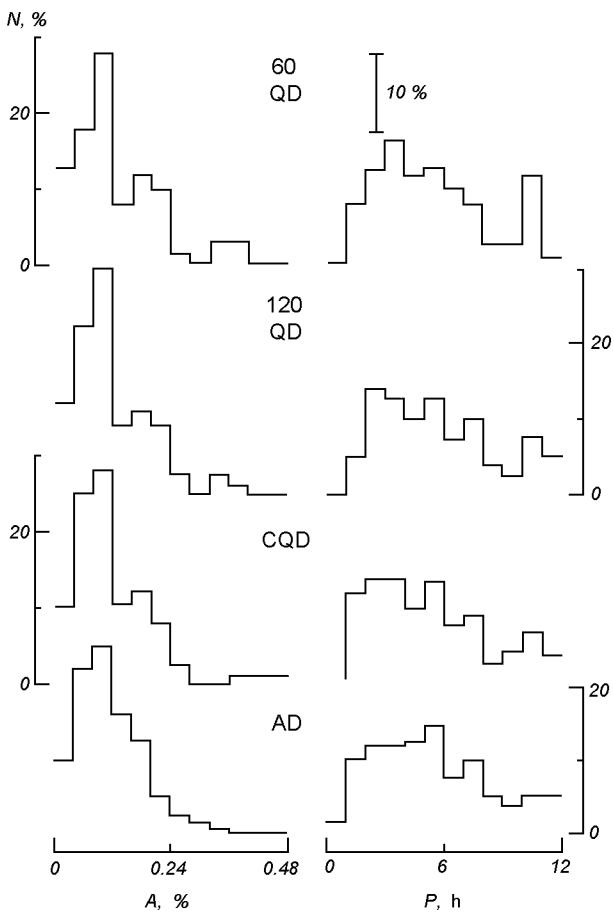


Fig. 1. The occurrence of days (N , %) plotted histogrammatically for the amplitude (A , %) and phase (P , hrs) of the semi-diurnal anisotropy in CR intensity during 1986 for 60 QD (a), 120 QD (b), CQD (c) and AD (d)

whereas some of the finer features of anisotropic variations are suppressed in AD. In some cases sharper peaks are also seen in case of CQD, as of sustained quiet conditions and small deviations on a day-to-day basis are suppressed. Fig. 2 shows the annual average values of semi-diurnal phase (hrs) in LT and amplitude (%) at ground during the period 1985–1995 for Deep River Neutron Monitor. In all cases the height of the legend represents twice the error contained in the values represented. The plots in Fig. 2, a show that the general trend shown by all the four types of days considered for analysis is quite comparable. However, some statistically significant deviations irrespective of the level of solar activity during some of the years are noticeable particularly on 60 QD, 120 QD or CQD, when compared with AD, which is more clearly observable during the year

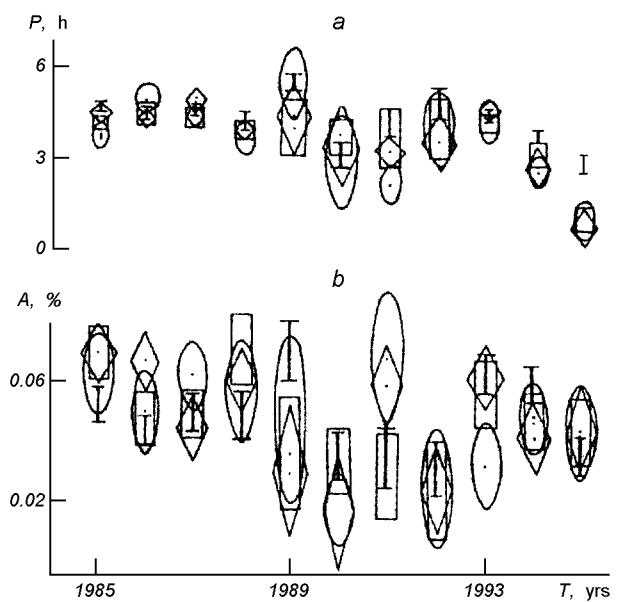


Fig. 2. The annual average values of phase P , hrs in LT (a) and amplitude A , % (b) at ground for the semi-diurnal anisotropy during the period 1985–1995 plotted for 60 QD (ellipses), 120 QD (crosses), CQD (diamonds) and AD (vertical bars). Height of the legend represents twice the error contained in the values

1995. From the semi-diurnal amplitude plots shown in Fig. 1, b, it is observable that the general trend shown by all the groups of days considered for analysis, are same within the statistical errors. It is observable that during the year 1988 the value of semi-diurnal amplitude in case of 120 QD is statistically different from that obtained for AD. During the year 1991, the semi-diurnal amplitude is statistically slightly higher for 60 QD as compared to 120 QD, whereas during 1993 the value of semi-diurnal amplitude is low in case of 60 QD. The statistical errors contained in the value of semi-diurnal amplitude for all four type of cases are observed to increase with the increase in the level of solar activity; however, during 1995, the error in case of 60 QD has slightly increased. During the entire period of investigation, statistical errors in case of AD have been observed to be low in comparison to 60 QD, 120 QD and CQD, which agrees well with the fact that the statistical errors for similar distributions decrease with increase in number of data.

The vector addition plots of semi-diurnal anisotropy for four different types of days for the period 1985–1995 are shown in Fig. 3. The general trend in the year to year variation of the phase of semi-diurnal anisotropy is almost alike consistently throughout the

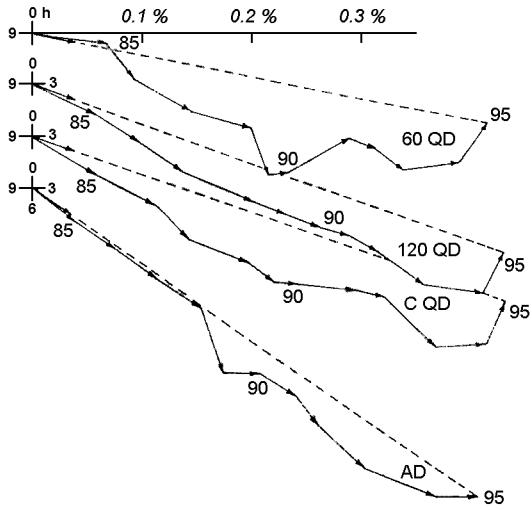


Fig. 3. Vector addition diagram of the semi-diurnal anisotropy for different types of days for the period 1985–1995

period under consideration. However, the phase of semi-diurnal anisotropy has shown a shift towards later hours during the year 1989, in case of 60 QD and AD and to some extent for CQD as well. This could be because of the abrupt increase in the average value of A_p index [2, 25, 37]. Further, the changes in the semi-diurnal anisotropy observable during the period 1992–1995 are most prominent in case of 60 QD, followed by CQD and 120 QD, whereas these changes are suppressed in AD. This could be either due to increased statistical error for different types of days during 1995 as compared to years 1993 and 1994. Furthermore, the phase has shown a significant shift to early hours, which is observable particularly on 60 QD followed by CQD and 120 QD as the solar activity approaches to its minimum level of SAC-23 during the year 1995. The phase of the semi-diurnal anisotropy has significantly shifted to earlier hour during 1990–1991 and 1995. The phase shifted to later hours during 1986. It is further observable that, during CR maximum of 1986, the polarity of SPMF is negative in NH, whereas it is positive during CR intensity maximum/solar activity minimum of 1995. Semi-diurnal variation has solar cycle dependence and it also depends on the polarity state of the polar magnetic field of the Sun, i. e. the variation changes its phase for the transition of the polarity state from positive to negative or vice versa, which occurs every epochs of the maximum solar activity [29]. According to the theoretical investigation by Munakata and Nagashima [26] the polarity dependence of the phase

change has been interpreted as a result of the change of the CR density distribution in space caused by the difference of CR drift motion in the positive and negative polarity states. Nagashima and Fujimoto [28] pointed out that semi-diurnal harmonic vectors suddenly change their relative configuration from a proper type to another on the harmonic dial for the polarity reversal of the polar magnetic field of the Sun from positive to negative state. They pointed out the existence of polarity dependence in the rigidity spectrum of the semi-diurnal variation. The state is defined as positive when the magnetic field is away from the Sun at the north pole and toward the Sun at the south pole, while it is called negative when the polar magnetic fields are reversed. The spectrum of semi-diurnal is reported to be harder in negative state than that in the positive state.

A clear dependence of the three harmonics on the magnetic polarity of the heliosphere during the 1970's and 1990's when the magnetic polarity of the heliosphere is positive in NH has been pointed out by Munakata et al. [27]. The phases of the first three harmonics have significantly shifted towards earlier hours than those during 1980's when the polarity of heliosphere is negative in NH. Duldig [14], using the data from underground Mawson telescope for the period 1973–1989, observed that the solar semi-diurnal variation is remarkably constant throughout the solar polarity reversal of cycle-21. Thus, this confirms that the semi-diurnal anisotropy changes only at low rigidities with the solar polarity reversal but the higher rigidity spectrum remains constant [28]. Potgieter et al. [32] pointed out that during the periods when northern hemispheric field points towards the Sun, positively charged particles will flow from the ecliptic towards the solar poles, leading to decrease in intensities of positively charged particles observed near the Earth and hardening the primary spectra of particles to which neutron monitors respond. When the southern hemispheric field point towards the Sun, the particles flow towards the ecliptic and near the Earth intensities are increased and the spectra are softened.

The overall variation in the amplitude of semi-diurnal anisotropy for the period under consideration is comparable for different types of days. During the years 1989 and 1991, the semi-diurnal amplitude is observed to be high for different types of days except for 120 QD with the increase in the value of A_p index during the year. During the year 1990 the amplitude is observed to be reduced; where the value of the A_p index is relatively low. On the contrary, during the year 1995 where the average A_p index is further lowered, the amplitude is observed to be larger for

different types of days. This brings out the fact that semi-diurnal amplitude although depends on the A_p index value, i. e., level of solar activity, however, this is not the only deciding factor. A_p bears a negative correlation with GCR intensity [6]. Bartels [11] considered A_p to be a measure of the geoeffectiveness of the solar corpuscular emissions (high speed solar wind stream HSSWS). The interaction between HSSWS and the Earth's magnetosphere transfers a vital information to the magnetosphere, which manifests itself in changing the geomagnetic activities as monitored by its geomagnetic indices A_p and a_a [38, 39]. A relationship exists between A_p , HSSWS and the southward component of IMF [13]. High speed solar wind streams occur during the descending phase of solar activity cycles 20, 21 near activity minima. High speed solar wind streams dominate the period 1982–1985 which includes the period when large values of semi-diurnal amplitude are observed. Ahluwalia and Fikani [8] have reported the appearance of HSSWS during the declining phases of SAC-20, 21, i. e., during the years 1973–1975 and 1982–1985. El-Borie et al. [15] observed the low values of solar semi-diurnal variation near the minimum solar activity 1986–1987 while large values are obtained near maximum solar activity 1990–1991. Large amplitudes of solar semi-diurnal variations are observed during declining phases of SAC. Fikani et al. [18] using the Deep River NM data for 1966–1988 observed a broad enhancement in the amplitude for the year 1973 through 1976. Iucci et al. [20, 21] with 33 well defined events of HSSWS found that the semi-diurnal amplitude depends on the Earth's position inside the stream. The present study performed on 60 QD leads to a high value of amplitude of semi-diurnal anisotropy during the year 1985.

The amplitude of the semi-diurnal variation depends upon the primary rigidity [31, 34, 40]. The variational spectrum applicable to semi-diurnal anisotropy may be represented by a double power law, with exponents γ_1 for a range of primary rigidities $R \leq R_p$ and γ_2 for $R > R_p$, R_p being the peak rigidity. Ahluwalia [8] found $\gamma_1 = 0.7 \pm 0.3$ and $\gamma_2 = -0.4 \pm 0.2$. The upper cut-off rigidity, R_c applicable to semi-diurnal anisotropy has higher values near solar activity maxima and low values around solar activity minima. During the epoch when the solar wind speed is high (1982–1985) the value of the upper cut-off rigidity is also high. A close correspondence exists between the magnitude of IMF and the value of R_c and the peak rigidity, R_p . Both exhibit the solar as well as the Hale cycle variation.

Pransky et al. [33], using ionization chamber data for the period 1954–1989, obtained results of decrease in amplitude during 1964, 1976 and 1986, i. e., the years of minimum solar activity. They also noticed the decrease in amplitude during magnetic field inversion of the Sun. Further, it is suggested that the decrease in amplitude during solar activity minimum can be explained by decrease in regular component of the IMF intensity. The reason for decrease in amplitude during magnetic field inversion has been thought to be due to increase of IMF irregularities originated from solar polar coronal holes. On the contrary, Ahluwalia and Fikani [7], using the muon telescope data for the period 1966–1988, observed increase in the amplitude after the epochs of SPMF reversal. The amplitudes are also observed to be smaller when the solar activity is low, which is in agreement with the findings of Pransky et al. [33]. According to Ahluwalia and Fikani [9], the polarity of IMF has no effect on the semi-diurnal anisotropy parameters (amplitude as well as direction) at all primary rigidities.

The amplitude of the semi-diurnal variation depends on the azimuthal direction of arrival of the particles incident at an angle of 45° to the zenith, whereas it is three times larger for the particles coming from south than for those coming from north [16, 17].

CONCLUSION

On the basis of the vigorous analysis of the CR intensity data, the following conclusions are derived:

1. It is concluded that 60 QD are better suited for long/short term studies of semi-diurnal anisotropy. The distribution of phase and amplitude on 60 QD are more regular and some of the variations are observed more clearly.
2. Significant semi-diurnal variation is observed for the entire period of study although its amplitude and phase change from one year to the next.
3. The amplitude of semi-diurnal anisotropy decreases during minimum solar activity and is high during the occurrence of HSSWS.

1. Ables J. G., Mccracken K. G., Rao U. R. // 9th Int. Cosmic Ray Conf. London, 1965, 1.—P. 208.
2. Agrawal S. P. // J. Geophys. Res.—1981.—86.—P. 10115.
3. Agrawal S. P. // Space Sci. Rev.—1983.—34.—P. 127.
4. Ahluwalia H. S. // Proc. Phys. Soc.—1962.—80.—P. 472.
5. Ahluwalia H. S. // 15th Int. Cosmic Ray Conf., Plovdiv, 1977, 11.—P. 298.
6. Ahluwalia H. S. // J. Geophys. Res.—1997.—102.—P. 24229.
7. Ahluwalia H. S., Fikani M. M. // 22nd Int. Cosmic Ray Conf. Ireland, 1991, 3.—P. 461.

8. Ahluwalia H. S., Fikani M. M. // J. Geophys. Res.—1996.—**101**.—P. 11075.
9. Ahluwalia H. S., Fikani M. M. // J. Geophys. Res.—1996.—**101**.—P. 11087.
10. Ballif J. R., Jones D. E., Coleman P. J. // J. Geophys. Res.—1969.—**74**.—P. 2289.
11. Bartels J. // Ann. Geophys.—1963.—**19**.—P. 1.
12. Bieber J. W., Evenson P. // 25th Int. Cosmic Ray Conf. Durban, 1997, 2.—P. 81.
13. Crooker N. U., Gringauz K. I. // J. Geophys. Res.—1993.—**98**.—P. 59.
14. Duldig M. L. // 22nd Int. Cosmic Ray Conf. Ireland, 1991, 3.—P. 437.
15. El-Borie M. A., Sabbah I., Darwish A., Bishara A. 24th Int. Cosmic Ray Conf. Rome, 1995, 4.—P. 619.
16. Elliot H., Dolbear D. W. N. // Proc. of Phys. Soc.—1950.—A 63.—P. 137.
17. Elliot H., Dolbear D. W. N. // J. Atoms. Terr. Phys.—1951.—1.—P. 205.
18. Fikani M. M., Ahluwalia H. S., Singh S., Sabbah I. 22nd Int. Cosmic Ray Conf. Ireland, 1991, 3.—P. 465.
19. Fujii K. // Iono. Space Res. Japan.—1971.—**25**.—P. 242.
20. Iucci N., Parisi M., Storini M. and Villoressi G. // Nuovo Cimento.—1979.—**2C**.—P. 421.
21. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoressi G. // 18th Int. Cosmic Ray Conf. Bangalore, 1983, 3.—P. 354.
22. Jadhav D. K., Shrivastava M., Tiwari A. K., Shrivastava P. K. // 18th Int. Cosmic Ray Conf. Bangalore, 1983, 3.—P. 337.
23. Kumar S., Agarwal Rekha Mishra, Rajesh, Dubey S. K. // 27th Int. Cosmic Ray Conf. Hamburg, 2001.—P. 3966.
24. Kumar S., Shrivastava S. K., Dubey S. K., et al. // Ind. J. Radio and Space Phys.—1998.—**27**.—P. 150.
25. Kumar S., Yadav R. S., Agrawal S. P. 17th Int. Cosmic Ray Conf. Paris, 1981, 10.—P. 226.
26. Munakata K., Nagashima K. // Planet. Space Sci.—1986.—**34**.—P. 99.
27. Munakata Y., Tatsuoka S., Yasues S., et al. // 24th Int. Cosmic Ray Conf. Rome, 1995, 4.—P. 615.
28. Nagashima K., Fujimoto K. // Planet. Space Sci.—1989.—**37**.—P. 1421.
29. Nagashima K., Tatsuoka R., Munakata K. // Planet. Space Sci.—1986.—**34**.—P. 469.
30. Nigam S. K., Mishra K. N., Tiwari D. P., et al. // 18th Int. Cosmic Ray Conf. Bangalore, 1983, 3.—P. 342.
31. Patel D., Sarabhai V., Subramanian G. // Planet. Space Sci.—1968.—**16**.—P. 1131.
32. Potgieter M. S., Moraal H., Rasbenheimer B. C., Stoker P. H. // S. Afr. J. Phys.—1980.—**3**.—P. 90.
33. Pransky I. A., Krivoshapkin P. A., Grigoryev V. C. // 22nd Int. Cosmic Ray Conf. Ireland, 1991, 12.—P. 21.
34. Quenby J. J., Lietti B. // Planet. Space Sci.—1968.—**16**.—P. 1209.
35. Sabbah I. // 26th Int. Cosmic Ray Conf. Utah 1999, 7.—P. 272.
36. Sakido Y., Yoshida S. // Rep. Ionosphere Res. Japan.—1951.—5.—P. 43.
37. Sandstorm A. E. // Cosmic Ray Physics.—1965 North Holland Pub. Co.—1965.—201 p.
38. Schatten K. H., Pensell W. D. // Geophys. Res. Lett.—1993.—**20**.—P. 2275.
39. Schatten K. H., Scherrer P. H., Svalgaard L., Wilcox J. M. // Geophys. Res. Lett.—1978.—**5**.—P. 411.
40. Subramanian G., Sarabhai V. // Astrophys. J.—1967.—**149**.—P. 417.

ПІВДОБОВА ВАРИАЦІЯ ІНТЕНСИВНОСТІ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ У РІЗНИХ ГЕОМАГНІТНИХ УМОВАХ

Реха Агарвал Мішра, Раджеш К. Мішра

Застосовано нову концепцію аналізу даних до вивчення довгота короткочасних добових варіацій інтенсивності космічних променів (КП), зареєстрованих за допомогою нейтронних моніторів і мезонних телескопів. До чотирьох різних груп діб, вибраних відповідно до різних геомагнітних умов, застосовано метод Фур'є. Вибрано такі групи: 60 найспокійніших діб (60 НД), 120 спокійних діб (120 СД), безперервні спокійні доби (БСД) та всі доби (ВД) року. Група БСД являє собою новий ряд діб, вибраних на основі величин A_p та K_p . Це такі доби, протягом яких змінні магнітні варіації, як припускається, є постійними і плавними безперервно для проміжку приналежні у три доби. Критерій вибору оснований на математичних маніпуляціях з індексом A_p . Щоб дослідити (для порівняльного вивчення) півдобову анізотропію інтенсивності космічних променів у групах 60 НД, 120 СД, БСД і ВД, використано дані нейтронного монітора станції Діп Рівер (Deep River) за період 1985—1995 рр. Виявлено, що група 60 НД найбільше підходить для дослідження анізотропії на основі довго- та короткочасових членів. Для дослідження проміжку часові та просторові варіації амплітуди фази для півдобової анізотропії більше проявляються в групі 60 НД.

УДК 551.501.793:510.536

Л. М. Белокриницкая¹, А. В. Белявский², Г. М. Крученицкий³

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка

²Український науково-дослідний інститут гідрометеорологічних досліджень, Київ

³Центральна аерологічна обсерваторія Росгідромету, Долгопрудний, Росія

Украинская национальная система мониторинга УФ-Б-радиации

Надійшла до редакції 17.11.03

На основі аналізу результатів прямих вимірювань розроблено емпіричну модель для розрахунку спектральної щільності УФ-Б-облученості земної поверхні за даними про загальний вміст озону і бал загальної хмарності. Розраховані відповідні кліматичні норми та обґрунтовано методику мапування полів у абсолютних одиницях і відхиленнях від цих норм.

Интерес к мониторингу спектральной плотности энергетической облученности (СПЭО) земной поверхности биологически активным УФ-излучением Солнца обусловлен наблюдавшимися в последние десятилетия изменениями в состоянии озонового слоя Земли. Как известно, атмосферный озон является сильным поглотителем биологически активного УФ-излучения Солнца, к которому относят т. н. УФ-Б-диапазон, т. е. излучение с длинами волн $\lambda = 280\ldots315$ нм. Уменьшение общего содержания озона (ОСО), отмечавшееся в 80—90 гг. прошлого века, породило опасения возрастания уровней СПЭО УФ-Б-радиации до значений, могущих причинить вред здоровью людей, а также состоянию и развитию широкого класса биологических и экологических систем, начиная от сельскохозяйственных злаков и кончая морскими цепями питания. Совершенно очевидно, что на уровнях СПЭО УФ-Б-радиации оказывают влияние три основных фактора: общее содержание озона X , зенитный угол Солнца Z и балл общей облачности (БОБ). Другие факторы, такие как вертикальное распределение озона, микроструктурные и микрофизические параметры облачных частиц, состояние подстилающей поверхности и т. д. на уровнях влияют слабо. Поэтому организация мониторинга СПЭО УФ-Б-радиацией для больших территорий не может основываться на данных прямых инструментальных измерений, так

как пространственная изменчивость облачных полей очень велика, а стоимость приборов для измерения СПЭО весьма высока (~ 100000 долларов США). Прямые измерения в таких условиях могут выполнять лишь контрольные функции, а поля СПЭО должны рассчитываться по значениям параметров, которые легко картируются с помощью наблюдательных средств космического базирования. Такой расчет, как показывают исследования интегральной (по спектру) УФ-Б-облученности [1, 2] может базироваться на эмпирической модели, устанавливающей регрессионную зависимость между УФ-облученностью и перечисленными выше основными параметрами. Для построения такой модели безусловно необходимы данные об ОСО и БОБ, измеренных синхронно с УФ-Б-облученностью.

Станции, данные которых использованы для построения модели

Номер станции (код ВМО)	Название	Период	Широта (N)	Долгота (W)
077	Churchill	1992—2002	58°	94°
021	Edmonton	1992—2002	54	114
084	Halifax	1992—2002	45	64
071	Regina	1995—2002	50	105
024	Resolute	1991—2002	75	95
241	Saskatoon	1991—2002	52	107
083	Toronto	1989—2002	44	79

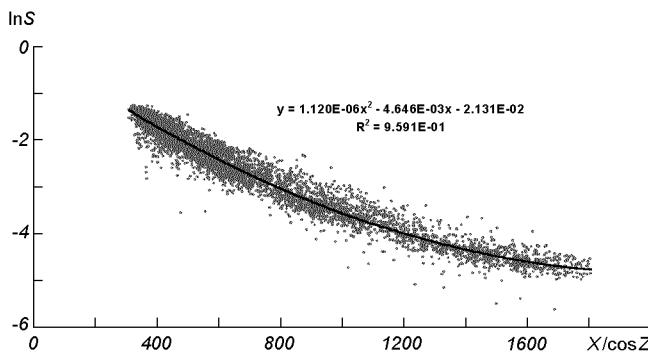


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и модельные (линия) значения СПЭО для общей облачности 1-2 балла и длины волны 315 нм

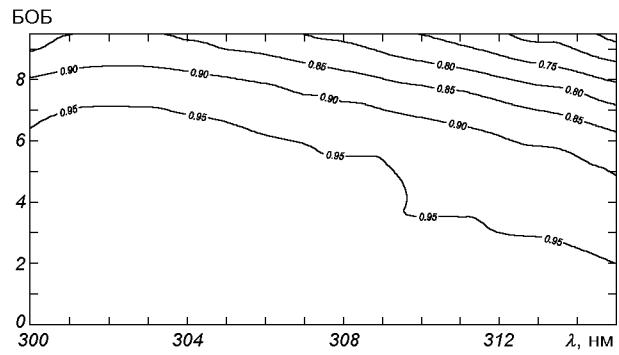


Рис. 2. Зависимость коэффициента детерминации модели от длины волны и балла общей облачности

Мировой центр данных об озоне и УФ-радиации (МЦД ВМО) в Торонто располагает такими данными только для семи станций мировой УФ-метрической сети (см. таблицу). Они были использованы в полном объеме для построения регрессионной зависимости СПЭО (S) вида

$$\frac{\tilde{S}(\lambda)}{S_0(\lambda)} = \exp \left[A(\lambda) \frac{X^2}{\cos^2 Z} + B(\lambda) \frac{X}{\cos Z} + C(\lambda) \right], \quad (1)$$

где $S_0(\lambda)$ — единица измерения СПЭО, (единичная спектральная плотность, имеющая размерность $[m] [t]^{-3} [I]^{-1}$), $\tilde{S}(\lambda)$ — размерное значение СПЭО. Такой вид зависимости был определен из следующих соображений:

- линейные члены в показателе экспоненты соответствуют закону Бугера;
- квадратичный член добавлен для учета эффекта Форбса при больших значениях оптической толщины поглощающего слоя ($X/\cos Z$).

Эмпирические коэффициенты $A(\lambda)$, $B(\lambda)$ и $C(\lambda)$ были рассчитаны методом наименьших квадратов по данным измерений на семи упомянутых станциях для всех значений балла общей облачности с шагом 2 и длин волн $\lambda = 300..315$ нм с шагом 0.5 нм. Дискретность длин волн соответствует спектральному разрешению спектрофотометров Брюера, которыми оснащены станции. Эмпирические модели для длин волн короче $\lambda = 300$ нм не строились из-за слишком малой интенсивности солнечного излучения для широтного пояса, в котором расположены Канада и Украина. Шаг 2 балла по диапазону общей облачности был выбран как по причине низкой точности его визуальных оценок, так и потому, что точность синхронизации данных о БОБ и спектральной плотности УФ-Б-облученности составляла 30 мин, что делало необходимым

вариации БОБ внутри названного временного интервала. Качество аппроксимации результатов измерений формулой (1) для одного из 186 вариантов сочетаний БОБ и длины волны приведено на рис. 1. Приводятся также значения параметров модели и коэффициента детерминации $R^2 = 1 - \sigma_r^2 / \sigma_x^2$, где σ_r^2 — дисперсия остатков, а σ_x^2 — дисперсия исходного ряда. Высокое значение коэффициента детерминации ($\approx 96\%$) показывает, что модель достаточно адекватна.

Эффективность эмпирической модели (1) в целом иллюстрирует рис. 2, на котором изображена зависимость коэффициента детерминации R^2 от длины волны и БОБ. Как и следовало ожидать, коэффициент детерминации уменьшается с увеличением длины волны и балла общей облачности. Это объясняется увеличением влияния главного из факторов, который не был учтен при построении модели — микроструктурных и микрофизических параметров облачности. Учесть этот фактор было в принципе невозможно, так как измерения названных параметров носят эпизодический характер, и получение оперативной информации о них, необходимое для решения мониторинговых задач, вряд ли возможно в обозримом будущем. Вместе с тем из рис. 2 видно, что эффективность эмпирической модели (1) и так достаточно высока, особенно в том диапазоне длин волн и БОБ, где можно ожидать опасно высоких значений СПЭО.

Важным преимуществом построенной эмпирической модели является то обстоятельство, что значения полей обоих параметров, которые необходимы для расчета полей СПЭО, можно оперативно получать практически для любого региона Земли, используя постоянно действующие наблюдательные средства космического базирования. Применитель-

но к общему содержанию озона речь идет об аппаратуре TOMS, которая почти непрерывно функционирует с ноября 1978 г. на борту различных космических аппаратов (последние семь лет на «Earth Probe»). Эта аппаратура, данные с которой практически в реальном времени поступают в интернет (<http://toms.gsfc.nasa.gov>), обеспечивает пользователя информацией о значении ОСО в местный полдень по всему земному шару, исключая область полярной ночи, с пространственным разрешением 1° по широте и 1.25° по долготе и темпом обновления информации 1 сут.

Информация о балле общей облачности может быть получена из изображений земной поверхности видимого и ИК-диапазона, поступающих от геостационарных и орбитальных спутников. Эта информация в обработанном виде (т. е. в виде изображений облачности) имеется на сайте <http://www.sat.dundee.ac.uk./auth.htm>, где обновляется каждые 6 ч. Нами было разработано программное обеспечение, позволяющее оперативно усваивать спутниковую информацию об ОСО и БОБ, рассчитывать, архивировать и визуализировать с временным разрешением одни сутки как поля СПЭО, так и интегральную по спектру энергетическую освещенность в любом поддиапазоне спектрального интервала $\lambda\lambda = 300...315$ нм для любого времени дня. Разумеется, режимы временного интегрирования и усреднения также предусмотрены. В качестве примера на рис. 3 приведен образец соответствующей карты.

Карты абсолютных значений СПЭО позволяют вести ряд медико-санитарных и сельскохозяйственных исследований, например расчет эритемных доз УФ-облученности в курортных зонах или учет

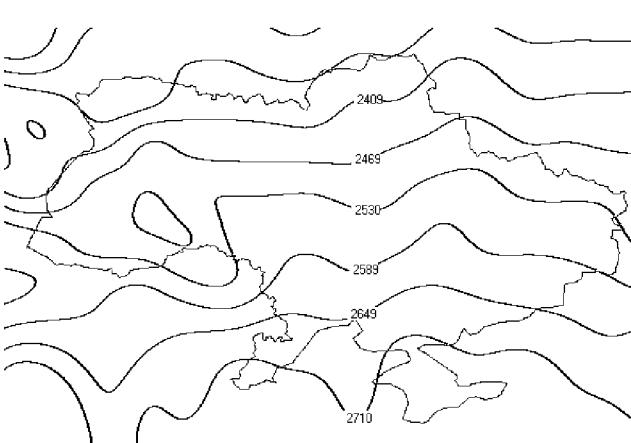


Рис. 3. Образец карты полуденных значений СПЭО на длине волны 315 нм. Значения изолиний приведены в $\text{мкВт}\cdot\text{м}^{-2}\text{нм}^{-1}$

УФ-облученности с/х угодий в период вегетации растений, однако они не дают возможности делать заключение об отличиях конкретных реализаций режимов УФ-облученности от нормы.

По формуле (1) были рассчитаны климатические нормы СПЭО для Украины. Под климатическими нормами мы понимаем средние значения и средние квадратичные отклонения (СКО) следующих величин (для каждого дня года и каждой длины волны):

- СПЭО в местный полдень;
- интегральное (по времени) значение СПЭО за световой день;
- средняя спектральная плотность мощности за световой день.

Для расчета этих величин необходимо было построить климатические нормы как балла общей облачности, так и ОСО для всей территории Украины. Климатические нормы балла общей облачности были заимствованы нами из климатического справочника [3], так как архивы спутниковых изображений поверхности Земли в видимом и ИК-диапазонах, полученных с геостационарных и орбитальных ИСЗ, не являются общедоступными. Расчет климатических норм ОСО был выполнен нами по архиву данных аппаратуры TOMS за период с ноября 1978 г. по октябрь 2002 г. Расчет осуществлялся отдельно для каждой 9×16 ячеек сетки TOMS, приходящейся на территорию Украины, (сетка TOMS покрывает поверхность Земли с шагом 1° по широте и 1.25° по долготе). Ячейки, представляющие собой элемент разрешения аппаратуры TOMS, центрованы на широты $-90^{\circ} + (k + 0.5) \cdot 1^{\circ}$ и долготы $-180^{\circ} + (n + 0.5) \cdot 1.25^{\circ}$, где k — целое число от 0 до 179, а n — целое число от 0 до 287), на основе разложения значений ОСО в ряд Фурье:

$$X(t) = \sum_{k=0}^n a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{365.25} t + \varphi_k\right) + \text{rest}(t), \quad (2)$$

где t — число юлианских дней от начала года, φ_k — фаза k -й гармоники, $\text{rest}(t)$ — сумма отброшенных (статистически не значимых) гармоник. Здесь для каждой из ячеек удерживались только те амплитуды Фурье, которые имеют доверительную вероятность не менее чем 95 % по критерию Стьюдента. В качестве среднего значения для каждого дня принималась сумма ряда Фурье, а в качестве стандартного отклонения — СКО ряда $\text{rest}(t)$. Наличие климатических норм для СПЭО, БОБ и ОСО дает возможность не только обнаруживать аномальные (т. е. отклоняющиеся более чем на 2.5СКО от нормы) значения СПЭО, но и диагностировать их, то есть выявлять причину появления

аномалии, которая может состоять в аномально низких значениях как ОСО, так и БОБ.

Таким образом, были разработаны и программно реализованы алгоритмы построения карт значений СПЭО УФ-Б-облученности территории Украины, а также их отклонений от климатической нормы в абсолютных единицах, процентах и единицах среднего квадратичного отклонения (СКО) по данным измерений общего содержания озона и облачного покрова с космических платформ («Earth Probe» и «Meteosat»). Полученные результаты позволяют оперативно осуществлять мониторинг СПЭО территории Украины, надежно обнаруживать и диагностировать возникающие аномалии и своевременно оповещать о них население и органы государственного управления.

Кроме того, используя возможности национальной системы можно, опираясь на результаты наземных измерений БОБ, провести исследования долговременных изменений СПЭО и выделить относительный вклад в эти изменения аномалий ОСО и БОБ.

1. Белявский А. В., Грищенко В. Ф., Крученицкий Г. М. и др. Эмпирическая модель для расчета солнечной ультрафиолетовой облученности по данным измерений, выполненных в ходе Второй Украинской Антарктической экспедиции // Науч. тр. УкрНИИГМИ.—1999.—Вып. 247.—С. 30—35.
2. Белявский А. В., Захаров В. М., Крученицкий Г. М. Влияние облачности на обнаружимость трендов УФ-Б-облученности, обусловленных уменьшением общего содержания озона // Оптика атмосферы.—1991.—4, № 9.—С. 987—994.
3. Научно-прикладной справочник по климату СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989.—Сер. 3, ч. 1—6, вып. 16.—С. 45—61.

UKRAINIAN NATIONAL SYSTEM OF UV-B IRRADIANCE MONITORING

L. M. Belokrinitskaya, A. V. Belyavsky, G. M. Kruchenitsky

On the basis of analysis of direct measurement results, an empirical model for UV-B spectral density calculations is developed. The model relates spectral density with column ozone and total clouds amount. Climatic mean values for spectral density are calculated and maps of its absolute values and anomalies are built.

УДК 531.13

В. И. Драновский¹, А. Е. Закржевский², В. С. Хорошилов¹

¹Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

²Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ

Динамика тел с деформируемой программно изменяемой космической конфигурацией системы

Надійшла до редакції 25.12.03

Проведено побудову узагальненої математичної моделі і комп'ютерне моделювання динаміки космічного апарату, що несе пружне тіло змінної геометрії, зумовленої розгортанням за заданою програмою компактно сформованої системи у подовжений пружний елемент типу антени чи штанги гравітаційного стабілізатора.

ВВЕДЕНИЕ

Трансформируемые на орбите конструкции являются одними из основных составляющих современных космических систем. Несмотря на большие достижения в области динамики систем тел, такие конструкции не всегда могут быть изучены в рамках классической теории. Упругая штанга гравитационного стабилизатора в составе космического аппарата (КА) переменной конфигурации, которая формируется на орбите из предварительно напряженной ленты, равно как и синтезируемая ферма, не укладываются в рамки классических математических моделей динамики систем тел даже с учетом их упругих свойств, поскольку в процессе развертывания они изменяют свою форму, а также упругие и инерционные характеристики.

Таким образом, в этой области появились проблемы, которые раньше не разрабатывались по разным причинам. В ряде случаев это было связано с отсутствием предпосылок для постановки задач. Так, разработчиков КА часто не интересовало воздействие процесса выдвижения деформируемого гравитационного стабилизатора (ГС) или антенн, смотанных предварительно в рулон, на ориентацию КА, поскольку относительная масса всего узла была небольшой.

С началом широких исследований в области малых и микроспутников, для которых выдвигаемые элементы соизмеримы по массе со всей системой,

эта проблема оказалась очень актуальной и недостаточно исследованной. Она имеет разные аспекты в связи с разнообразием новых конструктивных решений для выдвигаемых космических конструкций.

Целью настоящего исследования является построение обобщенной математической модели и компьютерное моделирование динамики КА, несущего упругое тело переменной геометрии, определяемой развертыванием по заданной программе компактно сформированной системы в удлиненный упругий элемент типа антенны или штанги гравитационного стабилизатора КА.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

На современном этапе создания КА планируется применение трансформируемых конструкций, основанных на использовании выдвигаемых стержней незамкнутого и замкнутого профиля, которые создаются из упругих пружинных лент, а также развертываемых ферменных конструкций.

В качестве примера может быть рассмотрена конструкция гравитационного стабилизатора КА, основные элементы которой приведены на рис. 1.

Аналогичные развертываемые конструкции предусматриваются и на ряде микроспутников, которые выводятся на орбиту в виде субспутников с массами порядка 100 кг. При развертывании опи-

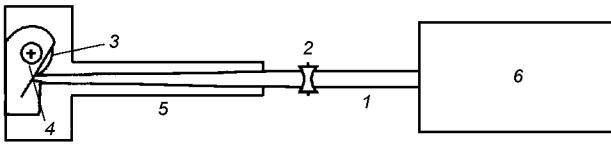


Рис. 1. Конструкция гравитационного стабилизатора КА с механизмом выдвижения: 1 — упругая штанга гравитационного стабилизатора, сформированная из предварительно напряженной ленты, 2 — направляющий ролик, 3 — лента, намотанная на барабан, 4 — механизм разматывания ленты, 5 — корпус устройства развертывания, 6 — груз

санных трансформируемых конструкций на таких аппаратах в динамику движения вокруг центра масс вносятся существенные возмущения, описать которые в рамках математических моделей, известных в теории систем тел [3], не представляется возможным.

Развертываемые конструкции описанного типа, в особенности создаваемые из стержней незамкнутого профиля, имеют существенную гибкость. В результате предъявления определенных требований к форме выдвижных стержней, связанных, например, с обеспечением стабилизации спутника относительно орбитальной системы координат с заданной точностью, накладываются определенные ограничения на параметры процесса развертывания. Достоверное численное моделирование поможет дать ответы на ряд вопросов, связанных с этой проблемой.

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Применительно к случаям развертывания гравитационного стабилизатора КА на орбите с учетом его упругих свойств механическая модель может быть представлена в виде несущего твердого тела и системы развертывания, показанной на рис. 2. Здесь $CXYZ$ — абсолютный базис, C_1xyz — базис, связанный с несущим телом, с началом в его центре масс C_1 ; ось C_1z направлена вдоль расчетного положения оси гравитационного стабилизатора. Под несущим телом S_1 здесь понимаем всю гиростатическую часть системы, под несомым телом S_2 — развертываемую часть с центром масс в точке C_2 без ее гиростатических составляющих (например, без массы барабана для намотки ленты; вращение барабана учтено при вычислении относительного кинетического момента системы). Движение несущего тела будем определять вектором v_{C_1} скорости полюса, в качестве которого выберем точку C_1 , и вектором его абсолютной угловой скорости ω . Положение носимой материальной точки M_i отно-

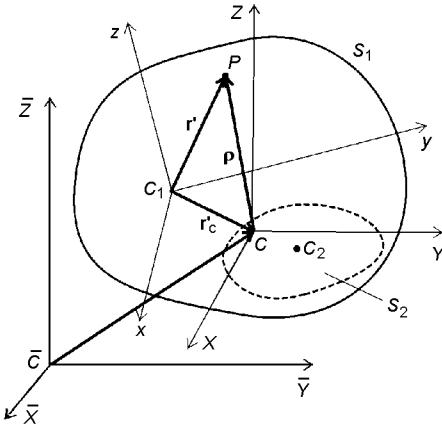


Рис. 2. Обобщенная механическая модель КА с развертываемым гравитационным стабилизатором в виде несущего тела S_1 с неизменяемой геометрией и несомого тела S_2 переменной геометрии

сительно инерциальной координатной системы $CXYZ$ будем определять радиусом-вектором r_i , а относительно системы C_1xyz , связанной с несущим телом, — радиусом-вектором r'_i . В отличие от задачи динамики относительного движения носимых тел, описанной в [4], здесь рассматривается общий случай, когда время входит явно в выражение для r'_i , а не только через обобщенные координаты: $r'_i = r'_i(q_1, \dots, q_n, t)$, поскольку система развертывания гравитационного стабилизатора выдвигает упругий стержень по заданному во времени закону. В результате r'_i изменяется во времени в течение развертывания даже при тождественно равных нулю значениях обобщенных координат, определяющих относительные упругие перемещения штанги гравитационного стабилизатора. В дальнейшем в качестве обобщенных координат, определяющих упругие перемещения гравитационного стабилизатора, будем рассматривать относительные перемещения центра масс груза в направлении осей C_1x и C_1y . Учитывая, что масса даже полностью выдвинутого стержня существенно меньше массы груза, ограничимся удержанием только одной формы для каждого направления. При этом следует подчеркнуть, что в процессе выдвижения стержня собственные числа, а следовательно, и собственные формы, и частоты колебаний будут изменяться. Поскольку угловые скорости в рассматриваемых режимах малы, а выдвижение и свертывание штанги гравитационного стабилизатора предполагается медленным, влиянием продольных сил

на формы парциальных колебаний будем пренебречь. Используя для представления собственных форм упругих колебаний в двух плоскостях защемленного на одном конце стержня функции Крылова [4], можно показать, что характеристическое уравнение в этом случае имеет вид

$$V(kl)T(kl) - S(kl)^2 + \\ + kl \frac{m_{gs}}{m_b} [T(kl)U(kl) - V(kl)S(kl)] = 0,$$

где $S(kl)$, $T(kl)$, $U(kl)$, $V(kl)$ — функции Крылова, kl — корни характеристического уравнения, m_{gs} и m_b — массы груза и выдвинутой части стержня соответственно. В начальный момент выдвижения гравитационного стабилизатора это уравнение вырождено, на что следует обратить внимание при численном моделировании.

Барабан с разматываемой лентой можно рассматривать как несомый маховик с переменным моментом инерции, а все тело S_2 — как тело с подвижным относительно C_1 центром масс и переменным тензором инерции.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Для построения математической модели рассматриваемой системы обратимся к формализму построения уравнений Лагранжа второго рода. В соответствии с рис. 2 радиус-вектор произвольной точки P системы в абсолютном базисе может быть записан как $\mathbf{r} = \mathbf{r}_C + \rho = \mathbf{r}_C - \mathbf{r}'_C + \mathbf{r}'$. Абсолютная скорость произвольной точки P тела S_1 имеет вид $\mathbf{v} = \mathbf{v}_C + \dot{\rho} = \mathbf{v}_C + \omega \times \mathbf{r}' - \omega \mathbf{r}'_C$. Для произвольной точки тела S_2 —

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_C + \dot{\rho} = \mathbf{v}_C + \mathbf{r}' - \mathbf{r}'_C + \omega \times \mathbf{r}' - \omega \times \mathbf{r}'_C.$$

Кинетическую энергию всей системы можно записать в виде

$$T_{S_1+S_2} = \frac{1}{2} \int_{S_1+S_2} v^2 dm.$$

После интегрирования

$$T_{S_1+S_2} = \frac{1}{2} M(\mathbf{v}_{C_1}^2 + 2\mathbf{v}_{C_1} \cdot \omega \times \mathbf{r}_C + \omega \cdot \Theta_{S_1+S_2}^{C_1} \cdot \omega) + \\ + \mathbf{v}_{C_1} \cdot \mathbf{Q}_r + \omega \cdot \mathbf{K}_{S_2}^{C_1} + T_r. \quad (1)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$\mathbf{Q}_r = \int_{S_2}^* \mathbf{r}_C dm = m_2 \mathbf{r}_{C_2} \quad \text{и} \quad T_r = \int_{S_2}^* (\mathbf{r}')^2 dm$$

— соответственно главный вектор относительных количеств движения и кинетическая энергия относительного движения, $\Theta_{S_1+S_2}^{C_1}$ — тензор инерции всей системы относительно точки C_1 , M — масса всей системы, $\mathbf{K}_{S_2}^{C_1}$ — относительный кинетический момент развертываемой части относительно точки C_1 , m_2 — масса негиростатической части развертываемой подсистемы, звездочкой обозначено дифференцирование по времени в связанном базисе.

В результате для квазискоростей v_{C_1} , ω_i получим следующие векторные уравнения Эйлера — Лагранжа:

$$M [\mathbf{v}_{C_1} + \omega \times \mathbf{v}_{C_1} + \dot{\omega} \times \mathbf{r}_C' + \omega \times (\omega \times \mathbf{r}_C') + \\ + 2\omega \times \mathbf{r}_C' + \mathbf{r}_C' = \mathbf{V}_s], \quad (2)$$

$$\Theta_{S_1+S_2}^{C_1} \cdot \dot{\omega} + \Theta_{S_1+S_2}^{C_1} \cdot \omega + \omega \times (\Theta_{S_1+S_2}^{C_1} \cdot \omega) + \mathbf{K}_r^{C_1} + \\ + \omega \times \mathbf{K}_r^{C_1} + M \mathbf{r}_{C_1} \times (\mathbf{v}_{C_1} + \omega \times \mathbf{v}_{C_1}) = \mathbf{m}^{C_1}. \quad (3)$$

В общем виде уравнения относительного движения носимых тел в соответствии с [4] можно записать следующим образом:

$$E_s(T_r) = Q_s - M(\mathbf{v}_{C_1} + \omega \times \mathbf{v}_{C_1}) \frac{\partial \mathbf{r}_{C_1}}{\partial q_s} + \\ + \frac{1}{2} \omega \cdot \frac{\partial \Theta_{S_1+S_2}^{C_1}}{\partial q_s} \cdot \omega - \dot{\omega} \cdot \frac{\partial \mathbf{K}_r^{C_1}}{\partial q_s} - \omega \cdot E_s(\mathbf{K}_r^{C_1}), \quad (4)$$

$$s = 1, 2.$$

Здесь $E_s(\cdot)$ — оператор Эйлера, Q_s — обобщенные силы, учитывающие упругие и диссипативные свойства конструкции.

Если дополнить систему уравнений (2) — (4) кинематическими уравнениями, получим замкнутую систему уравнений движения, для которой можно поставить задачу Коши с целью проследить во времени поведение системы при изменении ее геометрии. Чтобы конкретизировать задачу исследования, введем две системы координат. Система C_1xyz , как и выше, является координатным базисом, связанным с неизменной частью объекта исследования. Применительно к конкретному рассматриваемому далее КА она показана на рис. 3.

Кроме этого, введем орбитальную систему координат, относительно которой в дальнейшем будем рассматривать поведение КА. Эта система координат вводится традиционным способом [1] и связана с центром масс C всей системы. На рис. 4 она

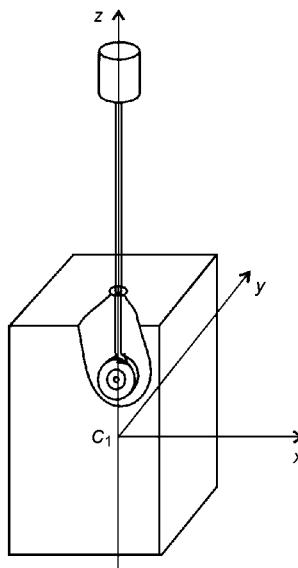


Рис. 3. Основные элементы микроспутника с системой развертывания гравитационного стабилизатора

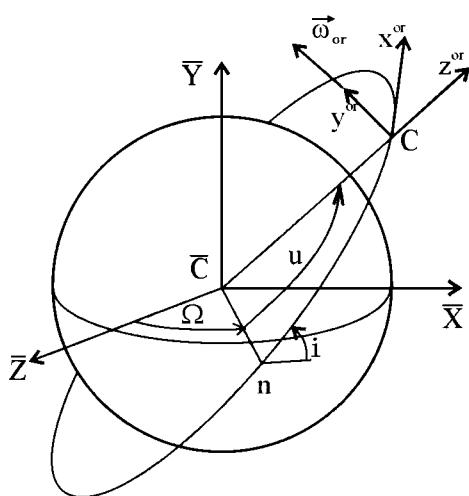


Рис. 4. Системы координат, в которых рассматривается движение КА с развертываемым гравитационным стабилизатором

показана так, что ось Cx^{or} направлена по вектору скорости КА, ось Cy^{or} направлена по бинормали к орбите, ось Cz^{or} направлена по местной вертикали. Система координат $CXYZ$, как и выше, — абсолютная и связана с Землей так, что ось CY направлена вдоль оси вращения Земли, ось CZ направлена в точку весеннего равноденствия, ось CX дополняет систему до правой. На рис. 4 угол Ω обозначает долготу восходящего узла от точки весны, i —

наклонение орбиты, u — аргумент широты, ω^{or} — вектор орбитальной угловой скорости. Пренебрегая прецессией орбиты применительно к рассматриваемому процессу, в дальнейшем будем считать абсолютную угловую скорость орбитального базиса равной ω^{or} .

К выбору кинематических параметров, определяющих ориентацию несущего тела в орбитальных осях, здесь следует отнести с осторожностью. В рассматриваемом случае мы имеем дело с режимом движения, при котором возможны существенные нарушения ориентации КА, вплоть до изменения ее на обратную. Поэтому остановим свой выбор на параметрах Родрига — Гамильтона. Кинематические уравнения, записанные в этих параметрах, не вырождаются ни при каких их значениях, что особенно важно для численного моделирования. В скалярном виде эти уравнения можно записать следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_0 &= -\tilde{\omega}_1\lambda_1 - \tilde{\omega}_2\lambda_2 - \tilde{\omega}_3\lambda_3, \\ \dot{\lambda}_1 &= \tilde{\omega}_1\lambda_0 + \tilde{\omega}_3\lambda_2 - \tilde{\omega}_2\lambda_3, \\ \dot{\lambda}_2 &= \tilde{\omega}_2\lambda_0 + \tilde{\omega}_1\lambda_3 - \tilde{\omega}_3\lambda_1, \\ \dot{\lambda}_3 &= \tilde{\omega}_3\lambda_0 + \tilde{\omega}_2\lambda_1 - \tilde{\omega}_1\lambda_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — компоненты кватерниона, осуществляющего преобразование орбитального базиса в связанный, $\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_{oi}$ ($i = 1, 2, 3$), ω_i — проекции вектора абсолютной угловой скорости несущего тела на оси связанного с ним базиса, ω_{oi} — проекции вектора орбитальной угловой скорости также на связанный базис. Поскольку вектор орбитальной угловой скорости коллинеарен оси Cy^{or} , его проекции на оси связанного базиса определяются с помощью матрицы соответствующих направляющих косинусов, записанной в компонентах кватерниона [4]. В результате

$$\begin{aligned} \omega'_{o1} &= 2(\lambda_0\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2)\omega_o, \\ \omega'_{o2} &= (\lambda_0^2 + \lambda_2^2 - \lambda_1^2 - \lambda_3^2)\omega_o, \\ \omega'_{o3} &= 2(-\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3)\omega_o. \end{aligned}$$

Поскольку более привычными для иллюстрации положения в пространстве связанного координатного базиса являются все же углы ориентации типа углов Крылова [4], воспользуемся последовательностью поворотов, показанных на рис. 5, для введения углов ориентации φ, θ, ψ (соответственно угол крена, угол тангажа и угол курса).

Поставим в соответствие каждому из поворотов отдельный собственный кватернион:

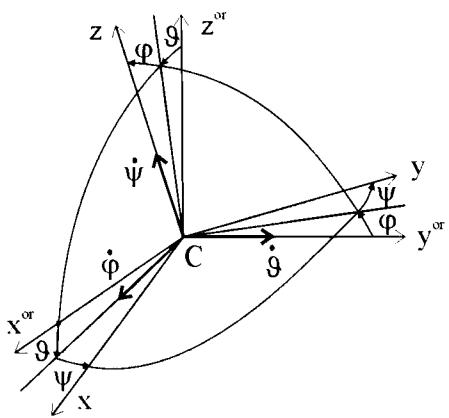


Рис. 5. Углы Крылова. При использовании такой последовательности поворотов вырождение кинематических уравнений происходит при значениях угла крена $\pm(2k+1)\pi/2$ ($k = 0, 1, \dots$)

$$M = \cos \frac{\theta}{2} + i_2 \sin \frac{\theta}{2},$$

$$N = \cos \frac{\varphi}{2} + i_1 \sin \frac{\varphi}{2},$$

$$P = \cos \frac{\psi}{2} + i_3 \sin \frac{\psi}{2},$$

где i_1, i_2, i_3 — орты гиперкомплексного пространства H , формально совпадающие с ортами осей поворотов.

Используя правило умножения собственных кватернионов $\Lambda = M \circ N \circ P$, где символ \circ определяет операцию умножения кватернионов [2], получим для составляющих собственного кватерниона результирующего поворота следующие выражения через углы Крылова:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \cos \frac{\psi}{2} \cos \theta_2 \cos \frac{\varphi}{2} + \sin \frac{\psi}{2} \sin \theta_2 \sin \frac{\varphi}{2}, \\ \lambda_1 &= \cos \frac{\psi}{2} \cos \theta_2 \sin \frac{\varphi}{2} - \sin \frac{\psi}{2} \sin \theta_2 \cos \frac{\varphi}{2}, \\ \lambda_2 &= \cos \frac{\psi}{2} \sin \theta_2 \cos \frac{\varphi}{2} + \sin \frac{\psi}{2} \cos \theta_2 \sin \frac{\varphi}{2}, \\ \lambda_3 &= \sin \frac{\psi}{2} \cos \theta_2 \cos \frac{\varphi}{2} + \cos \frac{\psi}{2} \sin \theta_2 \sin \frac{\varphi}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

Эти зависимости удобно использовать, например, при формулировании начальных условий в привычных переменных и при вычислении начальных значений составляющих кватерниона.

Разрешая зависимости (6) относительно углов Крылова, можно получить следующие выражения:

$$\begin{aligned} \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{-2(\lambda_2 \lambda_3 + \lambda_0 \lambda_1)}{\sqrt{1 - [2(\lambda_2 \lambda_3 - \lambda_0 \lambda_1)]^2}}, \\ \theta &= \operatorname{arctg} \frac{2(\lambda_1 \lambda_3 + \lambda_0 \lambda_2)}{\lambda_0^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3^2}, \\ \psi &= \operatorname{arctg} \frac{2(\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_0 \lambda_3)}{\lambda_0^2 - \lambda_1^2 + \lambda_2^2 - \lambda_3^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Они удобны для построения графиков в привычных переменных. Вырождение аргументов арктангенсов при значениях углов $\pm(2k+1)\pi/2$ ($k = 0, 1, \dots$) легко обходится в вычислительной программе.

При численном интегрировании системы уравнений (2)–(5) следует помнить, что уравнения (5) содержат только три независимых переменных, поскольку по условию выбора коэффициента пропорциональности проекций вектора поворота [4] $\lambda_0^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 1$. Поэтому в процессе вычислений следует проводить коррекцию нормы кватерниона. В соответствии с [2] для этого достаточно вместо интегрирования уравнения (5), которое в обозначениях алгебры кватернионов имеет вид $\dot{\Lambda} = 0.5\Lambda^\circ\omega_E$, интегрировать уравнение $\dot{\Lambda} = 0.5\Lambda^\circ\omega_E - k\Lambda(\tilde{\Lambda}^2 - 1)$, которое превращается в исходное при $\tilde{\Lambda}^2 = 1$. Здесь Λ — кватернион, $\tilde{\Lambda}$ — его норма. Максимальная скорость сходимости нормы кватерниона к единице обеспечивается при $k = 0.5$.

Поскольку компьютер оперирует только с главными значениями арктангенсов, в вычислительной программе должен быть заложен алгоритм восстановления полных значений углов ориентации, что реализуется достаточно просто.

ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

В качестве иллюстрации рассмотрим поведение на орбите микроспутника общей массой около 70 кг, содержащего устройство для выдвижения гравитационного стабилизатора, приведенное на рис. 6. Здесь показаны следующие координатные оси: Bz'' совпадает с проектным положением оси гравитационного стабилизатора, Oy_{gs} проходит через центр масс барабана и также связана с несущим телом, оси $Ou'x'$ связаны с барабаном и до развертывания гравитационного стабилизатора параллельны первым двум из указанных осей, α — угол их относительного поворота в результате вращения барабана, s — длина выдвинутой части штанги гравитационного стабилизатора, остальные обозначения очевидны.

Принимая во внимание тот факт, что в результате упругих деформаций штанги гравитационного

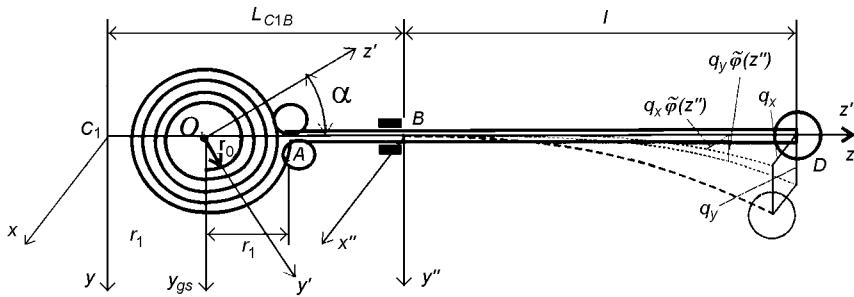


Рис. 6. Механическая модель упругого гравитационного стабилизатора и устройства развертывания

стабилизатора оси связанных базиса перестают совпадать с главными осями инерции КА, для круговой орбиты составляющие гравитационного момента можно записать в следующем виде [1]:

$$\begin{aligned} m_{gs,x}^C &= 3\omega_0^2[(\Theta_{zz}^C - \Theta_{yy}^C)\gamma_1\gamma_2 + \\ &+ \Theta_{xy}^C\gamma_2 - \Theta_{xz}^C\gamma_1 - \Theta_{yz}^C(\gamma_1^2 - \gamma_2^2)], \\ m_{gs,y}^C &= 3\omega_0^2[(\Theta_{xx}^C - \Theta_{zz}^C)\gamma_2\gamma + \\ &+ \Theta_{yz}^C\gamma_1\gamma - \Theta_{yx}^C\gamma_1\gamma_2 - \Theta_{zx}^C(\gamma_2^2 - \gamma_1^2)], \\ m_{gs,z}^C &= 3\omega_0^2[(\Theta_{yy}^C - \Theta_{xx}^C)\gamma\gamma_1 + \\ &+ \Theta_{zx}^C\gamma_2\gamma_1 - \Theta_{zy}^C\gamma_2\gamma - \Theta_{xy}^C(\gamma^2 - \gamma_1^2)], \end{aligned} \quad (8)$$

где Θ_{xx}^C, \dots — компоненты тензора инерции развертываемой системы в координатном базисе, оси которого параллельны осям связанных базиса, но имеют начало в центре масс C . Направляющие косинусы оси $Cz^{\text{ор}}$ в связанных базисе имеют вид [4]

$$\begin{aligned} \gamma &= 2(-\lambda_0\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3), \\ \gamma_1 &= 2(\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3), \\ \gamma_2 &= \lambda_0^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3^2. \end{aligned}$$

Поскольку компоненты тензора инерции вычислены в связанных осях, в выражениях (8) нужно использовать зависимость $\Theta^C = \Theta^{C_1} - M(Er_C \cdot r_C - r'_C r_C)$. Момент внешних сил в уравнении (3) вычисляется относительно точки C_1 . Выражение для него с учетом (8) можно записать следующим образом: $m_{C_1}^C = m^C + r'_C \times V_s$. Вектор V_s равнодействующей внешних сил в рассматриваемом случае тождественно равен нулю, поскольку равнодействующая гравитационных сил уравновешена центробежной силой, возникающей при движении КА по орбите.

Приведем выражения для основных величин, определяющих коэффициенты уравнений движения применительно к схеме системы выдвижения гравитационного стабилизатора, показанной на рис. 6,

используя следующие обозначения:

$$\begin{aligned} F_1(t) &= \int_0^{s(t)} \tilde{\varphi}(z'') dz, \\ F_2(t) &= \int_0^{s(t)} \tilde{\varphi}(z'')(z'' + L_{C_1B}) dz, \\ F_3(t) &= \int_0^{s(t)} (\tilde{\varphi}(z''))^2 dz, \\ F_4(t) &= \int_0^{s(t)} \frac{\partial \tilde{\varphi}(z'')}{\partial z'^{''2}} dz, \end{aligned}$$

Здесь $\tilde{\varphi}(z'')$ — первая собственная форма поперечных парциальных колебаний упругого стержня длины $s(t)$ с точечной массой m_{gs} на конце.

Радиусы-векторы характерных точек системы: центра масс груза — $r_D = \{q_x, q_y, L_{C_1B}\}$, центра масс изогнутой штанги — $r_{C_1} = \{q_x/F_1(t), q_y/F_1(t), s + L_{C_1B}\}$, центра масс ленты на барабане — $r_{O_1} = \{0, 0, s + L_{C_1B}\}$. Текущая масса ленты на барабане $m_{dl} = m_l(L - s)$, наружный радиус намотки ленты на барабане $r_1 = r_0 + \kappa(\Phi - \alpha)$. Здесь $\kappa = \delta/2\pi$, δ — толщина ленты, m_l — погонная масса штанги гравитационного стабилизатора, Φ — максимальное значение угла поворота барабана при выдвижении штанги.

Компоненты тензора инерции Θ^{C_1} в связанных базисе записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \Theta_{xx} &= J_{xx} + m_{dl} \left(\frac{r_1^2 + r_0^2}{2} + L_{C_1O}^2 \right) + m_{gs}(r_D(2)^2 + r_D(3)^2) + \\ &+ m_l \left(\frac{z_D^3 - z_B^3}{3} + q_y^2 F_3 \right), \\ \Theta_{yy} &= J_{yy} + m_{dl} \left(\frac{3r_1^2 + 3r_0^2 + b^2}{12} + L_{C_1O}^2 \right) + \\ &+ m_{gs}(r_D(1)^2 + r_D(3)^2) + m_l \left(\frac{z_D^3 - z_B^3}{3} + q_x^2 F_3 \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Theta_{zz} &= J_{zz} + m_{dl} \frac{3r_1^2 + 3r_0^2 + b^2}{12} + \\ &+ m_{gs}(r_D(1)^2 + r_D(2)^2) + m_l(q_x^2 + q_y^2)F_3, \\ \Theta_{xy} &= J_{xy} + (m_{gs} + m_l)F_3q_xq_y, \\ \Theta_{xz} &= J_{xz} + (m_{gs}(L_{C_1B} + s) + m_lF_2)q_x, \\ \Theta_{yz} &= J_{yz} + (m_{gs}(L_{C_1B} + s) + m_lF_2)q_y.\end{aligned}$$

Здесь $J_{xx}, J_{xy} \dots$ — компоненты тензора инерции для гиростатической части системы. Остальные выражения, входящие в уравнения движения, получаются из приведенных по известным формулам.

При численном моделировании зададимся следующими базовыми значениями основных параметров системы: масса несущего тела $m_l = 55$ кг, масса груза стабилизатора $m_{gs} = 10$ кг, масса одного метра ленты $m_l = 0.17$ кг, толщина ленты $\delta = 0.15$ мм, максимальная длина выдвижения гравитационного стабилизатора $L = 10$ м, начальные отклонения по углам ориентации — нулевые, значения составляющих вектора угловой скорости КА в момент начала выдвижения гравитационного стабилизатора находятся в диапазоне $0.0—0.05 \text{ c}^{-1}$. Длительность выдвижения (свертывания) гравитационного стабилизатора $T_f - T_0 = 30$ с, закон выдвижения (свертывания) во времени соответствует плавному выходу на постоянную скорость в течение 5 с и такой же остановке процесса. Изгибная жесткость $EJ = 50 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \text{с}^{-2}$, момент инерции барабана для

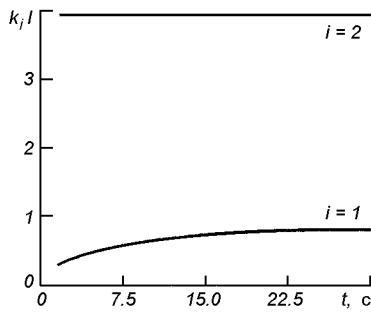


Рис. 7. Зависимость первых двух парциальных частот упругих колебаний от времени при принятом законе выдвижения гравитационного стабилизатора

Зависимость первых двух парциальных частот упругих колебаний от времени

$t, \text{ с}$	2	3	5	8	11	15	20	25	30
$W_1, \text{ с}^{-1}$	42.05	12.45	2.690	0.824	0.428	0.2404	0.1450	0.0994	0.0849
$W_2, \text{ с}^{-1}$	7139.9	1411.3	183.29	38.02	15.98	7.430	3.8165	2.3241	1.8887

ленты $J_{dr} = 0.01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, диагональные компоненты тензора инерции несущего тела $J_{xx} = 8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_{yy} = 8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_{zz} = 6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $r_0 = 0.1 \text{ м}$, $L_{ob} = 0.3 \text{ м}$, $L_{C_1B} = 0.6 \text{ м}$, декремент колебаний штанги $\theta = 0.02\dots0.05$. В качестве момента внешних сил, действующих на систему в течение времени моделирования ее поведения, рассмотрим момент от центрального ньютона поля сил, моделирующего гравитационное поле Земли на круговой орбите с высотой 600 км.

Численное решение задачи Коши проводится методом Рунге — Кутта четвертого порядка с постоянным шагом интегрирования 0.01 с. Прежде всего проследим изменение первой собственной формы и частоты упругой штанги по мере выдвижения гравитационного стабилизатора. Зависимость двух первых корней характеристического уравнения показана на рис. 7. Зависимость первых двух парциальных частот упругих колебаний от времени приведена в таблице.

Изменение ординат первой парциальной формы во времени в зависимости от длины s выдвинутой части гравитационного стабилизатора показано на рис. 8.

Из оценки соответствующих числовых данных следует, что ординаты первой формы парциальных колебаний от второй секунды выдвижения и до его завершения изменяются максимум на 20 %. Тем не

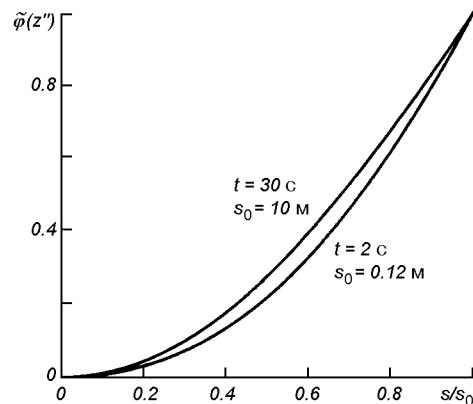


Рис. 8. Изменение ординат первой парциальной формы во времени в зависимости от длины s выдвинутой части гравитационного стабилизатора

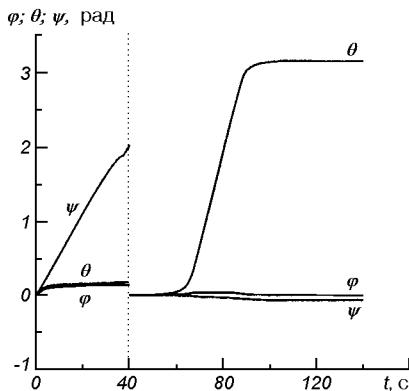


Рис. 9. Поведение углов ориентации при начальном развертывании гравитационного стабилизатора и при свертывании-развертывании с целью изменения ориентации оси Cz' на противоположную

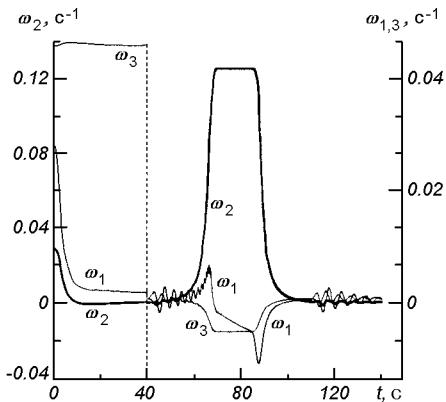


Рис. 10. Поведение проекций угловых скоростей на связанные оси при начальном развертывании гравитационного стабилизатора и при свертывании-развертывании

менее, учет таких изменений необходим, так как значения интегральных коэффициентов будут изменяться во времени заметнее.

Для демонстрации возможностей построенной математической модели и написанного для ее численной реализации пакета вычислительных программ рассмотрим два характерных режима функционирования гравитационно стабилизированного КА. Такими режимами являются:

1. Первоначальное развертывание гравитационного стабилизатора после предварительного успокоения.

2. Свертывание и последующее развертывание гравитационного стабилизатора с целью изменения ориентации оси Cz' на противоположную.

Для начального момента первого режима, который следует после режима предварительного успокоения КА, выведенного на орбиту, характерны

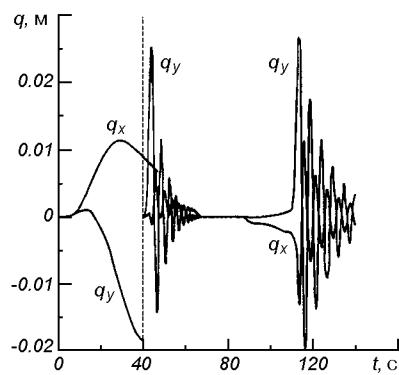


Рис. 11. Поведение проекций относительных упругих отклонений центра масс груза гравитационного стабилизатора на оси связанного базиса при начальном развертывании гравитационного стабилизатора и при свертывании-развертывании

значения проекций абсолютной угловой скорости в диапазоне $\pm(0.03 \dots 0.05)$ рад/с. Для второго в начальный момент времени характерна ориентация в орбитальном базисе, т. е. вектор абсолютной угловой скорости может быть принят в виде $\omega = \{0, \omega_{\text{ор}}^{\text{бр}}, 0\}$. Что касается углов ориентации, то в обоих случаях их значения можно принять нулевыми.

На рис. 9—11 для указанных режимов показано поведение во времени углов ориентации, проекций угловых скоростей несущего тела относительно орбитального базиса и относительных упругих перемещений q_x , q_y центра масс груза гравитационного стабилизатора. Первые 40 с занимает первый режим, сам процесс первоначального развертывания длится 30 с, как описано выше. Хотя начальные угловые скорости в первом режиме существенно больше, чем во втором, суммарный кинетический момент значительно меньше, поскольку компоненты тензора инерции до развертывания малы. По мере выдвижения гравитационного стабилизатора в первом режиме компоненты относительной угловой скорости ω_1 , ω_2 существенно уменьшаются, в то же время составляющая ω_3 практически не изменяется, поскольку Θ_{zz} при этом остается без заметных изменений. Возникающие изменения значений составляющих вектора угловой скорости достаточно плавны и не вызывают колебаний упругого гравитационного стабилизатора. Относительные упругие перемещения груза на этом режиме носят квазистатический характер, повторяя поведение соответствующих составляющих вектора углового ускорения.

Режим свертывания-развертывания упругого гравитационного стабилизатора моделируется начиная с момента времени $t = 40$ с. Хотя модуль вектора

абсолютной угловой скорости в этот момент невелик, абсолютный кинетический момент КА при этом значительный из-за большого значения составляющей Θ_{yy} тензора инерции. По мере втягивания гравитационного стабилизатора путем наматывания ленты на барабан в результате существенного уменьшения составляющей Θ_{yy} резко увеличивается ω_2 . Поскольку ось барабана с лентой в рассматриваемом случае расположена вдоль оси Cx' , его вращение вызывает угловые движения вокруг оси Cx' , и в силу гироскопической связности системы — вокруг оси Cz' . В результате резкого изменения значений составляющих ω возникают заметные относительные колебания груза гравитационного стабилизатора. По мере втягивания штанги частота колебаний увеличивается, а амплитуда уменьшается. С завершением процесса втягивания штанги при $t = 70$ с упругие колебания, естественно, прекращаются. КА со свернутым гравитационным стабилизатором вращается в основном вокруг оси Cy' . При правильно выбранном начале выдвижения гравитационного стабилизатора (в нашем случае время начала повторного выдвижения $t = 96$ с) к моменту окончания выдвижения ось КА Cz' изменит ориентацию на противоположную. Поскольку в процессе повторного выдвижения гравитационного стабилизатора также возникает заметное изменение составляющих вектора угловой скорости, снова возбуждаются упругие относительные колебания. В отличие от режима втягивания здесь упругие колебания начинают проявляться перед

окончанием выдвижения (в момент времени, соответствующий минимуму ускорения выдвижения), когда значения угловых скоростей и ускорений заметно снижаются.

Полученные результаты демонстрируют метод математического описания динамики системы с программно изменяемой геометрией и поведение реального малого космического аппарата в процессе выдвижения (свертывания) упругого гравитационного стабилизатора.

Работа выполнена частично в рамках проекта УНТЦ 752.

1. Белецкий В. В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. — М.: Наука, 1965.—416 с.
2. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. — М.: Наука, 1973.—320 с.
3. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел. — М.: Мир, 1980.—292 с.
4. Лурье А. И. Аналитическая механика. — М.: Физматгиз.—1961.—824 с.

DYNAMICS OF A DEFORMED SPACE SYSTEM OF BODIES WITH PROGRAMMED CHANGE OF THE CONFIGURATION

V. I. Dranovskiy, A. E. Zakrzhevskiy, V. S. Khoroshylow

A generalized mathematical model is developed and computer simulation is performed for the dynamics of a spacecraft carrying an elastic body of variable geometry caused by programmed deployment of compact system in lengthened elastic element like antenna or gravitational stabilizer boom.

УДК 528.8.04

А. Д. Федоровский¹, М. В. Артюшенко², З. В. Козлов¹

¹Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

²Інститут космічних дослідень НАН України, Київ

Параметрический синтез космических систем зондирования Земли на основе генетического метода: постановка задачи и пути решения

Поступила в редакцию 03.07.03

На основі генетичного підходу розглядаються методичні аспекти визначення вимог до параметрів космічних систем дистанційного зондування Землі. При цьому вимоги до параметрів системи визначаються з умови їхньої відповідності характеристикам, які забезпечують вирішення тематичних задач науково-прикладних програм ДЗЗ з найбільшою вірогідністю.

При создании и эксплуатации современных космических систем дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) очевидным являются возросшие требования к их структуре, параметрам, а также к планированию режимов функционирования КС. Если первые две проблемы решаются на этапе проектирования КС, то последняя, связанная с составлением оптимальных планов-графиков ДЗЗ, должна решаться многократно и оперативно, в том числе в процессе эксплуатации КС ДЗЗ. Уже сейчас существует необходимость производить учет большого количества факторов, влияющих на эффективность КС, среди которых наряду с числовыми параметрами есть структурные параметры, имеющие качественный характер. Очевидно, что для проектирования и эксплуатации современных КС ДЗЗ требуется поиск принципиально новых информационных подходов.

Известно, что при автоматизации проектирования сложных технических систем, к классу которых следует отнести и состоящие из различных по принципу действия подсистем КС ДЗЗ, применяется итерационный подход [1]. Последний включает структурный синтез, формирование математиче-

ской модели КС, параметрический синтез, моделирование и оценку проектных решений требованиям технического задания. Неавтоматизированный синтез чреват увеличением сроков разработки, снижением качества, а в перспективе при разворачивании сети спутников с аппаратурой ДЗЗ неавтоматизированный синтез вообще становится проблематичным.

Наиболее перспективными для автоматизации решения задач структурного, параметрического синтеза и оперативного составления планов-графиков ДЗЗ являются генетические методы, которые строятся на базе классического генетического алгоритма. Среди различных методов решения комбинаторных и оптимизационных задач генетические методы относятся к классу эвристических методов поиска квазипримимальных решений.

Цель данного исследования состоит в построении генетического алгоритма (ГА) для решения задачи параметрического синтеза КС ДЗЗ.

Генетический алгоритм — адаптивный поисковый алгоритм, основанный на эволюционных эмпирических факторах получения решения, что для рассматриваемого случая параметрического синтеза

сводится к нахождению оптимальных значений параметров КС ДЗЗ для решения всего множества планируемых тематических задач* программы работы. Эволюционные факторы в ГА реализуются соответствующими вычислительными процедурами (операторами), которые обеспечивают адаптацию алгоритма к особенностям поискового пространства решений, что значительно сокращает количество вычислений за счет отсева неперспективных областей поиска.

Параметрический синтез КС ДЗЗ предусматривает формирование модели аддитивной ценности выполнения программы наблюдений Земли из космоса различным составом значений параметров КС, которые удобно представить в виде морфологического блока

$$\{b\} = \begin{vmatrix} b_{1 \min(1)} & b_{12} & \dots & b_{1r} & \dots & b_{1 \max(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{j \min(j)} & b_{j2} & \dots & b_{jr} & \dots & b_{j \max(j)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{m \min(m)} & b_{m2} & \dots & b_{mr} & \dots & b_{m \max(m)} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

В морфологическом блоке (1) приняты следующие обозначения: $b_{j \min(j)}$ и $b_{j \max(j)}$ — минимальное и максимальное значения j -го параметра КС, равные соответствующим минимальному и максимальному значениям j -й характеристики тематических задач; b_{jr} — значение r -го варианта j -го параметра КС; $r = \min(j), 2, 3, \dots, \max(j); j = 1, 2, \dots, m; m$ — количество параметров КС, равное числу различных характеристик, необходимых для обеспечения выполнения всех задач программы ДЗЗ. Построение модели ценности предусматривает проведение морфологического анализа и квалиметрические (качественные) оценки. Так как целью настоящего исследования является демонстрация использования разработанного генетического метода, то описание построения модели аддитивной ценности КС ДЗЗ приводится в сокращенном варианте. Примеры построения функции технической эффективности (функции принадлежности) рассмотрены в работе [2].

В морфологическом блоке (1), составленном на основе анализа характеристик всех тематических задач программы, количество строк равно числу параметров КС, необходимых для решения всех задач, а элементами строк являются значения параметров, изменяющиеся в каждой строке от минимального до максимального значения. Решение тематических задач осуществляется на основе де-

шифрирования информативных признаков, полученных от регистрации аппаратурой КС процессов и объектов Земли с использованием специальных для каждой задачи методик решения. Методики решения тематических задач предъявляют определенные требования к информации, подлежащей дешифрированию. Ниже через a с индексами обозначаются численные значения требований к характеристикам космической информации, которые следуют из методик решения тематических задач. Эти характеристики обеспечиваются определенным составом и значениями параметров (b с индексами) подсистем КС ДЗЗ: визирования земной поверхности, регистрации информации ДЗЗ, передачи и приема информации, обработки информации и др. Для решения конкретной задачи идеальными параметрами КС ДЗЗ являются значения, полностью совпадающие с требованиями, обеспечивающими решение данной задачи. Однако в случае выполнения научно-прикладной программы, состоящей из различных тематических задач, эти значения параметров, вероятнее всего, не обеспечат необходимый уровень решения всех задач. В этом случае параметры КС ДЗЗ определяются путем нахождения компромиссного варианта значений параметров, которые обеспечивают выполнение всех тематических задач программы ДЗЗ с наибольшей эффективностью. Количественно оценить эффективность, в нашем случае техническую эффективность, так как экономические показатели в модель ценности не включены, можно с помощью функции технической эффективности

$$\max F(B_r, M) = \sum_{p=1}^h \rho(M_p, M) \sum_{l=1}^{k(p)} \rho(A_{lp}, M_p) \sum_{j=1}^{m(lp)} \rho(a_{jlp}, A_{lp}) \cdot G(b_{jr}, a_{jlp}), \quad (2)$$

где $A(M_p) = A\{A_{lp}\}$ — множество тематических задач M_p -й подпрограммы, где A_{lp} — l -я задача p -й подпрограммы; $l = 1, 2, \dots, k_p$; k_p — общее количество задач p -й подпрограммы; $p = 1, 2, \dots, h$; h — количество подпрограмм программы (M); $a(A_{lp}) = a_{jlp}$ — множество характеристик, обеспечивающих решение l -й задачи p -й подпрограммы, где a_{jlp} — j -я характеристика l -й задачи p -й подпрограммы; $j = 1, 2, \dots, m_{lp}$; m_{lp} — количество характеристик l -й задачи p -й подпрограммы; B_r — r -й вариант состава значений параметров КС; $r = 1, 2, \dots, N$; $G(b_{jr}, a_{jlp})$ — функция соответствия j -го параметра r -го варианта состава значений параметров КС (b_{jr}) j -й характеристике (a_{jlp}), обеспе-

* Под тематическими задачами ДЗЗ понимаются научные и прикладные задачи отраслей хозяйственной деятельности, при решении которых, наряду с наземными наблюдениями, используется информация ДЗЗ.

чивающей решение l -й задачи p -й подпрограммы:

$$G(b_{jr}, a_{jlp}) = [1 - S(b_{jr}, a_{jlp})], \quad (3)$$

где $S(b_{jr}, a_{jlp})$ — функция близости для j -го параметра r -й КС (b_{jr}) к j -й характеристикике (a_{jlp}), обеспечивающей решение l -й задачи p -й подпрограммы, вычисляется как нормализованная функция «расстояния» между b_{jr} и a_{jlp} . Функция соответствия G принимает тем большее значение, чем меньше разница между значением характеристики тематической задачи a_{jlp} и значением параметра КС ДЗЗ — b_{jr} . В случае, когда отсутствуют параметры, необходимые для регистрации соответствующих характеристик задач, $S(b_{jr}, a_{jlp}) = 1$; $\rho(a_{jlp}, A_{lp})$; $\rho(A_{lp}, M_p)$; $\rho(M_p, M)$ — квалиметрические характеристики важности (весовые коэффициенты важности) первого аргумента по отношению ко второму. Так, например, $\rho(a_{jlp}, A_{lp})$ есть оценка важности j -й характеристики в решении тематической задачи (j -й характеристики для решения l -й задачи p -й подпрограммы). Две другие характеристики означают: A_{lp} задачи для выполнения подпрограммы M_p ; подпрограммы M_p для выполнения программы M соответственно. По определению сумма коэффициентов важности каждой из характеристик равна 1.

Наибольшего значения функция (2) достигает при полном совпадении значений параметров КС ДЗЗ с аналогичными требованиями решения тематических задач по методикам. В этом случае значение выражения (2) равно числу этих параметров. Следовательно, отношение значения функции (2) к числу параметров изменяется в диапазоне от единицы до нуля и может быть принято в качестве критерия оценки эффективности КС ДЗЗ (коэффициент относительной эффективности — КОЭ)

$$\text{КОЭ}_{\max} = \frac{F(B_r, M)}{\sum_{p=1}^h \sum_{l=1}^{k(p)} m_{lp}}. \quad (4)$$

Задача параметрического синтеза сводится к нахождению значений параметров b_{jr} , при которых КОЭ принимает максимальное значение. Необходимое повышение точности представления параметров КС неизбежно связано с увеличением потенциальных вариантов решения задачи оптимизации, число которых в задаче синтеза КС ДЗЗ может достичь чрезвычайно больших значений, и при использовании метода прямого перебора становится непосильной задачей. Убедиться в этом можно при анализе формулы (5), по которой производится подсчет общего числа возможных вариантов соста-

ва параметров КС ДЗЗ:

$$N = \prod_{j=1}^m \sum_{r=b_j \min(j)}^{b_j \max(j)} b_{jr}. \quad (5)$$

Для решения задачи параметрического синтеза конструируется генетический метод, в основу которого заложен классический ГА.

При описании ГА принято использовать терминологию, заимствованную из молекулярной биологии и генетики, что подчеркивает аналогию с эволюционными процессами, происходящими в живой природе. Для решения различных прикладных задач уже создано большое число алгоритмов на основе моделирования свойств генетического аппарата приспособления живых организмов к окружающей среде, всем этим алгоритмам присущи общие черты. Во всех ГА можно выделить основные этапы решения задач. Методологическую основу ГА составляет гипотеза селекции, которая заключается в том, что чем выше приспособленность особи, тем выше вероятность того, что некоторая часть потомства этой особи будет содержать еще более высокие характеристики признаков, определяющих приспособленность. По аналогии, механизм селекции переносится на решение прикладных задач в виде гипотезы, выдвинутой Холландом [6], — хорошие схемы решений задачи при скрещивании рождают новые схемы более высокого качества.

Необходимым условием для применения ГА является кодирование всего множества потенциальных решений задачи, содержащихся в морфологическом блоке (1), которое состоит в формировании хромосомы (другое название в ГА — фрейм). Хромосомы состоят из цепочки генов — основной единицы наследственности, представляющей собой фрагмент ДНК, кодирующий один или несколько фенотипических признаков. Каждый ген способен занимать только определенную область в хромосоме. Область, занимаемая геном, называется локусом. В алгоритмах ГА в общем случае каждый из генов может принимать вещественные, целочисленные или бинарные значения и характеризуется алльельной формой (множеством допустимых значений). В популяции всегда существуют особи, у которых в идентичных локусах представлены различные формы генов. Множество таких альтернативных форм генов называется аллелями. Для выбора оптимального значения параметров КС ДЗЗ каждая переменная (параметр) оптимизации кодируется определенным фрагментом хромосомы, состоящим из фиксированного количества генов. Оценка каждого из вариантов решения задачи производится с помощью некоторой функции приспо-

собленности $FF(X_i)$ (функции фитнесса). В рассматриваемом случае для этой цели может быть использовано выражение для КОЭ (4).

Для сокращения количества просматриваемых вариантов решений задачи ГА используют соответствующие операторы, в основе которых лежит гипотеза о строительных блоках, выдвинутая Голдбергом [5]. Согласно этой гипотезе ГА должны одновременно выполнять две функции: выращивать строительные блоки решений и смешивать эти блоки в целях получения оптимального решения. В ГА эта гипотеза реализуется соответствующими механизмами и операторами: механизм генерации начальной популяции; механизм оценки качества хромосомы с использованием функции приспособленности; механизм селекции; операторы скрещивания; операторы мутации; механизм останова ГА (остановка моделирования эволюционного процесса).

Принято считать, что классический генетический алгоритм оперируют с хромосомами постоянной длины, состоящими из генов со значениями 0 или 1. Закодированная хромосома, в которой представлено множество потенциальных решений, называется генотипом. Генотип задает поисковое пространство решений. В теории естественной эволюции генотип — это программа развития эволюционирующей особи. Реализация особи (одного из возможных вариантов решения задачи) в виде хромосомы с конкретными значениями генов является фенотипом. В теории естественного отбора фенотип необходим для селекции и перехода на следующую ступень эволюции. Популяция — это репродукционная группа PP хромосом фиксированной численности, в которой любые две хромосомы $X_i, X_j \in PP, i \neq j$ могут выступить в роли родителей.

В задаче параметрического синтеза КС ДЗЗ не возникает проблем в представлении задачи, т. е. в кодировании множества потенциальных решений в виде хромосомы. Для этой задачи набор числовых или битовых параметров уже подразумевает определенное представление потенциальных решений в виде строки (хромосомы), к которой могут быть непосредственно применены операторы классического ГА с целью получения оптимальных решений. Каждый аппаратурный параметр в этой задаче принадлежит множеству вещественных чисел и кодируется бинарным набором генов фиксированной длины. Каждый из m параметров КС ДЗЗ, представленный бинарным набором генов, всегда занимает фиксированный участок хромосомы. Так, например, если решению подлежит задача с b_m параметрами, каждый из которых кодируется 4 битами, то хромосома, представленная строкой длиной $4m$ битов, кодирует все возможные потенциальные ре-

шения задачи. Пример такого кодирования (представления) задачи аппаратурного синтеза в виде хромосомы длиной $4m$ генов для морфологического блока (1) приведен ниже.

$$\overbrace{b_{1r} \quad b_{2r} \quad b_{3r}}^{} \quad \overbrace{\dots}^{b_{jr}} \quad \overbrace{b_{mr}}^{} \\ 101000111110 \dots 0110 \dots 1010$$

В хромосоме с такой организацией в компактной форме представлено все множество потенциальных решений задачи параметрического синтеза и тем самым задано поисковое пространство задачи оптимизации. В соответствии с морфологическим блоком (1) в этом примере образовано m участков хромосомы, каждый из которых соответствует одному конкретному параметру КС. Каждый j параметр — это вещественное число, которое в хромосоме кодируется четырьмя бинарными генами и в соответствии с этим может принимать 16 вещественных значений $b_{jr} \in \{b_{j \min(j)=1}, b_{j2}, \dots, b_{j16=\max(j)}\}$.

Рассмотрим более подробно возможную схему кодирования потенциальных решений в задаче параметрического синтеза КС ДЗЗ. Следует отметить, что хотя в рассмотренном примере в хромосоме закодирован некоторый конкретный вариант состава значений параметров КС, однако выполнение процедуры кодирования в явном виде в ГА не предусмотрено. Хромосомы генерируются случайным образом для образования начальной популяции сразу в бинарном виде путем случайного заполнения разрядов (генов) нулями и единицами, например, с помощью генератора случайных чисел. Все последующие операторы ГА работают с кодом. На этапе селекции с образованием родительских пар происходит вычисление значений функции $FF(X_i)$ фитнесса для каждой хромосомы X_i . Эта операция требует декодирования хромосомы, т. е. перехода от бинарного кода параметров КС к их вещественным значениям. Операция декодирования также используется на завершающей стадии поиска, когда требуется «прочитать» оптимальный состав параметров КС ДЗЗ.

В данной работе для кодирования вещественных значений параметров принят код Грэя. Его особенность в том, что две соседние, принадлежащие одному ребру, вершины гиперкуба, на котором осуществляются поиск, всегда декодируются в две ближайшие точки пространства вещественных чисел, которые отстоят друг от друга на один отсчет точности. Другие известные коды, включая и двоично-десятичный код, подобным свойством не обладают.

Таблица позволяет декодировать параметры КС ДЗЗ которые представлены в хромосоме полубайт-

Декодирование хромосомных кодов параметров КС ДЗЗ
в вещественные числа

Хромосомный код	Вещественные значения параметров
0000	$b_{j\min(j)}$
0001	$b_r = b_{j\min(j)} + 1(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
0011	$b_j = b_{j\min(j)} + 2(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
0010	$b_j = b_{j\min(j)} + 3(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
0110	$b_j = b_{j\min(j)} + 4(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
0111	$b_j = b_{j\min(j)} + 5(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
0101	$b_j = b_{j\min(j)} + 6(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
0100	$b_j = b_{j\min(j)} + 7(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
1100	$b_j = b_{j\min(j)} + 8(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
1101	$b_j = b_{j\min(j)} + 9(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
1111	$b_j = b_{j\min(j)} + 10(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
1110	$b_j = b_{j\min(j)} + 11(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
1010	$b_j = b_{j\min(j)} + 12(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
1011	$b_j = b_{j\min(j)} + 13(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
1001	$b_j = b_{j\min(j)} + 14(b_{j\max(j)} - b_{j\min(j)})/15$
1000	$b_{j\max(j)}$

ным кодом Грея. Здесь $b_{j\min(j)}$ — минимальное значение j -го параметра, $b_{j\max(j)}$ — максимальное значение того же параметра КС ДЗЗ, b_j — искомое вещественное значение, соответствующее коду Грея в записи параметра в хромосоме; индекс r , соответствующий номеру отсчета, опущен.

Мутация хромосом для рассматриваемого ГА состоит в инвертировании символа в случайно выби-раемом гене. Использование операторов мутации является эффективным средством для выхода из локального экстремума. Этот механизм может применяться как для популяции родителей, так и для потомков.

Проверка того насколько хорошим является i -е решение задачи осуществляется с помощью вычисления функции фитнесса для хромосомы X_i . Обычно функция фитнесса в явном виде содержит критерий оптимизации решаемой задачи, для параметрического синтеза функция фитнесса имеет вид соотношения (4).

Селекция хромосом состоит в их отборе и формировании следующей популяции. Селекция является случайным процессом, при котором руководствуются правилом: чем большее значение функции приспособленности имеет данная хромосома, тем выше вероятность ее выбора для репродукции. Самым простым и наиболее популярным методом селекции хромосом является метод рулетки, который состоит в следующем.

Суммируются значения функции FF всех хромосом и вычисленная сумма принимается за 100 % (целое «колесо рулетки»); каждой хромосоме X_i приписывается отрезок колеса рулетки, который определяется из отношения

$$FF_r(X_i) = \frac{100 FF(X_i)}{\sum_{i=1}^N FF(X_i)}. \quad (6)$$

Этот отрезок представляется в виде интервала (a, b) , где $0 \leq a, b \leq 100$ и служит мерой вероятности получения данной хромосомы в процессе жеребьевки. Генерируется число p из интервала $[0, 100]$, которое указывает конкретное место колеса рулетки. Процесс генерации повторяется N раз, где N — численность популяции. Каждое генерируемое число p $a \leq p \leq b$ определяет отрезок, и тем самым назначает хромосому, которая дальше подвергается репродукции.

Механизм останова алгоритма определяется на этапе его проектирования с учетом естественных ограничений, связанных со временем счета на ЭВМ или с учетом числа популяций, при которых значение функции приспособленности перестает улучшаться. Полученная в результате n итераций хромосома с наибольшим значением функции приспособленности принимается как решение данной задачи. Однако нет гарантии, что это решение является наилучшим.

Одним из классических вариантов оператора скрещивания является предложенное Холландом одноточечное скрещивание (крессовер). При одноточечном скрещивании случайным образом выбирается число $n \in \{1, 2, \dots, L-1\}$, где L — размер хромосомы, n — точка скрещивания. Затем образуются две новые дочерние хромосомы путем обмена всех генов между двумя родительскими хромосомами, начиная с $n+1$ до L включительно. Де Янг исследовал оператор многоточечного скрещивания, частным случаем которого является двухточечное скрещивание. Скрещивание двухточечное выполняется с помощью случайного выбора m -го и n -го места разрыва в двух родительских хромосомах, где $1 \leq m \leq n$, $m \leq n \leq L$, L — длина хромосомы. Затем образуются две дочерние хромосомы путем обмена генами, расположенными на j -х позициях, между двумя родительскими хромосомами, где $1 \leq j \leq m$, $n \leq j \leq L$. Использования в операторах скрещивания многих точек разрыва приводит к схеме многоточечного скрещивания. Одним из вариантов многоточечного скрещивания (uniform crossover) является равномерное скрещивание [6]. При этом виде скрещивания случайным образом

создается маска скрещивания, которая является строкой длиной L и состоит из нулей и единиц. Из текущей популяции выбирается родительская пара, и две дочерние хромосомы как два новых решения задачи образуются по следующей схеме. Единица на i -й позиции в маске скрещивания означает, что элемент, стоящий на том же месте в хромосоме первого родителя, необходимо поместить на i -е место первой дочерней хромосомы. Нуль на i -й позиции в маске скрещивания означает, что элемент, стоящий на том же месте второго родителя, следует поместить на i -е место первой дочерней хромосомы. Теперь, если первого родителя считать вторым, а второго — первым, то по изложенному правилу можно получить вторую дочернюю хромосому. Маска скрещивания может быть как одинаковой, так и различной для каждой родительской пары в популяции.

Результатом применения изложенного выше ГА для решения задачи параметрического синтеза КС ДЗЗ является хромосома с наибольшим значением КОЭ (4). Декодируя хромосомное решение по таблице, получаем конкретные, квазиоптимальные значения набора параметров КС ДЗЗ. Рассмотренный генетический метод был опробован в тестовой задаче параметрического синтеза КС ДЗЗ с числом характеристик тематических задач, равным 20 (размерность пространства поиска) с равным числом интервалов разбиения каждой характеристики, равным 100, т. е. общее число потенциальных вариантов решения в соответствии с формулой (5) составило 100^{20} . Алгоритм реализован на объектно-ориентированном языке C++, эксперимент проводился на компьютере «Pentium 4». Результаты вычислений близки к оптимальным значениям и были получены за приемлемое время вычислений.

Одно из перспективных направлений использования генетических методов связано с решением задачи составления оптимальных планов-графиков ДЗЗ, формулируется как задача синтеза расписаний (Scheduling problems) [3], однако ее решение требует конструирования метода генетического типа, отличающегося от изложенного выше. Задача синтеза расписаний станет чрезвычайно актуальной при разворачивании сети микро- и наноспутников для ДЗЗ. Использование информации, поступающей от многих спутников, сулит значительные экономические выгоды, расширяет область эффективного использования методов ДЗЗ в различных отраслях, повышает точность и достоверность регистрируемых параметров наблюдений.

Комплексное использование КС ДЗЗ со многими спутниками требует создания соответствующих планов-графиков их эксплуатации. Для решения

задач этого класса (комбинаторных задач) в настоящее время применяются различные генетические методы. Однако в каждом конкретном случае требуется формирование своих критериев и создания соответствующих процедур принятия решений. Задача синтеза расписаний формулируется как поиск оптимального распределения множества работ во времени и между обслуживающими аппаратами (серверами), в нашем случае между различными космическими аппаратами, несущими на борту различную регистрирующую аппаратуру. Для того чтобы при составлении расписаний функционирования комплексной КС ДЗЗ применить ГА, необходимо создавать свое специальное представление (кодировку) задачи. В свою очередь, созданные представления задачи не всегда позволяют применить к ним классические операторы ГА, и тогда необходимо модифицировать или разрабатывать специальные операторы, которые бы сохраняли, выращивали и рекомбинировали хорошие схемы решений задачи.

Все способы представления решений для задачи синтеза расписаний можно классифицировать на два типа. К первому типу относятся представления в явной форме, при которых генам соответствуют номера работ. Одним из прогрессивных методов такого типа представлений является способ *перестановки с повторением* [3]. При таком способе представления все решения рассматриваемой задачи представлены в хромосоме. Однако использовать классические методы скрещивания и мутации нельзя, поскольку каждая работа должна фигурировать в расписании только один раз. Возникает проблема коррекции дочерних хромосом после скрещивания. Эта проблема решается путем использования других, отличающихся от рассмотренных выше, операторов скрещивания, например на основе известного метода PMX и его модификаций.

Второй тип представлений решений в задаче синтеза расписаний может быть назван неявным представлением. При использовании этого типа представления гены кодируют не номера работ, а правила генерации очередного варианта расписаний. Этот тип представлений использован в методе *Hsio — Lang Fanga* [4].

Разработка методов синтеза расписаний для КС ДЗЗ может быть темой отдельной публикации. В данной статье продемонстрированы возможности использования генетических методов для автоматизации проектирования КС ДЗЗ.

Генетические методы допускают объектно-ориентированный подход при программировании, что обеспечивает им универсальность и позволяет рассматривать их как современную информационную

технологию проектирования и обслуживания космических систем ДЗЗ.

1. Норенков И. П. Генетические методы структурного синтеза проектных решений // Информ. технологии.—1998.—№ 1.—С. 9—13.
2. Федоровский А. Д., Рябоконенко С. А., Козлов З. В. Основные требования к параметрам космического аппаратурного комплекса зондирования Земли // Доп. НАНУ.—2003.—№ 7.—С. 118—122.
3. Bierwirth C., Mattfeld D., Kopfer H. On permutation representations for scheduling problems // Parallel problem solving from nature / Eds H. M. Voigt et. al. — Berlin: Springer-Verlag, 1996.—P. 310—318.
4. Fang H. L. Genetic algorithms in timetabling and scheduling. — Edinburg: Department of Artificial Intelligence Univ. of Edinburg, 2000.—153 p.—A dissertation.
5. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. — USA: Addison-Wesley Publ. Company, Inc., 1989.—315 p.

6. Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory with application to biology, control and artificial intelligence. — USA: Univ. of Michigan, 1975.—248 p.
7. Syswerda G. Uniform crossover in genetic algorithms // Proc. of the Third International Conf. on genetic algorithms. — Morgan Kaufmann Publishing, 1989.—P. 2—9.

**PARAMETRIC SYNTHESIS OF SPACE SYSTEMS FOR
REMOTE SENSING OF THE EARTH ON THE BASIS
OF THE GENETIC METHOD**

A. D. Fedorovskyi, M. V. Artiushenko, Z. V. Kozlov

The methodical aspects of requirement definition to parameters of space systems for remote sensing of the Earth are considered on the basis of the genetic approach. The requirements to the system parameters are determined from the condition of their conformity to the characteristics ensuring the solution of theme problems of the RSE scientific and applied programs with the greatest probability.

УДК 729.68

В. Є. Шатіхін¹, Л. П. Семенов¹, Ю. Г. Артеменко²,
В. М. Борисенко², О. О. Геленко²

¹Національне космічне агентство України, Київ

²Державне конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

Коливання, викликані пружними виносними конструкціїми космічного апарату

Надійшла до редакції 06.11.03

Розглянуто коливання, зумовлені пружними виносними елементами конструкції космічного апарату — антенно-фідерним пристроям та панелями сонячних батарей. Проведено аналіз моделей коливань, зумовлених панелями сонячних батарей. Надано рекомендації щодо уточнення розрахунків коливань, викликаних наявністю пружних елементів конструкції космічного апарату з урахуванням останніх напрацювань в галузі матеріалознавства.

Дослідженю коливань, викликаних пружними виносними елементами конструкції космічного апарату (КА) присвячено багато робіт. Зазначена проблема вивчається більш як три десятиліття, проте до цього часу лишається актуальною.

Запропонована стаття має за мету підтвердити актуальність цієї проблеми на цей час, дати огляд основних моделей пружних виносних елементів конструкції сучасних КА (в багатьох джерелах використовується також термін «виносні підконструкції КА малої жорсткості»), доцільність їхнього вибору та застосування в залежності від тактико-технічних та конструкторсько-технологічних особливостей КА, обґрунтувати доцільність підвищення точності розрахунків коливань панелей сонячних батарей (СБ) з урахуванням останніх напрацювань в галузі матеріалознавства.

До сучасних КА ставляться жорсткі вимоги стосовно лінійних та кутових переміщень на орбіті. Це пов'язано з розширенням та ускладненням завдань, які виконують КА в інтересах різноманітних галузей господарства, наукових досліджень, а також в інтересах оборони та безпеки країни. Більшість апаратів має виносні елементи «малої» жорсткості, це — панелі СБ, антенні пристрої, виконавчі органи різноманітних механізмів науково-дослідницького призначення тощо.

© В. Є. ШАТИХІН, Л. П. СЕМЕНОВ, Ю. Г. АРТЕМЕНКО,
В. М. БОРИСЕНКО, О. О. ГЕЛЕНКО, 2004

Зазначені елементи конструкції КА можуть бути джерелами коливань, що передаються на корпус КА та впливають на параметри його руху. Ці коливання разом з вібраціями, викликаними функціонуванням механізмів КА, негативно впливають на роботу оптико-електронних приладів спостереження Землі, іншої науково-дослідницької апаратури та викликають погіршення роздільної здатності бортової апаратури КА, одного з основних показників бортового спеціального комплексу КА дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Актуальність зазначеної проблеми до цього часу зумовлена розповсюдженням нових матеріалів та технологій, конструктивними особливостями КА, що створюються, в тому числі нових технологій розробки СБ, збільшенням терміну активного існування КА до 15 років тощо і необхідністю врахування впливу цих факторів на параметри руху КА як на стадії проектування, так і під час автономного та комплексного відпрацювання.

Проблемою коливань, зумовлених пружними виносними елементами конструкції КА, займаються провідні організації космічної галузі як в Україні, так і за її межами. Аналіз бортових джерел збурень КА, проведений НПВ ім. С. А. Лавочкіна [11] вказав на наявність вібрацій на борту КА в діапазоні частот від 0 до 150 Гц від функціонування

бортового обладнання та виносних елементів конструкції КА «малої» жорсткості. Результати розрахунків показали, що найбільший вплив на вібрації КА викликають коливання низької частоти від функціонування приводу СБ з урахуванням коливань панелей СБ та антенно-фідерних пристрій (АФП). Аналогічні результати отримано в дослідженнях ізраїльських науковців [25]. Наведені приклади підтверджують актуальність вирішення проблеми зниження коливань, зумовлених виносними пружними елементами конструкції КА.

Дослідження проведемо для антени та панелей СБ КА як для типових пружних виносних елементів конструкції КА. Математичну модель антени та панелей СБ КА можна представити у вигляді стержня та відповідно гнучкої пластиини, балкисмуги, кінцевоелементної схеми. Звичайно, перелік джерел збурень коливань КА та моделей їхнього опису цим не вичерpuється, але розглядувані варіанти, на нашу думку, найрозповсюдженіші.

При розгляді коливань, зумовлених АФП, вважатимемо космічний апарат жорстким тілом, до якого закріплено стержень. Для спрощення космічний апарат має форму циліндра, стержень — однорідний, ізотропний, має сталу товщину, направлений вздовж осі x , яка перпендикулярна до осі y , напрямленої вздовж циліндра.

Використовуючи рівняння Ейлера для функціонала Остроградського — Гамільтона [2], визначаємо власні коливання балки з рівняння

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(P \frac{\partial y}{\partial x} \right) - f + \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} \left(J_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \right) = 0, \quad (1)$$

де x — координати точок стержня вздовж осі x , y — відхилення точок стержня від осі x , ρ — маса одиниці довжини стержня, E — модуль пружності, J — момент інерції поперечного перерізу відносно нейтральної осі перерізу, перпендикулярної до площини коливань, J_0 — момент інерції одиниці довжини стержня відносно центральної осі, перпендикулярної до площини коливань, f — розподілене поперечне навантаження, появу якого спричиняють зовнішні сили, що діють на КА, керуючі моменти та інші сили внутрішньої взаємодії, P — поздовжня сила, спрямована вздовж антени.

Вважатимемо, що довжина антени значно більша від її товщини, тому останнім членом у лівій частині рівняння (1) знехтуємо. Крім того, знехтуємо поздовжньою силою P .

До зовнішніх сил, що діють на КА та визначають коливання антени достатньо віднести наступні си-

ли, які викликають розподілене навантаження, що наведено в рівнянні (1):

$$F_s = F_g + F_o + F_m + F_{cr}, \quad (2)$$

де F_s — сумарна зовнішня сила, що діє на стержень, F_g — сила гравітаційної взаємодії стержня з Землею, Місяцем, Сонцем, F_m — сила взаємодії стержня з магнітним полем Землі, F_o — сила аеродинамічного опору, F_{cr} — сила світлового тиску.

В залежності від висоти орбіти, конструктивних особливостей космічного апарату, бортового обладнання вирішальним є той чи інший вид зовнішніх діючих сил, наведених у рівнянні (2). В багатьох випадках дією інших сил доцільно нехтувати.

Так, для кругових орбіт висотою до 1000 км переважним фактором є аеродинамічний опір, на висотах понад 5000 км переважає дія сили світлового тиску [3].

До сил внутрішньої взаємодії КА відносимо керуючі сили, а також фактори, що спричиняють вібрації КА, а саме керуючі сили, що викликані двигунами-маховиками, незрівноваженість ланок механізмів КА, переходні процеси у приводах механізмів КА, нерівномірність ходу механізмів, коливання палива в паливних баках тощо.

Після спрощення рівняння (1) має вигляд

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = f. \quad (3)$$

Як було сказано вище, вважаємо модель антени як стержень з жорстко закріпленим кінцем. На такому кінці відхилення та кут повороту дорівнюють нулю:

$$y=0, \quad \frac{\partial y}{\partial x}=0.$$

Визначення частоти коливань антени зводиться до вирішення рівняння (3) з наданими початковими умовами та $f = 0$.

Перелік припущення, що були вказані раніше, не є вичерпним.

Момент інерції у випадку деформації не є величиною сталою [7], проте для більшості розрахунків на стадії проектування достатньо вважати його сталим. В рівнянні (1) не враховано дію термомеханічних деформацій, вплив факторів космічного простору (ФКП), що викликають, зокрема, зміну величини E , модуля зсуву G , коефіцієнта Пуассона μ . Про врахування цих чинників буде викладено нижче.

Динаміка руху КА з урахуванням коливань, що викликані пружним стержнем, надається у вигляді рівняння [2, 7]

$$J_{KA} \frac{dw_{KA}}{dt} + J_c \frac{dw_c}{dt} = M_\Sigma + \int_0^l (x + r) \left[\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \right. \\ \left. + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(J_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial y} \right) \right] dx, \quad (4)$$

де J_{KA} — момент інерції КА, w_{KA} — кутова швидкість обертання КА, w_c — кутова швидкість обертання стержня відносно осі у з урахуванням всієї довжини стержня l до осі обертання КА, r — відстань від центра осі КА до початку стержня, тобто $l = x + r$, M_Σ — сумарний момент дії зовнішніх та внутрішніх сил.

Вплив деформації радіоантени на параметри руху КА розглянемо на прикладі супутника RAE-1, що успішно функціонував на орбіті на протязі чотирьох років [14]. Цей приклад становить інтерес, оскільки за впливом на параметри руху КА завдяки розмірам та гнучкості антен він, на нашу думку, є актуальним до цього дня.

Крім того, досить складне математичне моделювання, що було здійснено на цьому КА стосовно впливу коливань радіоантени на рух КА, майже повністю було підтверджено практичним спостереженням на борту апарата за допомогою телевізійних камер та оптичних приладів спостереження.

На параметри руху КА, що були викликані коливанням пружної радіоантени, здійснювали вплив гравітаційні навантаження, эксцентриситет орбіти, термомеханічні деформації та сонячний тиск, оскільки висота орбіти запуску становила 6000 км. Як було сказано вище, на цій висоті вплив світлового тиску має більше значення, ніж вплив аеродинамічного опору та сили магнітної взаємодії, тому при розрахунках останніми двома чинниками знехтували.

Для повного розуміння проблеми доцільно стисло сказати про супутник RAE-1. Метою запуску супутника було здійснення вимірювань інтенсивності радіосигналів, що йдуть з космосу, зокрема для розробки карти радіогалактики в діапазоні частот від 0.5 до 10 МГц.

Для виконання поставленого завдання необхідно було розгорнути систему антен з мінімальним відхиленням від заданої геометрії та забезпечити високу точність їхньої орієнтації в космічному просторі. Після розкриття чотирьох елементів головних антен довжиною в 230 м кожний утворювались дві антени, які перехрещувались в центрі корпуса супутника під кутом 55°.

Значна довжина антен була тісно складністю, що потребувала математичного моделювання коливань КА з урахуванням пружності елементів антен на стадії проектування КА. Під час польоту КА спо-

стереження за положенням антен здійснювалось за допомогою телевізійних камер. Для стабілізації супутника використовувались 96-м стабілізаційні штанги.

Розкриття антен здійснювалось у три етапи, відповідно на довжини 138, 184 та 230 м, в цілому протягом 2.5 місяців.

При визначенні параметрів руху цього КА були зроблені такі припущення:

- корпус супутника та стабілізаційні штанги вважались жорсткими;
- коливання антен на вигин були представлені рядом гармонік зі змінними у часі амплітудами;
- зусилля вздовж антен вважались несуттєвими;
- приростом кінетичної енергії за рахунок крутільних коливань можна знехтувати, оскільки момент інерції відносно повздовжньої осі антен значно менший, ніж моменти інерції відносно інших осей.

Загальна кількість диференційних рівнянь другого порядку, що описували рух КА, досягла 31.

Математичне моделювання супутника та практичне підтвердження результатів руху КА дали змогу зробити важливі висновки:

- за допомогою математичного моделювання були отримані основні конструктивні параметри КА з точністю до 10 %;
- за першим приближенням рух супутника відносно центра мас можна було визначати з урахуванням основного тону коливань;
- динаміка руху супутника з довжиною антен до 180 м була близькою до динаміки супутника з жорстким тілом;
- демпфування коливань асиметричного супутника було більш ефективним, ніж для космічного апарату симетричної форми;
- найсуттєвішими чинниками, що зумовлювали коливання супутника були жорсткість супутника на вигин, жорсткість на скручування та термічний градієнт елементів головних антен.

Необхідно вказати на те, що пружність корпусу КА спричиняє також коливання, які в сумі з коливаннями, зумовленими виносними пружними елементами конструкції КА, суттєво впливають на динамічні характеристики КА. Це є темою окремого дослідження. Тут лише відзначимо, що врахування в алгоритмі управління КА коливань, зумовлених пружністю як корпусу КА, так і його пружних виносних конструкцій, поліпшує керованість КА.

При розгляді математичної моделі коливань, викликаних панелями СБ, діють припущення, аналогічні до коливань антен, тобто КА являє собою жорстке тіло із закріпленими на ньому пружними консолями, які представлено вигляді або

суцільних середовищ, або дискретної кількості твердих взаємодотичних тіл, що зв'язані між собою безмасовими пружними елементами, названими кінцевими елементами. У цьому випадку маса консолі розподіляється по усіх кінцевих елементах.

Дослідження панелей СБ розпочинається з визначення частоти вільних коливань панелі. Визначення частоти вільних коливань необхідне для обчислювання резонансної частоти коливань панелей СБ, щоб запобігти можливому резонансу складових частин системи управління КА.

Перелік основних зовнішніх і внутрішніх сил та їхніх моментів не відрізняється за своєю природою від сил, що діють на антенну КА.

При досліджені коливань панелей СБ, як було вказано вище, розглядаються такі основні математичні моделі СБ:

- гнутика пластинка;
- балка-смуга;
- кінцевоелементна схема.

Кожна модель має свої переваги та недоліки. Застосуваннякої моделі залежить від конструктивних особливостей СБ та КА, стадії створення КА, призначення КА, вибору схеми закріплення секцій батареї та інших чинників.

Застосування першої моделі доцільне на стадії проектування, оскільки, не приймаючи до уваги складність та велику кількість вихідних рівнянь, що описують коливання панелі СБ, використання цієї моделі потребує додаткових припущень та спрощень. Крім того, навіть на стадії проектування використання моделі залежить також від конструктивних особливостей панелей БФ. Розглядаючи нижче коливання панелей БФ КА «Океан-О», визначимо недоцільність застосування цієї моделі для КА «Океан-О».

Модель балки-смуги дозволяє виконати приблизні розрахунки, оскільки не враховує взаємного впливу зон конструкції, що знаходяться за межами балок. Проте ця модель достатньо проста та порівняно легко реалізується на сучасних обчислю-

вальних засобах, оскільки приводить до порівняно невеликої кількості аналітичних залежностей. Розрахунки, отримані використанням моделі балки-смуги, доцільно уточнювати застосуванням кінцевоелементної схеми.

Математична модель із застосуванням методу кінцевих елементів дозволяє отримати найточніші значення параметрів коливання панелі СБ при точно наданих зовнішніх факторах та обмеженнях для попередньо вибраної геометрії елементів панелей СБ і характеристик застосованих матеріалів. Отже, недоліком кінцевоелементної моделі є її обмежене пристосовання для вибору оптимальних параметрів панелі СБ; її ефективне використання доцільне для тестових розрахунків попередньо спроектованої оптимальної панелі СБ.

Розглянемо застосуваннякої моделі панелей СБ окремо. Розпочнемо з першої моделі — гнутою пластинки.

Для спрощеного дослідження коливань панелей батареї СБ зробимо ряд припущень.

1. Вважатимемо пластинку, що моделює панель СБ, прямокутною, однорідною та ізотропною з однаковою товщиною.

2. Деформації на згин вважатимемо пружними, малими та такими, що підлягають закону Гука.

3. Вважатимемо, що у пластинці є нейтральний шар, відстані між точками якого при згинах не змінюються. В однорідній пластинці цей шар збігається із серединною площину, що розділяє витсоту пластини навпіл.

4. Вважатимемо, що під час вигину пластини всі точки нейтрального шару переміщуються паралельно осі Oz , що проходить через центр пластини і є пепендикулярно до площини пластини.

Точки, що знаходяться на нормалі MN до нейтрального шару Ox (рис. 1), залишаються на цій нормалі також під час вигину пластини, обертаючись разом з нормаллю навколо точки A .

5. Переміщення всіх точок, що лежать на одній нормалі до нейтрального шару, паралельні осі Oz ,

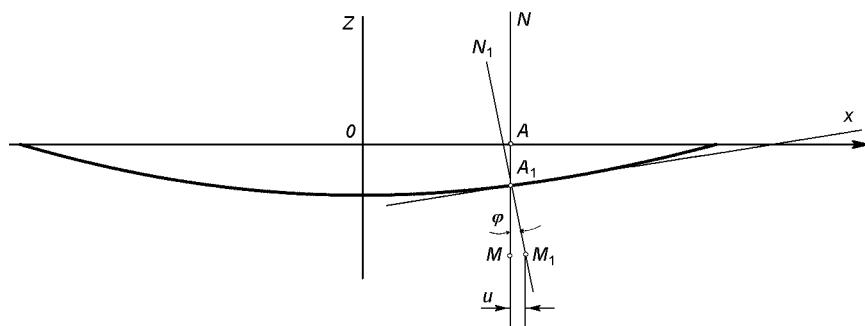


Рис. 1. Моделювання вигину панелі СБ.

однакові та дорівнюють відповідним переміщенням точок нейтрального шару.

Враховуючи викладені вище припущення, коливання панелі СБ зводяться до рівняння [7, 14]

$$\frac{d^2w}{dt^2} + \frac{D}{\gamma} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = F, \quad (5)$$

де D — циліндрична жорсткість, x, y — координати точок панелі, w — відхилення точок поверхні панелі СБ відносно осі z , γ — маса на одиницю площини панелі СБ, F — сумарна сила, що враховує дію сил внутрішньої взаємодії та зовнішніх сил.

Циліндрична жорсткість визначається формулою [2]

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (6)$$

де h — товщина панелі.

Для випадку визначення власних коливань панелі

$$\frac{d^2w}{dt^2} + \frac{D}{\gamma} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = 0. \quad (7)$$

Методи та умови вирішення цього рівняння викладено в роботі [2].

Необхідно вказати, що формулі (5)–(7) не враховують дію ФКП, що спричиняють термомеханічні деформації панелей СБ та здійснюють вплив на фізико-механічні властивості матеріалів. Тому величини E, μ не є сталими, що зрештою впливає на розрахунок величин власних частот коливання панелей СБ.

У ДКБ «Південне» в 2002–2003 рр. проведено дослідження впливу температури на величину модуля пружності матеріалу та величини відносного видовження композиції сучасних панелей СБ, що складається з вуглецевої стрічки ЕЛУР-0.08, насищеною епоксидним зв'язником ЕТД-10П та дубльованої поліімідної плівки товщиною 40 мкм.

На рис. 2 надано результати вимірювання відносного видовження в інтервалі температур (-100 ...+100) °C для зразків вуглепластика, орієнтованих вздовж напрямку волокон (крива 1) та поперек волокон (крива 2), де

$$\Delta l = l_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (8)$$

(α — коефіцієнт теплового розширення, T — температура зразка, l_0 — початкова довжина зразка). Причиною такої різниці може бути зміна коефіцієнта лінійного розширення зразків композиції вуглецевої стрічки ЕЛУР, яка відбувається за рахунок розм'якшення полімерів — складників композиції.

З графіка видно, що при температурі -93 °C відносне видовження зразка матеріалу, вирізаного

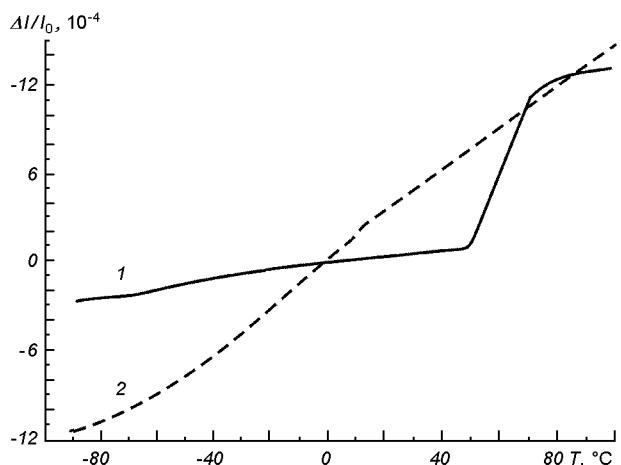


Рис. 2. Графік залежності відносного видовження $\Delta l/l_0$ від температури матеріалу зразків, вирізаних в поздовжньому (крива 1) та поперечному напрямках (крива 2) волокон вуглецевої стрічки

Результати проведених вимірювань для зразків поперечної орієнтації

№	Температура, T, °C	Границя міцності, σ_B , МПа	Модуль пружності, E, МПа
1	-196	57.5	1620
2	-100	41.02	960
3	16	29.95	710
4	80	24.85	420

вздовж вуглецевих волокон, приблизно учесть більше, ніж для зразка матеріалу, вирізаного поперек вуглецевих волокон ($-2.89 \cdot 10^{-4}$ та $-11.6 \cdot 10^{-4}$ відповідно).

Крім того, нерегулярність поведінки кривих залежності відносного видовження від температури може вказувати на неаддитивність внеску в теплове розширення вуглецевої матриці, епоксидного наповнювача та поліімідної плівки.

Дослідження модуля пружності показали, що його температурна залежність в робочому діапазоні температур для матеріалу поздовжньої орієнтації несуттєва: зі зменшенням температури модуль пружності збільшується приблизно на 10 %.

Для матеріалу поперечної орієнтації спостерігалась значна залежність величини модуля пружності в робочому діапазоні температур.

Як видно з таблиці, модуль пружності збільшується удвічі при зменшенні температури матеріалу з +80 °C до -100 °C.

Для детального аналізу коливань КА наведені

вище дані рекомендується враховувати в розрахунках та керуватись ними при розробці заходів щодо зменшення збурень, діючих на КА.

На практиці розрахункова модель у вигляді пластини з метою отримання точніших ого результатів обчислювання розглядається у вигляді тришарової пластини, яка складається з обшивки та заповнювача. Обшивка та заповнювач мають різні значення модуля пружності та густини. Модуль пружності, модуль зсуву, крім того, змінюються в залежності від напрямку. При розрахунках, які є досить складними та громіздкими, доцільно враховувати також вплив клейових з'єднань.

Для попередніх розрахунків зазначена модель може мати, зокрема, такі обмеження:

- не враховується дія зовнішніх поздовжніх сил;
- не враховується зміна модуля пружності та коефіцієнта Пуассона від температури та інших ФКП;
- не враховується дія клейових з'єднань;
- не враховується модуль пружності, коефіцієнт Пуассона та момент інерції, що створюють фотоперетворювачі (ФП).

Необхідність цих та інших можливих припущень знижує точність вирішення завдання. Проте, навіть якщо зазначені припущення будуть враховані розрахунковою моделлю, необхідність додаткових припущень для опису дискретного закріплення панелі може суттєво знизити точність розрахунків на ЕОМ.

Розрахункова модель у вигляді балок-смуг, які вирізаються у поздовжньому та поперечному напрямках панелі, є простим засобом оптимізації моделювання панелей СБ з урахуванням специфіки цього класу конструкцій космічної техніки і може бути покладена в основу для попередніх розрахунків. Ця модель, зокрема, дозволяє будувати процес оптимізації по масі панелі при кількох та більше змінних параметрах, що можна використати також для дослідження та оптимізації коливань, враховуючи попередні викладки.

За модель балки-смуги (рис. 3) приймається система ортогональних балок-смуг на двох опорах з консолями під дією рівномірно розподіленого навантаження, що викликають сили, вказані в рівнянні (2). Для спрощення обмежимось розподіленим рівномірним навантаженням, викликаним зовнішніми силами. В подальшому несиметричне навантаження СБ розглядається за межами процесу оптимізації.

Під дією навантаження смугова балка має максимальні вигини відповідно на кінцях консолі та в середині між опорами. Якщо максимальні переміщення балки обмежені постановкою завдання, то

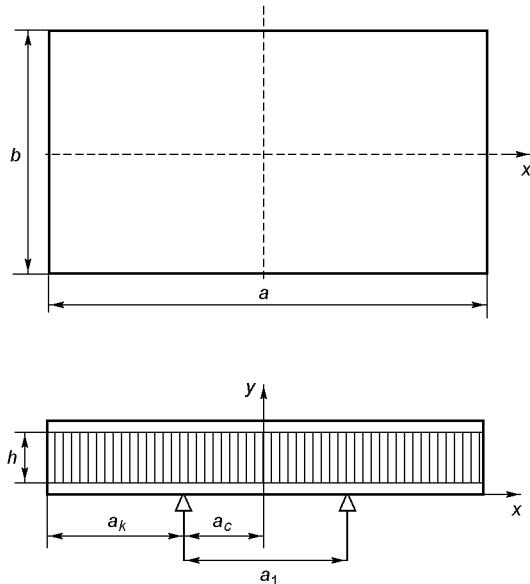


Рис. 3. Модель балки-смуги

реалізація умови мінімальних переміщень балки при заданих навантаженнях передбачає рівність вигинів:

$$w_{ak} = w_{ac}, \quad w_{bk} = w_{bc}. \quad (9)$$

Після розрахунків, використовуючи формулі джерела [1], отримуємо

$$w_{ak} = \frac{q(a - a_1)}{384E_x J} (3a^3 - 9a^2a_1 + 9aa_1^2 + 5a_1^3), \quad (10)$$

$$w_{bk} = \frac{q(b - b_1)}{384E_y J} (3b^3 - 9b^2b_1 + 9bb_1^2 + 5b_1^3), \quad (11)$$

де E_x , E_y — модулі пружності несучих шарів в напрямках x , y ; J — момент інерції поперечного перерізу балки-смуги; a , b , a_1 — відстані, що вказані на рис. 3; b_1 — відстань між опорами вздовж осі y (рис. 3); q — питоме навантаження, що діє на балку; w_{ak} , w_{ac} — максимальні вигини балки довжиною a на консолі і в центрі; w_{bk} , w_{bc} — максимальні вигини балки довжиною b на консолі і в центрі.

З урахуванням рівняння (9), використовуючи (10), (11) отримуємо

$$16\bar{a}_1^4 - 4\bar{a}_1^3 - 36\bar{a}_1^2 + 9 = 0, \quad (12)$$

$$16\bar{b}_1^4 - 4\bar{b}_1^3 - 36\bar{b}_1^2 + 9 = 0, \quad (13)$$

де

$$\bar{a}_1 = \frac{a_1}{a}, \quad \bar{b}_1 = \frac{b_1}{b}.$$

Розв'язки рівнянь (12) та (13) визначають координати оптимального розміщення опор панелі СБ:

$$a_1 = 0.516a, \quad b_1 = 0.516b. \quad (14)$$

Оскільки вважаємо, що поверхня СБ є нерозривною, то повинно мати місце рівність вигинів:

$$w_{ak} = w_{bk}. \quad (15)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (10)–(11), після нескладних перетворень отримуємо

$$E_x = \left(\frac{a}{b}\right)^4 E_y. \quad (16)$$

Рівняння (16) визначає співвідношення модулів пружності матеріалу обшивки з конструкційних матеріалів, що складаються з елементарних однонаправлених моношарів. Характеристики моношару (заповнювача) згідно з теорією армування визначаються рівняннями структурної механіки [5]:

$$E_0 = E_b \theta + E_m (1 - \theta), \quad (17)$$

$$E_{90} = \frac{E_b}{\theta + \frac{E_b}{E_m} (1 - \theta)}, \quad (18)$$

де E_0 — модуль пружності уздовж волокон; E_{90} — модуль пружності моношару поперек волокон; E_b — модуль пружності волокна; E_m — модуль пружності зв'язувальної матриці; θ — відносний об'ємний зміст волокон у моношарі.

Коефіцієнт Пуассона моношару визначається за формuloю

$$\mu_{90} = \mu_b + \mu_m (1 - \theta), \quad (19)$$

де μ_b — коефіцієнт Пуассона волокна; μ_m — коефіцієнт Пуассона зв'язувальної матриці.

Кінцева формула має вигляд

$$E_x = \left(\frac{a}{b}\right)^4 \frac{E_0 + E_{90}}{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^4}, \quad (20)$$

$$E_y = \frac{E_0 + E_{90}}{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^4}. \quad (21)$$

Розгляд кінцевоелементної схеми моделювання коливань панелей СБ доцільно здійснити на при-

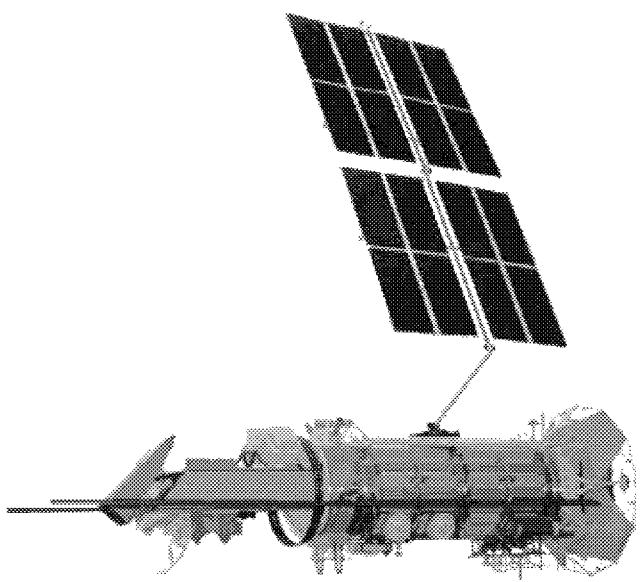


Рис. 4. КА «Океан-О»

кладі КА «Океан-О». Для кращого розуміння причини вибору цієї моделі необхідно стисло ознайомитися з конструкцією панелей СБ КА «Океан-О» та їхніми основними параметрами.

Блок батареї сонячних КА «Океан-О» складається з чотирьох панелей (рис. 4) загальною площею в 60 m^2 . Панель БС складається з прямокутного каркаса з розмірами $1 \times 4 \text{ м}$, на який натягнуто та приkleено по периметру сітеве полотно.

Кожний каркас виготовлено з вуглепластикових труб та з кутових і проміжних фітінгів. Каркас розділено на чотири одинакових квадрати. Фітінги та вуглепластикові труби склеюються між собою. Торцеві поверхні фітінгів мають різьбові отвори для закріплення механізмів повороту, а також елементів зачековки. З одного торця каркасу СБ встановлена труба з алюмінієвого сплаву, до якої закріплюються діодні плати та електричні переходники.

З метою запобігання провисання сітевого полотна із закріпленими ФП усередині кожного квадрата натягається демпфер із склопластикових пластин. Електричні проводи та кабелі від ФП виводяться отворами усередині фітінгів та труб.

Через складну конструкцію та велику площину панелей СБ за оптимальну розрахункову модель була прийнята кінцевоелементна модель. За її допомогою проводилось математичне моделювання вибору варіантів конструкції панелей СБ для запобігання збігу частоти приводу СБ та власних

частот конструкції панелей СБ, а також зменшення впливу коливань, зумовлених пружністю панелей СБ.

Застосування кінцевоелементної розрахункової схеми забезпечило створення СБ, які задовільнили вимоги уникнення резонансу при експлуатації КА, а також вимогам щодо міцності, стійкості до ФКП, надійності, необхідного рівня деградації характеристик ФП. Проте результати експлуатації свідчать про наявність значних коливань КА в польоті.

Динаміку руху КА з урахуванням коливань, що викликані панелями СБ викладено в роботах [7, 12, 14].

ВИСНОВКИ

1. Збільшення номенклатури вирішуваних сучасними КА народногосподарських та наукових завдань, що викликає підвищення роздільної здатності спостережень до кількох десятків сантиметрів, вимагає точнішого визначення коливань пружних елементів конструкції КА з метою врахування їх в алгоритмі системи управління. Це стосується як математичного моделювання на стадії проектування, так і перевірочних розрахунків спроектованої конструкції.

Наскільки точно необхідно враховувати коливання, що викликані пружними конструкціями, залежить, зокрема, від конструктивних особливостей КА, тобто його призначення та технічних характеристик бортової апаратури. Задані тактико-технічні характеристики бортового обладнання КА зумовлюють необхідність проведення «уточнених» розрахунків. У багатьох випадках висока точність недоцільна. Проте якщо створюється КА або базова космічна платформа з високоточною бортовою апаратурою ДЗЗ, а також для забезпечення точних наукових експериментів, високоякісного лазерного зв'язку тощо висока точність розрахунків необхідна.

2. Математичне моделювання коливань КА, зумовлених пружністю елементів конструкції, які можна описати як стержень, забезпечує задовільні результати на стадії проектування та їхнього підтвердження при наземному відпрацюванні і при експлуатації КА.

3. Вид математичної моделі СБ для опису коливань вибирається в залежності від стадії розробки, призначення КА та покладених на нього завдань.

4. Зроблені в ДКБ «Південне» дослідження щодо зміни модуля пружності та лінійного подовження вуглецевої стрічки ЭЛУР-0.08 в залежності від температури можуть бути рекомендованими для

врахування при розрахунках параметрів коливань панелей СБ. На цей час ДКБ «Південне» продовжує дослідження впливу ФКП на фізико-механічні характеристики інших матеріалів, що входять до складових частин БФ.

5. Існують шляхи підвищення точності розрахунків коливань панелей СБ на стадії проектування, зокрема за рахунок врахування фізико-хімічних властивостей основних складових частин панелей СБ, а саме — модулів пружності, зсуву, моменту інерції та коефіцієнта Пуассона клейових з'єднань, ізоляційної стрічки і фотоперетворювачів. Крім того, врахування залежності величин модуля пружності та коефіцієнта Пуассона матеріалів панелей СБ від температури та інших ФКП також підвищує достовірність обчислень.

6. З метою точнішого математичного моделювання коливань пружних елементів конструкцій КА необхідно продовжувати роботи з дослідження впливу на матеріали дії ФКП, особливо їхнього комплексного впливу.

Це зумовлено також широким розповсюдженням в конструкції сучасних КА композиційних матеріалів, властивості яких в умовах збільшення термінів активного існування КА до 15 років ще не досліджено.

Крім результатів якісного дослідження, отримані напрацювання сприятимуть розробці ефективніших заходів задля зменшення коливань КА.

1. Астахов М. Ф., Караваев А. В., Макаров С. Я., Сузальцев Я. Я. Справочная книга по расчету самолета на прочность. — М.: Оборонгиз, 1954.—533 с.
2. Бабаков И. М. Теория колебаний. — М.: Наука, 1965.—560 с.
3. Балк М. Б. Элементы динамики космического полета. — М.: Наука, 1965.—340 с.
4. Безручко К. В., Белан Н. В., Белов Д. Г. и др. Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование. — Харьков: Государственный аэрокосмический ин-т им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2000.—514 с.
5. Гайдачук В. Е., Карпов Я. С., Русин М. Ю. Механика волокнистых композиционных материалов: Учебное пособие. — Харьков: Харьков. авиационный ин-т, 1991.—97 с.
6. Добронравов В. В., Никитин Н. Н., Дворников А. Л. Курс теоретической механики. — М.: Вышш. шк., 1974.—526 с.
7. Згуровский М. З., Бидок П. И. Анализ и управление большими космическими конструкциями. — Киев: Наук. думка, 1997.—450 с.
8. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем. — Киев: Вища шк., 1987.—64 с.
9. Кореневский Д. Г. Устойчивость динамических систем при случайных возмущениях параметров. — Киев: Наук. думка, 1989.—208 с.
10. Мелуя А. И. Старт космической технологии. — М.: Наука, 1990.—185 с.
11. Моишеев А. А., Мордига Ю. О. Сравнительный анализ влияния основных бортовых источников возмущений КА на

- «вибрационный смаз» изображения космического телескопа. — М.: НПО им. А. С. Лавочкина, 2001.—([www.ihst.ru/~akm.sec2\(2001\).htm](http://www.ihst.ru/~akm.sec2(2001).htm)-62k, 2001).
12. Нур Г. С., Райан Р. С., Скоффилд Х. Н. Динамика больших аэрокосмических систем и управление ими // Аэрокосмическая техника.—1985.—№ 6.—С. 129—147.
 13. Панин В. Ф., Гладков Ю. А. Конструкции с заполнителем: Справочник. — М.: Машиностроение, 1991.—272 с.
 14. Петров Б. И., Рутковский В. Ю. Управление в пространстве // Тр. 6 Междунар. симп. ИФАК по автоматическому управлению в пространстве. — М.: Наука, 1976.—660 с.
 15. Разыграев А. П. Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. — М.: Машиностроение, 1977.—472 с.
 16. Сидеронкова М. А., Сливинский В. И. Технология производства трехслойных сотовых конструкций: Учебное пособие. — Харьков: Харьков. авиационный ин-т, 1997.—57 с.
 17. Сливинский В. И. Проблемы создания суперлегких конструкций солнечных батарей космического назначения и концепция их оптимизации // Технологические системы.—2000.—2(4).—С. 80—82.
 18. Соболев В. А., Горелов Ю. Н. Развитие методов математического моделирования для задач механики и процессов управления. — Самара: Самарский гос. ун-т, 2000.—maul.samara.ru/~cosmos/structure/matherial.htm—94k, 2000.
 19. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. — М.: Наука, 1967.—444 с.
 20. Черноусько Ф. И., Акуленко Л. Д., Соколов Б. Н. Управление колебаниями. — М.: Наука, 1984.—384 с.
 21. Яблонский А. А., Корейко С. С. Курс теории колебаний. — М.: Высш. шк., 1966.—254 с.
 22. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. — М.: Наука, 1985.—512 с.
 23. Bernstein E. L. Natural frequencies of an orbiting space station // J. Spacecraft and rockets.—1972.—9, N 9.—P. 622—630.
 24. Ryan R. S. Dynamic testings of large space systems // NASA Pap.—1980 Sept.—N TM—78307.
 25. Shlomi Arnon, Kopeika N. S. Laser Satellite Communications Network — Vibration Effect and Possible Solutions // Proc. IEEE.—1997.—85, N 10.—P. 1646—1661.

OSCILLATIONS CAUSED BY FLEXIBLE ATTACHED ELEMENTS OF SATELLITE CONSTRUCTIONS

**V. Ye. Shatikhin, L. P. Semenov, Yu. H. Artemenko,
V. M. Borysenko, and O. O. Helenko**

We consider oscillations caused by flexible attached elements of satellite constructions, namely, solar array panels and antenna. An analysis of models of oscillations produced by solar array panels is carried out. We give some recommendations concerning the improvement of calculations of oscillations caused by flexible elements of satellite constructions with allowance made for modern achievements in the space materials science.

УДК 528.2:629.78+528.16

О. А. Хода

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

Центр анализа GPS-даних в ГАО НАН України: тестові результати

Надійшла до редакції 22.10.03

Для тестування створюваного в ГАО НАН України центру аналізу GPS-даних оброблено спостереження для GPS-тижня 1196 на кількох перманентних GPS-станціях мережі IGS та EPN, в тому числі і на двох нових українських станціях в Харкові та Євпаторії. Обробка даних проводилася за допомогою комплексу «Bernese GPS Software ver. 4.2». Отримано вісім різних варіантів розв'язків для визначення впливу вхідних параметрів розв'язку на отримані координати станцій. Фінальний розв'язок, отриманий згідно з вимогами EPN, відповідає за якість комбінованому розв'язку EPN і розв'язкам окремих центрів аналізу EPN для даного тижня.

ВВЕДЕНИЕ

Главная астрономическая обсерватория (ГАО) НАН Украины владеет комплексом обработки GPS-наблюдений «Bernese GPS Software ver. 4.2» [1].

Данный комплекс, созданный в Астрономическом институте Бернского университета (Швейцария), позволяет обрабатывать как кодовые, так и фазовые наблюдения GPS-спутников, в результате чего можно получить с высокой точностью координаты GPS-станций, параметры орбит GPS-спутников, поправки к часам на спутниках и приемниках, тропосферную рефракцию и т. д. При этом возможно либо исключить влияние ионосферы путем создания безионосферной комбинации наблюдений на двух частотах, либо смоделировать ионосферную задержку с последующим использованием полученной модели при обработке данных.

В настоящее время комплекс «Bernese GPS Software ver. 4.2» является фактически одним из стандартных комплексов для анализа GPS-данных как локального, так и регионального и глобального масштабов и используется подавляющим большинством центров анализа Европейской перманентной GPS-сети (EPN) и одним центром анализа Международной GPS-службы (IGS).

Основной целью представленной работы было проверить возможности создаваемого в ГАО НАН Украины центра анализа GPS-данных по обработке недельных рядов наблюдений на перманентных

GPS-станциях сети IGS и EPN, сравнить полученные результаты с комбинированным решением EPN и с решениями отдельных центров анализа EPN для данной недели.

Также было необходимо определить точные координаты двух новых украинских перманентных GPS-станций, установленных ГАО НАН Украины в ноябре 2002 г. в Харькове (KHAR) и Евпатории (EVPA).

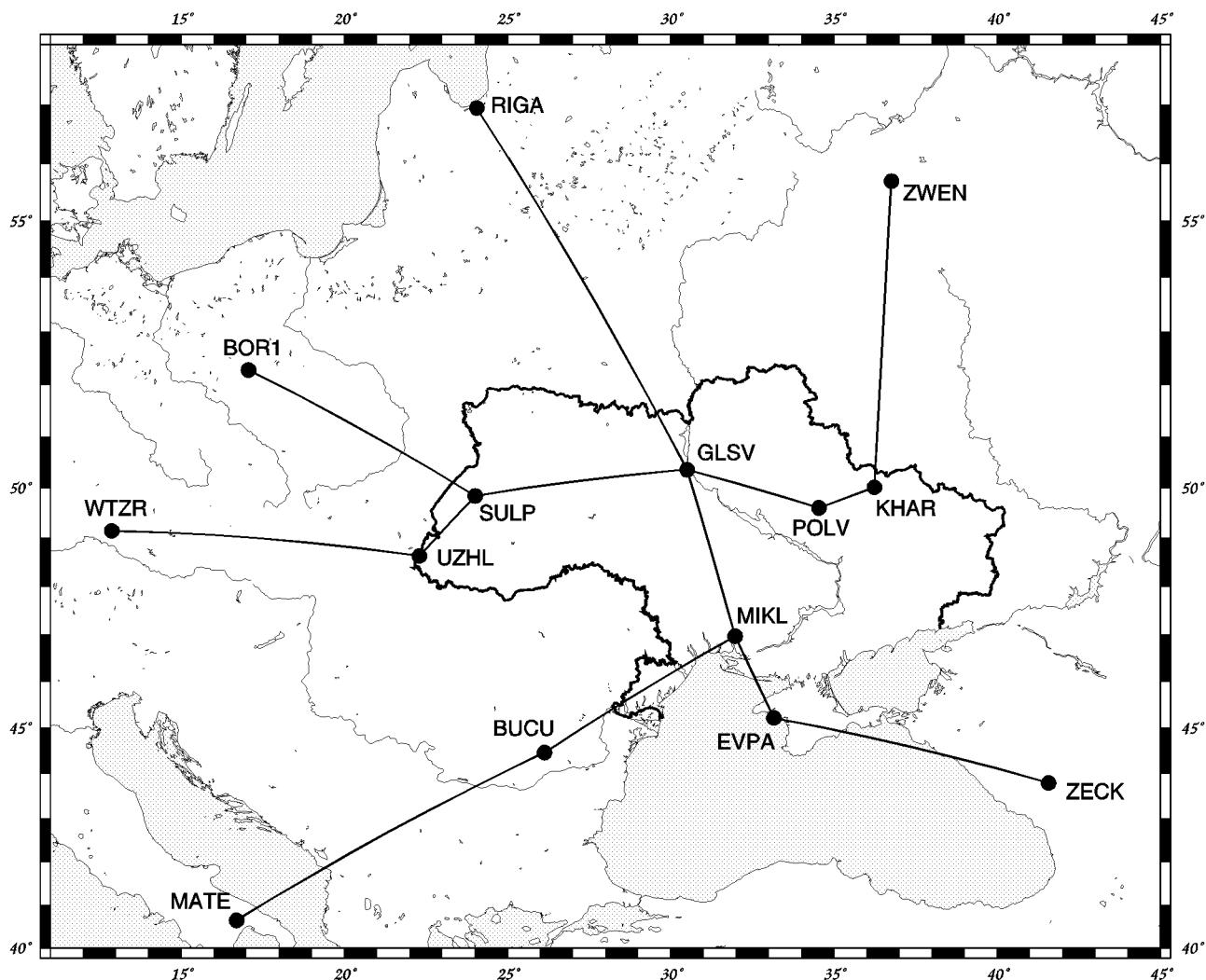
Станция KHAR расположена в Харьковском государственном научно-исследовательском институте метрологии. GPS-антенна размещена на крыше одного из зданий института.

Станция EVPA находится в Национальном центре управления и испытаний космических средств. GPS-антенна установлена на вершине забетонированного металлического столба рядом со станцией лазерной локации искусственных спутников Земли 1867 Evpatoria (Номер DOMES: 12344S001).

Обе станции оборудованы GPS-приемниками «Trimble 4000SSi» и антеннами дизайна Choke ring (код IGS: TRM29659.00).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для обработки была выбрана GPS-неделя 1196 (8—14 декабря 2002 г., дни года 342—348). Кроме украинских GPS-станций в обработку были включены семь станций сети IGS, расположенных вок-



Расположение станций GPS-наблюдений

руг территории Украины. Информация о всех станциях приведена в табл. 1, а их расположение показано на рисунке.

Координаты и скорости IGS-станций (табл. 2) были взяты из каталога ITRF2000 [ftp://lareg.ensg.ign.fr/pub/itrf/itrf2000/ITRF2000_EUR_GPS_PERM.SNX.gz]. Координаты приведены к средней эпохе наблюдений 11 декабря 2001 г. 11 ч 59 мин 45 с (время GPS). Полученные значения координат показаны в табл. 3. Для обработки использовались комбинированные точные эфемериды GPS-спутников и параметры вращения Земли, полученные IGS [<ftp://igs.ifag.de/ORBITS/1196/>]. Вариации фазовых центров GPS-антенн взяты из стандартного файла IGS [<ftp://ftp.epncb.oma.be/pub/station/>

[general/igs_01.pcv](#)]. Для украинских станций и станции BUCU при предварительной обработке в качестве априорных использовались координаты из заголовков RINEX-файлов.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

Предварительная обработка была выполнена в следующей последовательности.

1. Файлы наблюдений, точных эфемерид GPS-спутников, параметров вращения Земли преобразованы во внутренние бинарные форматы данных.

2. По кодовым данным определены поправки к часам GPS-приемников на всех станциях и уточне-

Таблица 1. Станции сети IGS

Станция	Идентификатор	Номер DOMES	Страна	Приемник	Антенна	Высота антennы, м
Киев/Голосеево	GLSV	12356M001	Украина	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0.0000
Ужгород	UZHL	12301M001	Украина	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0.0000
Львов	SULP	12366M001	Украина	TRIMBLE 4700	TRM41249.00	4.7295
Полтава	POLV	12336M001	Украина	TRIMBLE 4700	TRM29659.00	0.0000
Николаев	MIKL	12335M001	Украина	TRIMBLE 4700	TRM41249.00	0.0237
Харьков	KHAR	12314M001	Украина	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0.0000
Евпатория	EVPA	12344M001	Украина	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0.0000
Звенигород	ZWEN	12330M001	Россия	AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T	0.0460
Зеленчукская	ZECK	12351M001	Россия	AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T	0.0450
Матера	MATE	12734M008	Италия	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0.1010
Ветццель	WTZR	14201M010	Германия	AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T	0.0710
Боровец	BOR1	12205M002	Польша	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T	0.0624
Рига	RIGA	12302M002	Латвия	ROGUE SNR-8000	ASH700936D_M	0.0850
Бухарест	BUCU	11401M001	Румыния	ASHTECH Z-XII3	ASH700936D_M	0.0815

Таблица 2. Координаты и скорости IGS-станций в системе координат ITRF2000 на эпоху 1997.0

Станция	X, м	Y, м	Z, м	V _X , м/год	V _Y , м/год	V _Z , м/год
BOR1	3738358.5984	1148173.5823	5021815.7053	-0.0170	0.0161	0.0075
MATE	4641949.7074	1393045.2714	4133287.3434	-0.0188	0.0191	0.0131
WTZR	4075580.6852	931853.6596	4801568.0542	-0.0157	0.0172	0.0087
RIGA	3183899.3442	1421478.3780	5322810.7358	-0.0221	0.0131	-0.0001
ZECK	3451174.8801	3060335.3132	4391955.5676	-0.0206	0.0167	0.0087
ZWEN	2886325.5429	2155998.3993	5245816.1453	-0.0221	0.0121	0.0036
BUCU	4093760.9805	2007793.6348	4445129.8773	-0.0108	0.0272	0.0113
GLSV	3512889.1137	2068979.7628	4888903.1407	-0.0175	0.0151	0.0076

Таблица 3. Координаты IGS-станций в системе координат ITRF2000 на эпоху 11 декабря 2001 г. 11 ч 59 мин 45 с (время GPS)

Станция	X, м	Y, м	Z, м
BOR1	3738358.4974	1148173.6780	5021815.7499
MATE	4641949.5957	1393045.3849	4133287.4212
WTZR	4075580.5919	931853.7618	4801568.1059
RIGA	3183899.2129	1421478.4558	5322810.7352
ZECK	3451174.7577	3060335.4124	4391955.6193
ZWEN	2886325.4116	2155998.4712	5245816.1667
BUCU	4093760.9163	2007793.7964	4445129.9445
GLSV	3512889.0097	2068979.8525	4888903.1859

ны координаты для украинских станций и станции BUCU отдельно для каждой сессии.

3. Сформированы файлы первых разностей фазовых наблюдений. Полученные базы показаны на рисунке. В связи с отсутствием наблюдений на станции EVPA в день года 345 вместо баз MIKL—EVPA и ZECK—EVPA для данной сессии была сформирована база ZECK—MIKL.

4. Проверено качество фазовых наблюдений в полученных файлах, замаркированы наблюдения

GPS-спутников с углами места меньше 10°, наблюдения на малых интервалах времени и т.д. Определены моменты скачков фаз. Уточнены координаты для украинских станций и станции BUCU отдельно для каждой сессии из решений тройных разностей на фазовой комбинации L3.

5. Получены решения на фазовой комбинации L3 с действительными значениями фазовых неоднозначностей для неочищенных данных отдельно для каждой сессии. Использовались наблюдения спутников с минимальным углом места 10° со взвешиванием фазовых измерений в зависимости от угла места. Тропосферные параметры определялись каждый час для каждой станции. Использовалась опция DRY_NIELL, задающая функцию наклонения nfmfh2.0 [3]. Координаты станции WTZR фиксировались. Сохранялись файлы остатков. Средние квадратичные ошибки (СКО) решений составили 1.0 мм для каждой сессии.

6. С помощью файлов остатков замаркированы выбросы в файлах первых разностей.

7. Получены решения на фазовой комбинации L3 с действительными значениями фазовых неоднозначностей для очищенных данных отдельно для

Таблица 4. Количество зафиксированных неоднозначностей (в процентах)

База	Длина базы, км	День года							Всего
		342	343	344	345	346	347	348	
BOR1—SULP	556.8	88.2	93.9	86.5	88.9	92.2	93.9	89.8	90.4
BUCI—MIKL	533.5	92.9	92.7	95.3	97.6	100.0	97.5	97.6	96.2
GLSV—MIKL	392.4	88.7	88.1	88.7	84.6	85.2	87.9	90.0	87.6
GLSV—POLV	302.2	91.9	93.2	95.2	89.4	95.0	88.1	91.8	92.1
MATE—BUCU	880.7	66.2	77.6	78.9	76.7	80.1	76.7	72.6	76.8
MIKL—EVPA	215.6	94.8	94.5	92.7	—	90.2	85.7	89.8	91.2
POLV—KHAR	130.0	94.9	91.8	86.8	92.1	89.4	88.1	87.9	90.0
RIGA—GLSV	846.0	84.2	91.4	93.2	88.9	91.1	87.9	84.5	88.8
SULP—GLSV	467.3	82.0	89.7	88.1	87.3	89.5	89.3	82.0	86.7
UZHL—SULP	183.2	66.2	66.1	73.8	70.6	67.7	70.3	68.6	69.0
WTZR—UZHL	692.3	73.3	75.0	78.6	79.7	73.8	76.7	70.8	75.3
ZECK—EVPA	686.1	86.4	83.6	88.1	—	86.4	73.2	84.5	82.8
ZWEN—KHAR	634.4	80.6	75.7	46.2	61.3	73.5	71.6	62.8	65.4
ZECK—MIKL	829.2	—	—	—	90.9	—	—	—	90.9
Всего		83.2	84.6	79.9	83.0	84.3	81.8	80.9	82.5

Таблица 5. Варианты решений

Вариант решения	A	В	С	D	E	F	G	Н
Минимальный угол места, град	10	10	10	10	10	10	15	10
Взвешивание	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Нет	Да
Априорная модель зенитной задержки в тропосфере	Нет	Saastamoinen						
Опция, задающая коэффициент наклонения	DRY_NIELL	1/cos z						
Использованный период выборки измерений, с	180	180	180	30	30	30	180	180
Координаты	WTZR	F	F	F	F	F	F	F
	MATE	F	F	F	F	F	F	F
	BOR1	F	F	F	F	F	F	F
	RIGA	F	F	C	F	C	F	F
	ZWEN	F	F	C	F	C	F	F
	ZECK	F	F	C	F	C	F	F
	BUCU	R	C	C	R	C	C	C
	GLSV	R	C	C	R	C	C	C
	UZHL	R	W	W	R	W	W	W
	SULP	R	W	W	R	W	W	W
	MIKL	R	W	W	R	W	W	W
	POLV	R	W	W	R	W	W	W
	KHAR	R	R	R	R	R	R	R
	EVPA	R	R	R	R	R	R	R

F — на координаты станции наложены жесткие ограничения (0.1 мм), R — исходные координаты взяты из заголовка RINEX-файла, С — исходные координаты взяты из каталога ITRF2000, W — исходные координаты взяты из решения центра анализа данных WUT для предыдущей недели.

каждой сессии. Использовались наблюдения спутников с минимальным углом места 10° со взвешиванием фазовых измерений в зависимости от угла места. Тропосферные параметры определялись каждый час для каждой станции. Опция, задающая функцию наклонения — DRY_NIELL. На координаты станций WTZR, MATE, BOR1, RIGA, ZWEN и ZECK были наложены жесткие ограничения

(0.1 мм). Сохранялись файлы нормальных уравнений и тропосферных параметров. СКО решений — 0.9 мм для каждой сессии.

8. Проведено уравнивание файлов нормальных уравнений и получено решение с действительными значениями фазовых неоднозначностей. Характеристики этого решения (обозначим его AFC) приведены в табл. 6.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ НЕОДНОЗНАЧНОСТЕЙ

Фазовые неоднозначности фиксировались с помощью методики QIF [2]. Каждая база обрабатывалась независимо и одновременно на частотах L1 и L2. Использовались наблюдения спутников с минимальным углом места 10° со взвешиванием фазовых измерений в зависимости от угла места и тропосферные параметры, полученные на шаге 7 предварительной обработки.

Для лучшего определения значений фазовых неоднозначностей были построены детерминистические модели ионосфера [4], основанные на разложении общего содержания электронов в ряд по сферическим гармоникам в зависимости от географической широты и часового угла Солнца.

В табл. 4 приведена доля зафиксированных неоднозначностей для каждой базы и каждой сессии. Всего зафиксировано 82.5 % неоднозначностей. Среднее значение СКО для всей сети — 1.0 мм, максимальное значение — 1.3 мм для базы ZECK—MIKL в день 345.

ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

Было получено восемь вариантов решений (табл. 5). Варианты A и D, B и E, C и F отличались лишь периодом выборки измерений: рекомендованные EPN 180 с, то есть при обработке использовалось каждое шестое измерение, вместо 30 с, т. е. использовались все измерения. Варианты решений A, B и C, а также D, E и F отличались между собой количеством станций, на координаты которых были наложены жесткие ограничения (0.1 мм), и источником исходных координат для остальных станций. И наконец, вариант решения G отличался от варианта B большим значением минимального угла места наблюдаемых GPS-спутников (15° вместо 10°), а H от B — использованием априорной модели зенитной задержки в тропосфере и другой опции, задающей функцию наклонения ($1/\cos z$ вместо DRY_NIELL). Таким образом было возможно определить влияние различающихся факторов на полученные решения.

Табл. 6 содержит характеристики полученных решений. В качестве финального решения принят вариант C, так как входные параметры этого решения соответствуют требованиям EPN к еженедельным решениям центров анализа данных, а станции, на координаты которых наложены жесткие ограничения, используются для задания системы координат ITRF2000 при получении еженедельных комбинированных решений EPN.

Таблица 6. Характеристики решений

Вариант решения	Количество наблюдений	Количество неизвестных	СКО, мм
AFC	1366978	8217	0.9
A, B, C	227686	3230	1.0
D, E, F	1366978	3396	1.0
G	207171	2691	1.9
H	227686	3230	1.0

Таблица 7. Финальное решение

Станция	X, Y, Z, м	СКО, м	Высота, м, Долгота, Широта	СКО, м
BOR1	3738358.4974	0.0000	124.3651	0.0000
	1148173.6780	0.0000	52°16'37.043148"	0.0000
	5021815.7499	0.0000	17°04'24.440845"	0.0000
MATE	4641949.5957	0.0000	535.6420	0.0000
	1393045.3849	0.0000	40°38'56.872435"	0.0000
	4133287.4212	0.0000	16°42'16.051731"	0.0000
WTZR	4075580.5919	0.0000	666.0249	0.0000
	931853.7618	0.0000	49°08'39.113088"	0.0000
	4801568.1059	0.0000	12°52'44.073008"	0.0000
RIGA	3183899.2406	0.0003	34.7140	0.0006
	1421478.4630	0.0001	56°56'55.029602"	0.0001
	5322810.7726	0.0005	24°03'31.582838"	0.0001
ZECK	3451174.7505	0.0004	1166.2675	0.0006
	3060335.4010	0.0003	43°47'18.213448"	0.0001
	4391955.6191	0.0004	41°33'54.235959"	0.0001
ZWEN	2886325.4170	0.0003	204.9874	0.0006
	2155998.4696	0.0002	55°41'57.418682"	0.0001
	5245816.1670	0.0005	36°45'31.059482"	0.0001
BUCU	4093760.8922	0.0003	143.1806	0.0005
	2007793.7640	0.0002	44°27'50.200341"	0.0001
	4445129.9303	0.0004	26°07'32.664004"	0.0001
GLSV	3512889.0017	0.0003	226.3074	0.0005
	2068979.8442	0.0002	50°21'51.056901"	0.0001
	4888903.1756	0.0004	30°29'48.233595"	0.0001
UZHL	3907587.4938	0.0004	232.0003	0.0006
	1602428.6555	0.0002	48°37'55.118857"	0.0001
	4763783.7270	0.0005	22°17'51.424986"	0.0001
SULP	3765297.0408	0.0003	370.5246	0.0005
	1677559.1726	0.0001	49°50'08.117586"	0.0001
	4851297.3819	0.0004	24°00'52.154647"	0.0001
POLV	3411557.3925	0.0003	178.3544	0.0005
	2348463.9568	0.0002	49°36'09.408964"	0.0001
	4834396.8563	0.0004	34°32'34.547242"	0.0001
MIKL	3698554.0334	0.0003	93.9038	0.0005
	2308675.9707	0.0002	46°58'22.023421"	0.0001
	4639769.4644	0.0004	31°58'22.223500"	0.0001
KHAR	3312984.3686	0.0003	201.0136	0.0005
	2428203.4006	0.0002	50°00'18.367384"	0.0001
	4863307.7949	0.0004	36°14'20.425262"	0.0001
EVPA	3767253.5324	0.0004	39.3658	0.0006
	2461876.3098	0.0002	45°13'10.172881"	0.0001
	4504591.7675	0.0004	33°09'51.701539"	0.0001

Таблица 8. Повторяемость составляющих координат (N — северная, E — восточная, U — высотная), мм

Станция	Компонент	СКО, мм	День года						
			342	343	344	345	346	347	348
RIGA	N	0.8	-0.9	0.1	1.0	0.3	0.8	-0.7	-0.6
	E	0.5	-0.7	0.2	0.1	0.0	-0.3	0.8	0.0
	U	2.9	-0.7	-0.5	1.5	0.3	4.6	0.8	-5.1
ZECK	N	2.0	3.5	1.8	-1.4	-0.3	-1.0	-2.3	-1.1
	E	1.2	-2.2	1.3	-1.0	1.0	0.0	0.1	0.0
	U	1.7	0.9	-0.1	-2.8	2.5	-1.4	0.4	0.0
ZWEN	N	1.2	0.2	1.1	1.8	-0.5	-0.4	-1.3	-1.3
	E	0.9	-1.6	0.0	1.0	1.2	0.1	0.4	-0.6
	U	5.9	-1.1	2.1	8.2	6.9	-0.8	-3.3	-8.9
BUCU	N	1.3	2.5	0.8	-0.6	-0.2	-1.6	-0.7	-0.2
	E	1.0	-2.0	-0.3	0.3	0.0	0.7	0.8	0.5
	U	3.1	5.6	-0.4	-3.3	1.6	-2.0	1.4	-2.3
GLSV	N	0.5	0.6	-0.1	-0.2	0.1	-1.0	0.2	0.4
	E	0.3	-0.6	0.2	0.1	0.0	0.5	0.1	-0.2
	U	2.2	1.5	-2.7	-1.3	2.5	1.8	1.0	-2.5
UZHL	N	0.6	0.9	-0.1	-0.3	0.1	-0.9	-0.3	0.5
	E	0.6	-1.2	-0.3	0.1	0.5	0.3	0.2	0.5
	U	2.9	5.2	-1.0	-3.5	2.8	-0.6	-1.0	-1.6
SULP	N	0.3	0.4	-0.5	0.1	-0.1	-0.2	0.0	0.2
	E	0.4	-0.8	-0.3	0.4	0.1	0.3	0.5	-0.1
	U	2.7	4.4	-1.1	-2.0	1.1	-0.7	2.2	-3.5
POLV	N	0.7	0.7	0.3	0.1	0.5	-1.5	-0.3	0.1
	E	0.8	-1.5	-0.5	0.0	-0.3	1.0	0.6	0.6
	U	3.0	2.6	-1.5	-0.9	3.4	1.8	0.2	-5.4
MIKL	N	0.8	1.2	0.4	0.1	0.2	-1.4	-0.2	-0.4
	E	0.8	-1.5	-0.5	-0.1	0.2	1.2	0.6	0.2
	U	2.4	2.3	-0.4	-0.8	3.1	-1.4	1.2	-3.8
KHAR	N	0.9	1.1	0.1	0.1	0.8	-1.8	0.1	-0.3
	E	0.8	-1.5	-0.3	0.2	-0.1	0.7	0.6	0.3
	U	2.7	0.6	-0.7	-0.1	3.8	1.7	0.0	-5.1
EVPA	N	1.8	3.3	0.4	-1.5	—	-1.7	-0.6	-0.4
	E	0.7	-1.2	-0.4	0.1	—	0.6	0.2	0.4
	U	2.9	4.8	1.1	-2.4	—	-1.5	-1.7	-2.8

Таблица 9. Повторяемость длин баз

День года	Длина базы, м						
	BOR1—SULP	SULP—GLSV	BUCU—MIKL	MIKL—EVPA	GLSV—MIKL	GLSV—POLV	POLV—KHAR
342	556822.4134	467262.4065	533482.0631	215552.7177	392419.8549	302242.2911	130041.7715
343	556822.4141	467262.4064	533482.0628	215552.7194	392419.8550	302242.2910	130041.7715
344	556822.4143	467262.4056	533482.0632	215552.7208	392419.8552	302242.2917	130041.7716
345	556822.4142	467262.4061	533482.0638	—	392419.8557	302242.2917	130041.7717
346	556822.4144	467262.4062	533482.0638	215552.7193	392419.8562	302242.2927	130041.7711
347	556822.4145	467262.4059	533482.0635	215552.7195	392419.8563	302242.2926	130041.7715
348	556822.4137	467262.4057	533482.0626	215552.7193	392419.8563	302242.2926	130041.7708
Средняя	556822.4141	467262.4061	533482.0633	215552.7193	392419.8557	302242.2919	130041.7714
	MATE—BUCU	RIGA—GLSV	UZHL—SULP	WTZR—UZHL	ZECK—EVPA	ZWEN—KHAR	
342	880722.5296	846030.7928	183166.0651	692329.4209	686109.3067	634386.3485	
343	880722.5299	846030.7938	183166.0649	692329.4215	686109.3089	634386.3504	
344	880722.5297	846030.7950	183166.0655	692329.4219	686109.3065	634386.3515	
345	880722.5300	846030.7943	183166.0647	692329.4225	—	634386.3487	
346	880722.5297	846030.7963	183166.0657	692329.4223	686109.3069	634386.3508	
347	880722.5305	846030.7929	183166.0656	692329.4220	686109.3080	634386.3478	
348	880722.5302	846030.7924	183166.0644	692329.4222	686109.3074	634386.3477	
Средняя	880722.5300	846030.7939	183166.0651	692329.4219	686109.3074	634386.3494	

Таблица 10. Параметры преобразования Гельмерта между вариантами решений

Решения:	A – C	B – G	B – H
Количество координат	42	42	42
СКО преобразования, мм	6.6	1.2	0.5
Сдвиг по оси X, мм	-1.1 ± 1.8	0.1 ± 0.3	0.0 ± 0.1
Сдвиг по оси Y, мм	2.9 ± 1.8	-0.1 ± 0.3	0.0 ± 0.1
Сдвиг по оси Z, мм	-8.4 ± 1.8	-1.3 ± 0.3	-0.1 ± 0.1
Поворот вокруг оси X, 0.001°	-0.2 ± 0.6	0.3 ± 0.1	0.0 ± 0.0
Поворот вокруг оси Y, 0.001°	-2.7 ± 0.8	0.0 ± 0.1	0.1 ± 0.1
Поворот вокруг оси Z, 0.001°	-0.3 ± 0.5	0.0 ± 0.1	0.0 ± 0.0
Масштабный множитель, мкм/км	1.8 ± 2.3	-0.2 ± 0.4	0.0 ± 0.2

Таблица 11. Остатки после преобразования Гельмерта между вариантами решений по компонентам (N — северная, E — восточная, U — высотная), мм

Станция	A – C			B – G			B – H		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
BOR1	-0.6	-2.2	14.4	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
SULP	-0.4	0.0	0.1	0.3	0.3	2.0	0.0	-0.1	0.7
BUCU	0.5	0.9	-7.9	-0.3	0.2	2.0	0.1	0.1	-1.0
MIKL	0.7	0.0	-4.6	0.4	0.2	0.9	0.1	0.1	0.1
GLSV	0.1	-0.4	-0.4	0.2	-0.5	-1.8	0.0	0.0	1.2
POLV	0.7	-0.8	-1.1	-0.5	-0.8	-2.6	0.0	0.0	0.4
MATE	2.3	-0.1	-1.9	-0.3	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.7
EVPA	0.9	0.2	-6.1	0.4	-0.1	-2.6	0.1	-0.1	-1.3
KHAR	0.9	-0.8	-0.1	-0.2	-0.2	-2.7	0.0	0.0	0.6
RIGA	-4.1	2.7	-26.4	0.1	0.1	0.8	0.0	0.0	-0.4
UZHL	-0.5	0.5	-0.6	0.2	0.1	-0.9	0.0	0.1	-1.1
WTZR	-0.1	-1.2	11.0	0.0	0.0	-0.3	0.0	0.0	0.2
ZECK	-4.1	2.4	8.7	-0.2	0.4	3.0	-0.1	0.0	0.3
ZWEN	3.6	-1.2	14.8	0.1	0.3	2.0	0.0	0.0	-0.4
CKO	2.1	1.3	10.6	0.3	0.3	1.9	0.1	0.1	0.8

Таблица 12. Разности координат станций между вариантами решений, мм

Станция	A – C			B – G			B – H		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
SULP	-6.5	-0.5	-7.6	0.3	0.5	1.1	0.4	0.1	0.5
BUCU	-6.2	-0.1	-8.0	0.5	0.4	0.5	-0.9	-0.4	-1.0
MIKL	-6.5	0.2	-7.8	-0.9	-0.4	-0.4	-0.1	0.0	0.0
GLSV	-7.1	-0.3	-8.2	-1.8	-1.6	-2.4	0.7	0.4	0.9
POLV	-6.8	0.0	-7.9	-1.9	-2.1	-3.8	0.2	0.1	0.3
EVPA	-5.6	0.8	-7.3	-2.9	-1.8	-3.1	-1.0	-0.6	-1.1
KHAR	-6.7	0.3	-7.6	-2.5	-1.8	-3.8	0.4	0.2	0.5
RIGA	-27.6	-7.2	-37.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
UZHL	-5.9	-0.2	-7.1	-1.2	-0.5	-1.0	-0.8	-0.3	-1.0
ZECK	7.1	11.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
ZWEN	-5.4	1.6	-0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Итоговые координаты станций приведены в табл. 7. О точности полученных координат можно судить по повторяемости составляющих координат (табл. 8) и длин баз (табл. 9).

СРАВНЕНИЕ РЕШЕНИЙ

Для начала выясним влияние использованного периода выборки измерений на полученные коорди-

Таблица 13. Параметры преобразования Гельмерта между финальным решением и решениями центров анализа EPN

Решения	Количество координат	СКО преобразования, мм	Сдвиг по оси X, мм	Сдвиг по оси Y, мм	Сдвиг по оси Z, мм	Поворот вокруг оси X, мс дуги	Поворот вокруг оси Y, мс дуги	Поворот вокруг оси Z, мс дуги	Масштабный множитель, мкм/км
MAO — EUR	36	1.9	0.4±0.5	0.9±0.5	0.2±0.5	0.3±0.2	0.2±0.2	0.0±0.1	1.0±0.7
MAO — WUT	27	0.6	-0.7±0.2	-1.4±0.2	0.4±0.2	-0.2±0.1	-0.1±0.1	-0.0±0.1	-0.5±0.4
MAO — GOP	21	1.8	2.2±0.7	0.2±0.7	-0.4±0.7	0.1±0.3	0.7±0.3	-0.0±0.2	0.5±1.0
MAO — BKG	18	1.3	0.0±0.5	-1.1±0.5	3.5±0.5	-0.5±0.1	0.4±0.2	-0.0±0.1	-0.7±0.6
MAO — OLG	15	1.5	12.7±0.7	4.6±0.7	14.6±0.7	-1.0±0.3	4.5±0.5	-0.1±0.3	4.4±1.3
MAO — COE	12	0.9	1.3±0.4	-3.1±0.4	0.8±0.4	1.2±0.2	-0.1±0.2	-0.0±0.1	-1.0±0.5
MAO — SGO	12	0.5	2.2±0.3	4.8±0.3	5.3±0.3	-1.4±0.2	-0.6±0.2	0.2±0.1	2.3±0.6
MAO — SUT	12	1.8	0.3±0.9	1.7±0.9	27.3±0.9	-2.7±0.6	1.2±0.6	-0.2±0.3	5.7±1.6

Таблица 14. Остатки после преобразования Гельмерта между финальным решением и решениями центров анализа EPN по компонентам (N — северная, E — восточная, U — высотная), мм

Станция	MAO — EUR			MAO — WUT			MAO — GOP			MAO — BKG		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U	N	E	U
BOR1	-0.8	-0.2	-1.5	0.5	1.0	0.6	—	—	—	—	—	—
SULP	-0.3	-0.3	1.5	-0.1	-0.2	0.2	-1.1	-0.2	1.0	—	—	—
BUCU	-0.7	0.1	0.8	-0.4	-0.3	1.4	—	—	—	-0.7	-0.4	1.3
MIKL	-0.5	0.4	5.8	-0.1	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	0.3	—	—	—
GLSV	-0.5	0.4	-2.8	-0.2	-0.1	-0.4	—	—	—	-0.2	0.8	1.5
POLV	0.3	0.2	4.3	0.0	-0.2	-0.9	0.4	0.2	0.6	—	—	—
MATE	0.5	0.0	-0.5	—	—	—	—	—	—	-0.8	0.4	0.1
RIGA	0.8	0.4	1.2	0.4	-0.6	0.8	-0.1	1.1	-4.2	—	—	—
UZHL	-0.2	-0.3	-0.6	0.4	0.1	-0.2	-1.2	-0.4	1.2	—	—	—
WTZR	-0.5	0.2	-1.7	-0.5	0.1	-1.2	—	—	—	-0.1	0.2	-1.5
ZECK	0.9	-1.9	-4.5	—	—	—	0.7	-1.4	-2.2	0.4	-2.2	-1.4
ZWEN	0.8	1.0	-2.0	—	—	—	1.5	1.0	3.3	1.4	1.2	-0.1
СКО	0.6	0.7	2.9	0.4	0.4	0.8	0.9	0.9	2.5	0.8	1.2	1.3
Станция	MAO — OLG			MAO — COE			MAO — SGO			MAO — SUT		
BOR1	0.2	-0.4	1.3	0.1	0.2	-0.5	—	—	—	0.1	1.1	1.7
SULP	—	—	—	—	—	—	0.1	0.4	0.4	-0.5	-0.5	-2.9
BUCU	0.9	0.4	-0.4	—	—	—	-0.6	-0.3	0.1	—	—	—
MIKL	-0.6	0.2	2.9	—	—	—	—	—	—	-0.2	0.0	1.4
GLSV	—	—	—	-1.1	-0.1	1.1	—	—	—	—	—	—
POLV	-0.1	-0.1	-1.7	—	—	—	0.3	-0.4	-0.1	—	—	—
RIGA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.6	-0.6	-0.2
UZHL	-0.4	-0.1	-2.0	—	—	—	0.2	0.2	-0.4	—	—	—
ZECK	—	—	—	0.3	-0.4	-0.4	—	—	—	—	—	—
ZWEN	—	—	—	0.8	0.3	-0.3	—	—	—	—	—	—
СКО	0.6	0.3	2.1	0.8	0.3	0.8	0.4	0.4	0.3	0.5	0.8	2.1

нены. Для этого сравним попарно варианты решений A и D, B и E, C и F. Практически все полученные параметры преобразований Гельмерта равны нулю, кроме сдвигов по оси Z между решениями A и D, B и E (оба на 0.1 мм), C и F (-0.2 мм), сдвига по оси X между решениями C и F (0.1 мм). Координаты отличаются в основном на 0.1—0.3 мм, максимум на 0.5 мм. Остатки составляющих координат после преобразований Гельмерта близки к нулю. То есть, использование периода выборки в 180 с позволяет получить решение, практически совпадающее с решением, использую-

щим все измерения.

Влияние источника априорных координат определяемых станций (заголовки RINEX-файлов, решения для предыдущей недели или каталог) на полученные результаты незначительно. Решения A и B фактически совпадают. Все параметры преобразования Гельмерта равны нулю, а координаты лишь некоторых станций отличаются на 0.1 мм.

Как и ожидалось, различие в количестве станций сети, на координаты которых наложены жесткие ограничения (варианты A и C) оказывает влияние на полученные координаты, особенно для станций, наи-

Таблица 15. Разности координат станций между финальным решением и решениями центров анализа EPN, мм

Станция	MAO — EUR			MAO — WUT			MAO — GOP			MAO — BKG		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
BOR1	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	0.1	—	—	—	—	—	—
SULP	0.9	1.0	1.7	1.5	-1.0	-0.1	-0.2	-0.4	1.3	—	—	—
BUCU	0.5	1.4	-0.1	2.6	-0.8	1.1	—	—	—	3.4	-0.1	2.5
MIKL	2.5	3.2	3.7	1.7	-0.9	0.1	-1.9	-1.2	-0.1	—	—	—
GLSV	-2.4	0.7	-2.1	1.6	-1.1	-0.4	—	—	—	4.3	1.6	4.2
POLV	0.9	2.4	3.3	1.4	-1.4	-0.5	-2.1	-0.6	1.3	—	—	—
MATE	0.0	0.0	0.0	—	—	—	—	—	—	0.1	-0.1	-0.1
RIGA	-0.5	1.0	3.2	1.7	-1.2	0.1	-3.3	-0.6	0.3	—	—	—
UZHL	-0.2	0.3	0.1	0.7	-1.1	-0.1	-0.1	-0.6	1.1	—	—	—
WTZR	0.0	0.0	0.0	0.2	-0.9	-1.9	—	—	—	0.1	-0.1	-0.1
ZECK	-4.5	-2.1	-4.4	—	—	—	-4.5	-3.6	-2.6	4.1	-2.4	3.7
ZWEN	-3.7	1.0	-0.2	—	—	—	-0.8	1.3	6.2	3.6	1.7	5.6
Станция	MAO — OLG			MAO — COE			MAO — SGO			MAO — SUT		
BOR1	1.8	3.0	27.4	3.4	-0.2	5.4	—	—	—	11.9	5.4	18.9
SULP	—	—	—	—	—	—	-1.5	4.4	4.6	13.7	6.8	17.0
BUCU	-7.3	1.4	10.7	—	—	—	1.1	6.0	5.0	—	—	—
MIKL	-0.7	6.9	19.3	—	—	—	—	—	—	19.1	13.8	24.0
GLSV	—	—	—	2.6	-1.7	2.1	—	—	—	—	—	—
POLV	-0.6	7.7	22.8	—	—	—	0.3	6.5	8.7	—	—	—
RIGA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13.3	7.8	26.4
UZHL	-2.8	2.1	16.7	—	—	—	-1.9	3.8	3.3	—	—	—
ZECK	—	—	—	-1.0	-6.0	-1.5	—	—	—	—	—	—
ZWEN	—	—	—	-0.2	-3.5	-0.2	—	—	—	—	—	—

более удаленных от фиксируемых (табл. 10—12).

Использование большего значения минимального угла места наблюдаемых спутников и других условий для определения параметров тропосферы (использование априорной модели зенитной задержки в тропосфере и другого коэффициента наклонения) повлияло в основном на высотную составляющую координат (табл. 10—12).

Для оценки качества финального решения (вариант С) сравним его с комбинированным решением EPN для данной недели (EUR), а также с решениями отдельных центров анализа EPN (WUT, GOP, BKG, OLG, COE, SGO, SUT) (табл. 13—15). Видно, что вычисленные координаты довольно близки к координатам из комбинированного решения и решений указанных центров анализа. Приведенные значения позволяют утверждать, что полученное решение создаваемого в ГАО НАН Украины центра анализа данных для GPS-недели 1196 соответствует по качеству решениям существующих центров анализа EPN.

1. Bernese GPS Software Version 4.2 / Eds. U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne. — 2001. — 515 p.

2. Mervart L. Ambiguity resolution techniques in geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System // Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. — 1995. — 155 p.

3. Niell A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // J. Geophys. Res. — 1996. — 101, N B2. — P. 3227—3246.

4. Schaefer S., Beutler G., Mervart L., et al. Global and regional ionosphere models using the GPS double difference phase observable // Proc. 1995 IGS Workshop «The IGS: special topics and new directions». — Potsdam, 1995. — P. 77—92.

THE GPS DATA ANALYSIS CENTRE IN THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY: TEST RESULTS

O. Khoda

GPS observations for week 1196 of some IGS/EPN permanent stations and two new Ukrainian stations Kharkiv and Evpatoria were processed for testing purposes in the Data Analysis Centre which is being established in the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine. The processing was carried out with Bernese GPS Software ver. 4.2. For comparison eight solutions with different input parameters were generated. Final solution computed according to the standard EPN procedure is in a good agreement with combined EPN solution for the week as well as with solutions of some individual EPN Local Analysis Centres.

УДК 520.2:520.3:523

В. М. Абросимов¹, А. Н. Ковальчук², С. В. Малевинский¹,
Г. И. Пинигин², В. В. Савченко¹, А. В. Шульга²

¹Національний центр управління і випробувань космічних засобів, Євпаторія

²Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

Изучение объектов в ближнем космосе с помощью телескопа АЗТ-8, оснащенного ПЗС-камерой

Надійшла до редакції 07.03.03

При розширенні діапазону спостережуваних об'єктів штучного і природного походження в навколоzemному космічному просторі в область слабких об'єктів в оптичному діапазоні важливе значення мають як параметри телескопа, так і методи реєстрації. Розглянуто перелік задач, вирішуваних за допомогою телескопа АЗТ-8 у випадку його автоматизації і оснащення сучасною ПЗЗ-камерою. При використанні розробленого у Миколаївській астрономічній обсерваторії комбінованого ПЗЗ-методу очікувана точність спостережень на АЗТ-8 у близькому і далекому космосі складе 0.2—0.3" по обох координатах для об'єктів 19—20^m.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция использования малоразмерных, унифицированных и малозатратных средств наблюдений находит свое применение в астрономии. Она достаточно распространена в практической космонавтике (многоцелевые микроспутники, унифицированные наземные и космические платформы, новые технологии), обеспечивая высокую научную и экономическую эффективность [7]. Опыт практического использования современных регистрирующих и автоматических устройств показывает, что эффективная реализация ряда актуальных научных и прикладных программ астрономии и космонавтики возможна с телескопами типа АЗТ-8, имеющими зеркала сравнительно небольших размеров ($D = 0.5\ldots1.0$ м). С этих позиций представляется весьма своевременной модернизация и оснащение телескопа АЗТ-8 Национального центра управления и испытаний космическими средствами (НЦУИКС) современной ПЗС-аппаратурой, разработанной и изготовленной в Николаевской астрономической обсерватории (НАО) на базе матрицы ISD017P и камеры типа S1C производства НПП «Электрон-Оptronик» (Санкт-Петербург, Россия). При этом положительное значение имеет достаточно хорошо астроклимат расположения АЗТ-8 на

равнинной площадке НЦУИКС вблизи Евпатории, а также близкое размещение двух телескопов АЗТ-8 и КОС «Сажень» для согласованных наблюдений избранных объектов.

ПРОГРАММЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В перспективе научно-технического сотрудничества НЦУИКС и НАО планируется в рамках Национальной космической программы Украины по проектам «Модернизация-С» и «Интерферометр» и других международных программ проведение следующих научных и прикладных исследований (см. [3, 10], а также [<http://www.astro.ro/wg2.htm> – 2003]):

- мониторинг объектов искусственного и естественного происхождения с целью определения их орбит и расчета целеуказаний, включая геостационарные и геосинхронные орбиты;
- организация и проведение наблюдений низкоорбитальных микроспутников и малоконтрастных объектов;
- регистрация фрагментов «космического мусора» вплоть до геостационарных орбит;
- наблюдение (поиск и сопровождение) астероидов, сближающихся с Землей (ACЗ) в рамках

- наземной поддержки международной космической программы GAIA;
- наблюдение внегалактических радиоисточников (ERS) для уточнения связи радио- и оптической опорных систем координат;
 - создание стандартных (калибровочных) площадок в избранных участках небесной сферы;
 - наблюдение тел Солнечной системы (астероидов, малых планет, транснептуновых объектов) для определения их масс, элементов орбит, решения задач небесной механики;
 - позиционные и фотометрические наблюдения спутников планет и астероидов (покрытия и явления) в рамках международных программ.

СОСТОЯНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЗТ-8

Телескоп-рефлектор АЗТ-8 с диаметром зеркала 70 см был изготовлен малой серией на известном

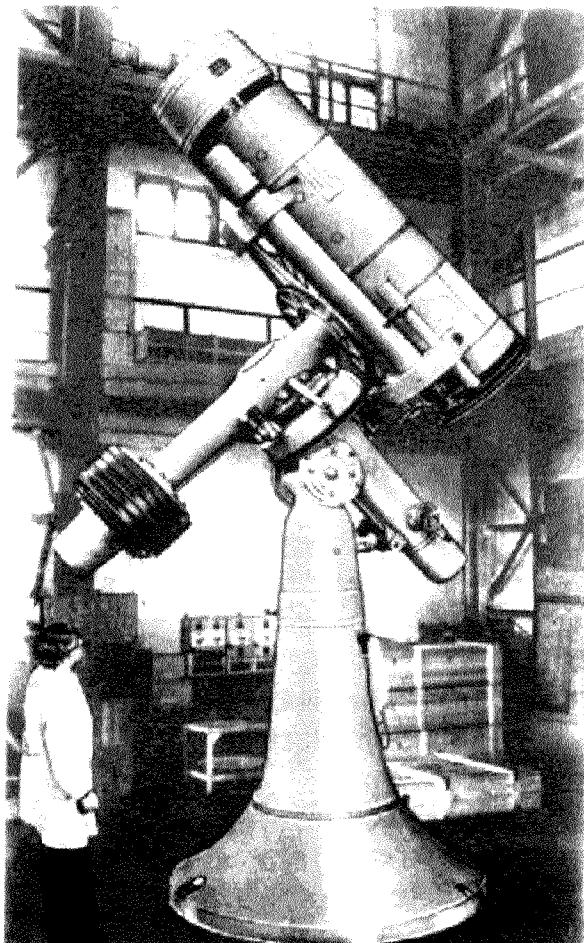


Рис. 1. Телескоп-рефлектор АЗТ-8

оптико-механическом предприятии ЛОМО после 1964 г. [6]. Общий вид представлен на рис. 1, технические данные — в табл. 1. Телескоп АЗТ-8 установлен на научной площадке Национального центра управления и испытаний космических средств НКАУ в районе г. Евпатория.

Телескоп АЗТ-8 имеет возможность работы с двумя оптическими системами ($F/8$ для фокуса Кассегрена и $F/3$ для фокуса Ньютона). Кроме того, на телескопе параллельно основной трубе установлена спутниковая камера ($D = 21.4$ см, $F = 0.75$ м) для синхронных наблюдений быстро перемещающихся объектов в большом поле зрения до 1.4° . Наиболее оптимальным вариантом для позиционных наблюдений удаленных и неподвижных объектов является система Кассегрена $F/8$, обеспечивающая масштаб поля $0.3''/\text{пк}$. Поле зрения в этом случае ограничивается геометрическими размерами ПЗС-матрицы (в случае матрицы ISD017P $5.1' \times 5.7'$) (см. табл. 4).

Использование трех оптических каналов на АЗТ-8 обеспечивается ПЗС камерами двух типов, имеющих одинаковые матрицы ISD017P производства НПП «Электрон-Оptronик». Характеристики матрицы приведены ниже (см. табл. 2) [12, 13]. Конструктивно матрица расположена в газонаполненном металлокерамическом корпусе со встроенным термоэлектрическим (Пельтье) охладителем.

Таблица 1. Технические данные телескопа АЗТ-8

Система Кассегрена	$D = 70$ см, $F = 11.20$ м
Система Ньютона	$D = 70$ см, $F = 2.65$ м
Спутниковая камера	$D = 21$ см, $F = 0.75$ м
Монтировка телескопа	Параллактическая
Павильон	Башня с раздвижным куполом
Привод	Электрический
ПЗС-камеры	1 — НПК, 2 — S1C

Таблица 2. Характеристики матрицы ISD017P производства НПП «Электрон-Оptronик»

Число элементов (H×V)	1040×1160
Организация изделия	SFF
Размер пикселя, мкм	16×16
Заряд насыщения (тыс. эл.)	130
Шум считывания однокаскадного выхода (эл.)	4
Темновой сигнал (40°C), эл./яч./с	4
Квантовая эффективность, % $\lambda = 250$ нм	12
$\lambda = 400$ нм	25
750 нм	60
1100 нм	25
1250 нм	12
Неэффективность переноса заряда	$< 10^{-5}$

НИКОЛАЕВСКАЯ ПЗС-КАМЕРА (НПК)

В настоящее время в НИИ «НАО» для телескопа АЗТ-8 изготовлена ПЗС-камера, структурная схема которой представлена на рис. 3 [5]. Приведем описание и данные ПЗС-камеры НПК, использующей матрицу ISD017P.

НПК представляет собой цифровую многорежимную ПЗС-камеру с 16-разрядной оцифровкой сигнала и минимизированными шумовыми характеристиками. Встроенный термостатированный опорный генератор обеспечивает высокую стабильность временных характеристик управляющих диаграмм независимо от изменения температуры окружающей среды. Применение сверхмалошумящих усилителей, двойная коррелированная выборка, а также невысокая частота считывания сигнала позволяют свести к минимуму собственные шумы камеры.

Управление камерой и отображение видеинформации осуществляется с помощью компьютера. Конструктивно камера выполнена в виде камерной головки с матрицей и предусилителем, выносным

модулем управления и обработки сигнала, источником питания (рис. 3). Базовый интерфейс с компьютером — параллельный, расстояние до компьютера в базовом варианте — до 20 м. Для подключения к компьютеру используется ISA-адаптер. Программное обеспечение разработано на языке PASCAL и включает в себя процедуры управления, отображения и обработки сигнала.

ПЗС-КАМЕРА S1C НПП «ЭЛЕКТРОН-ОПТРОНИК»

Малокадровая цифровая ПЗС-камера нового поколения S1C — это компактный (моноблок) 14-разрядной цифровой камеры с двумя режимами опроса ПЗС (скоростным и точным), регулируемым временем экспозиции ПЗС (от 1 мс до 3000 с) и большим количеством встроенных функций обработки изображения (рис. 2) [12, 13].

Особенностью камеры S1C является полностью цифровая обработка видеосигнала (ДКВ, привязка к уровню черного и др.). Управление камерой и отображение видеинформации осуществляется с помощью компьютера. Конструктивно камера выполнена в виде моноблока (100×80×90 мм) с выносным блоком питания. Базовый интерфейс с компьютером — последовательный, расстояние до компьютера в базовом варианте — до 10 м. Для подключения к компьютеру используется PCI-адаптер, с помощью которого возможен ввод изображения в реальном времени. Вся обработка видеосигнала выполняется в цифровом виде. Для камер семейства S1C разработано программное обеспечение (в среде Windows'95/98) со следующими основными функциями: управление режимами работы камеры; отображение изображений на экране монитора с изменением масштаба, яркости и контраста, гамма-коррекция; сохранение изображений в файлы стандартных форматов (TIFF, PCX).



Рис. 2. Прецизионная цифровая ПЗС-камера S1C

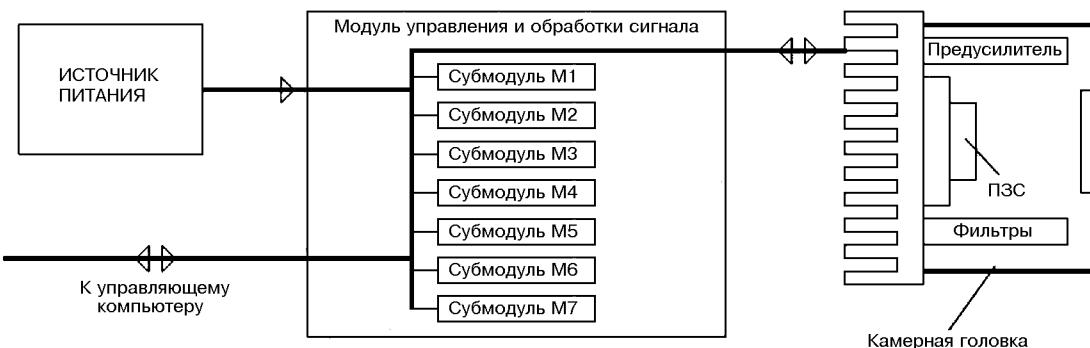


Рис. 3. Схема ПЗС-камеры НАО

ПЗС-МЕТОД НАБЛЮДЕНИЙ

Использование ПЗС-камер двух типов предполагается использовать в разных оптических каналах АЗТ-8 с применением комбинированного ПЗС-метода [9]. Комбинированный ПЗС-метод наблюдения геостационарных спутников (ГСС) является развитием предложенного в ГАО НАНУ [2] подобного метода с использованием фотографического приемника. Применение новых технических средств (ПЗС) позволяет предлагаемым методом достичь точности единичного наблюдения координат ГСС в оптическом диапазоне не хуже 0.2"—0.3"; фотографические наблюдения обеспечивают точность 0.3"—0.5" и даже 1" [8, 11].

В основу метода положен принцип наблюдения на телескопе с параллактической монтировкой оснащенном универсальной ПЗС-камерой НПК [9]. Камера НПК имеет возможность последовательной работы как в кадровом режиме, так и в режиме синхронного переноса заряда. При неподвижном телескопе спутник наблюдается в кадровом режиме, а движущиеся изображения звезд в режиме синхронного переноса заряда. Таким образом, получаются звездообразные изображения как для спутника, так и для опорных звезд, при этом моменты начала и конца всех наблюдательных процедур фиксируются по синхронометру службы времени с точностью не хуже миллисекунды.

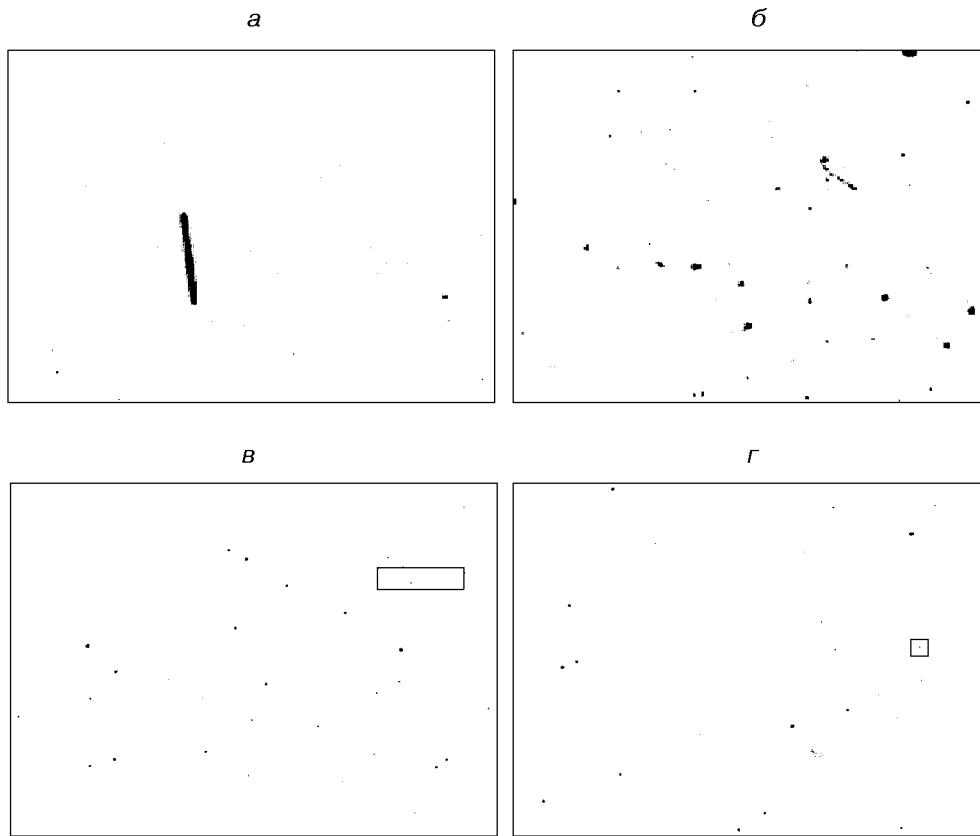


Рис. 4. ПЗС-изображение низкоорбитальных спутников LACROSSE (а), PROBA (б) и геостационарных спутников ASTRA (с), GORIZONT 19 (д)

Таблица 3. Характеристики наблюдаемых объектов на спутниковой камере телескопа АЗТ-8

Название спутника	Размер, м ³	Вес, т	Параметры орбиты				
			период, мин	Апогей, км	перигей, км	Наклонение	Точка стояния
LACROSS 4	4.4×6.2×12.6	14.5	98.36	684	677	68°	—
PROBA 1	0.6×0.6×0.8	0.1	96.78	663	546	97.9°	—
ASTRA	Разные	—	—	—	—	—	19.2° E
GORIZONT 19		2.1	1435.54	35785	35767	8.87	33.0° E

**РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ОБЪЕКТОВ
БЛИЖНЕГО КОСМОСА И АСТРОНОМИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ АЗТ-8,
ОСНАЩЕННЫХ ПЗС-КАМЕРОЙ**

Наблюдения проводились с использование спутниковой камеры, оснащенной камерой S1C. В наблюдательный список были включены объекты на разных орбитах, а именно [<http://www.astronautix.com>]:

- на низких орbitах — крупногабаритный спутник LACROSS и микроспутник PROBA;
- на геостационарных орбитах — группа спутников ASTRA и одинокий спутник GORIZONT.

Выбор наблюдательного списка осуществлялся из соображений оценки максимальных наблюдательных возможностей спутниковой камеры телескопа как по высотам, так и по размерам объектов, а также возможности наблюдений групп объектов. Эфемериды рассчитывались с использованием данных NORAD Two-Line ElementSets Current Data [<http://www.CelesTrak Current NORAD Two-Line Element Sets>].

Ниже представлены изображения крупногабаритного спутника (рис. 4, а) и микроспутника (рис. 4, б), группы объектов и одинокого объекта (рис. 4, в, г) на геостационарных орбитах.

Оценка точности спутниковой камеры выполнена по наблюдениям звезд. Инструментальная точность одного наблюдения положений и яркости звезд при трехсекундном накоплении для разных звездных величин представлены в табл. 4. Малое время накопления выбрано с целью сохранения точечных изображений звезд. Оценка проникающей способ-

ности спутниковой камеры показала возможность наблюдения объектов до 13^m.

По наблюдениям ГСС и ИСЗ при времени накопления 3 с полученная предварительная точность определений положений ГСС составила 4"-6", а ИСЗ на высотах 500—1500 км — 5"-10". Эти значения сопоставимы с данными для других аналогичных телескопов [1].

На основе реальных данных были рассчитаны наиболее вероятные характеристики трех каналов телескопа АЗТ-8, которые представлены в табл. 5. Методика расчета была выбрана из [4] и учитывает повышение проникающей способности и точности наблюдений в телескопических системах Кассегрена и Ньютона за счет увеличения фокусного расстояния и диаметра зеркала по сравнению с данными для спутниковой камеры. Также следует указать, что расчеты были сделаны для дифракционных изображений объектов и с учетом увеличения времени накопления до 60 с (для ГСС).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты первых наблюдений на АЗТ-8 с ПЗС-камерой показали перспективность использования телескопа для регулярных исследований околоземного космического пространства, а также объектов Солнечной системы.

2. Полученные данные со спутниковой камеры позволяют использовать ее для оперативного контроля объектов околоземного пространства на высотах от 500 км до геостационарных орбит в широком поле зрения.

3. Расчетные данные по стандартным оптическим схемам позволяют использовать телескоп АЗТ-8:

- в случае системы Кассегрена — для решения астрономических задач (связь между различными координатными системами, определение положений и яркости объектов в выбранных площадках небесной сферы), фотометрические исследования объектов околоземного пространства;

Таблица 4. Погрешность определения положений и яркости звезд

Величина	ε_m	$\varepsilon_{x,y}$
5—7 ^m	0.05 ^m	0.15"
7—9	0.10	0.20
9—11	0.15	0.25

Таблица 5. Расчетные значения проникающей способности каналов АЗТ-8, оснащенных ПЗС-камерой с матрицей ISD 017P, при наблюдении ИСЗ и ГСС

Канал	Поле зрения ($\delta \times \alpha$)	Точность единичного наблюдения	Проникающая способность			
			Высота объекта, км:	500	1000	10000
			Блеск ($R_{min} = 1$ мм):	19.1 ^m	20.6 ^m	23.1 ^m
Блеск ($R_{max} = 5$ см):			10.6 ^m	12.1 ^m	14.6 ^m	16.0 ^m
Система Кассегрена	5.1'×5.7'	0.02"—0.2"	14.0 ^m	14.5 ^m	16.5 ^m	20.6 ^m
Система Ньютона	21.5'×24.1'	0.05"—0.5"	18.7	19.2	21.2	23.8
Спутниковая камера	76'×85'	0.15"—4.0"	17.6	18.2	20.2	21.3

- в случае системы Ньютона — определение астрометрических и динамических характеристик тел Солнечной системы, уточнение элементов орбит космических аппаратов, мониторинг космического мусора.

В целом ожидаемая точность позиционных наблюдений ближнего и дальнего космоса на АЗТ с главным зеркалом (система Кассегрена) может составить около $0.2''$ — $0.3''$ для объектов до 19 — 20^m .

1. Гусева И. С., Каткова Е. В. Экспериментальные наблюдения геостационарных ИСЗ на АКД в Пулкове // Всероссийская астрономическая конференция. — СПб, 2001.— С. 57.
2. Дума Д. П., Иващенко Ю. Н., Шокин Ю. А. Опыт определения высокоточных координат геостационарных ИСЗ с помощью широкоугольного астрографа и специальной кассеты // Кинематика и физика небес. тел.—1986.— 2, № 2.—С. 86—88.
3. Закон України «Про Загальнодержавну (Національну) космічну програму України на 2003 — 2007 роки» від 24 жовтня 2002 року № 203—IV.
4. Ковалчук А. Н., Пинигин Г. И., Шульга А. В. Скоростной автоматический комплекс для регистрации небесных объектов естественного и искусственного происхождения в околосземном космическом пространстве // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: ИНАСАН, 2000.—С. 361—371.
5. Ковалчук О. М. Універсальний ПЗЗ-мікрометр в астрономії // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.— 1999.—№ 1.—С. 97—100.
6. Оптические приборы. Каталог-справочник — М.: Дом оптики, 1980.—Том 8. Приборы астрономические.
7. Полищук Г. М., Малышев В. В., Райкунов Г. Г. и др. Новая концепция развития космических средств дистанционного зондирования Земли // Тез. 7-й междунар. конф. «Системный анализ и управление космическими комплексами», Евпатория, 1—8 июля, 2002.—С. 4—5.
8. Kirichenko A. G., Kizyun L. M., Klimik et al., Catalogues of positions and orbital elements of the geosynchronous objects. Object observations for the purpose of collisions detection //

Extension and connection of reference frames using CCD ground-based technique. — Nikolaev: Atoll, 2001.—P. 189—193.

9. Kovalchuk A., Shulga A., Martynov M. Combined CCD observational method of geostationary satellite, methodical and technical designs and results // Extension and connection of reference frames using ground-based CCD technique. — Nikolaev: Atoll, 2001.—P. 194—200.
10. Mignard F. Observations of solar system objects with GAIA.I. Detection of NEOS // Astron. and Astrophys.—2002.—393.— P. 727.
11. Rykhlova L., Barabanov S., Kasimenco T., et al. Investigations of artificial and natural space objects in the vicinity of the Earth // extension and connection of reference frames using CCD ground-based technique. — Nikolaev: Atoll, 2001.—P. 161—170.
12. Vishnevsky G. I., Gumerov R. I., Pinigin G. I., et al. Scientific and technical collaboration between Russian and Ukrainian author collectives on the development of astronomical instruments equipped with the advanced detection devices // Astron. and Astrophys. Transactions.—2003.—22, N 4—5.—P. 777—786.
13. Vishnevsky G., Vydrevich M., Galyatkin I., et al. UV-IR CCD and Digital Cameras // Extension and Connection of Reference Frames using CCD ground-based Technique. — Nikolaev: Atoll, 2001.—P. 238—240.

INVESTIGATION OF NEAR-EARTH SPACE OBJECTS BY THE USE OF THE TELESCOPE AZT-8 WITH A CCD CAMERA

V. M. Abrosimov, A. N. Kovalchuk, S. V. Malevinskii,
G. I. Pinigin, V. V. Savchenko, A. V. Shulga

In extending the range of artificial and natural objects observed in near-Earth space to faint magnitudes both telescope parameters and detection methods are of great importance. Possibilities and list of problems which can be solved by the use of the AZT-8 with a CCD camera are considered. It is expected that position accuracy for near-Earth space objects up to 20 magnitudes will be about 0.2 — $0.3''$ when the AZT-8 modernized is used for observation.

УДК 621.37.08

В. В. Овсяников², В. М. Попель¹,
А. Л. Ольшевский¹, П. В. Попель²

¹Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

²Дніпропетровський національний університет

**Компактный антенный полигон
для экспериментальной отработки
антенн космических аппаратов**

Надійшла до редакції 20.01.04

Наведено результати розрахунків характеристик нового компактного антенного полігону, який потрібен для експериментального відпрацювання і проведення випробувань антен діапазону надзвичайно високих частот. Методом хвильової оптики з урахуванням теорії дифракції Френеля визначено один з головних параметрів компактного антенного полігону — відстань між колімаційним дзеркалом і досліджуваною антеною.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из главных направлений совершенствования и развития космических систем является уменьшение габаритов и массы их элементов и соответствующего технологического оборудования при сохранении или улучшении их качественных характеристик.

Экспериментальная отработка и испытания антенных систем являются актуальной проблемой при оснащении ракетно-космической и авиационной техники радиоэлектронной аппаратурой. Эта проблема обусловлена необходимостью выполнения весьма точных антенных измерений параметров уникальных антенн. Значительные трудности возникают при высокоточных измерениях характеристик излучения антенн с большим коэффициентом направленного действия, особенно если требуется экономия времени и средств.

Известно, что окружающее антенну пространство принято делить на три области: реактивную, область излучаемого ближнего поля и дальнюю зону излучения. При этом окончательное формирование диаграммы направленности (ДН) любой антенны происходит в ее дальней зоне (зоне Фраунгофера). Для антенн с электрически большой апертурой

граница между зоной излучаемого ближнего поля и дальней зоной излучения определяется приблизительно из выражения [3]

$$R \geq (2D^2)/\lambda, \quad (1)$$

где D — наибольший размер апертуры антенны; λ — длина рабочей волны.

В соответствии с выражением (1) для антенн СВЧ-диапазона, имеющих апертуру порядка $D/\lambda \sim 100$ и более, расстояние от облучателя до дальней зоны, на котором необходимо размещать исследуемую antennу, составляет 200—2000 м. При таких расстояниях между облучателем и исследуемой antennой в условиях дорогостоящего загородного открытого антенного полигона все же возникают нежелательные отражения от земли и окружающих предметов, которые по мере увеличения расстояния R увеличиваются. Кроме того, воздействие внешних природных факторов, особенно в зимнее время, ограничивает возможности проведения измерений, приводя к дискомфорту обслуживающего персонала, потерям времени и удорожанию работ.

По этим причинам оказывается целесообразным определять характеристики излучения антенн в ближней зоне излучения при относительно небольших расстояниях между облучателем и исследуе-

мой антенной [2, 4–6] в компактном антенном полигоне (КАП) относительно небольших размеров. Для значительного уменьшения расстояния R испытуемая антenna облучается пространственно ограниченным (коллимированным) пучком электромагнитной энергии вблизи апертуры большой параболической (цилиндрической или линзовой) антенны, называемой по «оптической» аналогии коллиматором пучка. Наиболее широкое распространение в настоящее время получили прецизионные параболические антенны, создающие ограниченный пучок квазиплоской волны. При этом расстояние R между коллиматором и исследуемой антенной может быть уменьшено во много раз, и вся аппаратурная часть вместе с коллиматором может быть размещена в безэховой камере сравнительно небольших размеров.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КОЛЛИМАТОРОМ И ИСПЫТУЕМОЙ АНТЕННОЙ

Предварительная оценка показала, что для обеспечения измерений ДН остро- и слабонаправленных антенн сантиметрового диапазона длин волн размеры раскрыта коллиматора должны быть не менее пяти метров. Так как в этом случае размеры апертуры коллиматора существенно превышают длину рабочей волны, теория излучаемого пучка может рассматриваться в приближении волновой оптики [1]. Следует принять во внимание, что приближение волновой оптики не учитывает дифракционные явления на краях апертуры, приводящие в зоне дифракции Френеля к существенным осцилляциям амплитуды поля в пучке. В диапазоне расстояний от апертуры коллиматора, где эти осцилляции существенны, распределение амплитуды и фазы поля в поперечном сечении пучка может сильно отклоняться от распределения в плоской волне. Поэтому задача состоит в том, чтобы определить те максимальные расстояния от апертуры коллиматора до исследуемой антенны, где эти осцилляции еще незначительны и ими можно пренебречь. Кроме того, это расстояние ограничивается возникновением осцилляций поля в пучке, а также степенью расходности (дефокусировки) пучка по мере распространения его от апертуры. В соответствии с теорией дифракции Френеля [8] степень этой дефокусировки увеличивается с увеличением расстояния от апертуры, осциллируя вокруг определенного среднего значения. Эти осцилляции прекращаются приблизительно на расстояниях $(2D^2)/\lambda$ (1), т. е. на расстояниях дальней зоны, где

амплитуда поля уже изменяется в соответствии с законом $1/R$ и происходит окончательное формирование главного лепестка ДН.

Введем в рассмотрение параметр дальней зоны $\Delta = \frac{R}{(2D^2)/\lambda}$, который при $\Delta = 1$ приводит к выражению (1), что соответствует дальней зоне.

Тогда с учетом теории дифракции Френеля [8] получим

$$E_\theta = - \frac{iZ_0 \cos\theta \cos\varphi}{\pi/4\Delta} e^{-\frac{i\pi}{4\Delta}} \times \\ \times \left[L_1\left(\frac{\pi}{8\Delta}, U\right) + iL_2\left(\frac{\pi}{8\Delta}, U\right) \right], \quad (2)$$

где $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ — волновое сопротивление свободного пространства, L_1 , L_2 — функции Ломмеля, $U = 0.5kD \cdot \sin\theta$, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число.

Рассмотрим, как изменится выражение (2) при переходе в дальнюю зону (т. е. при $\Delta \rightarrow 1$). Функции Ломмеля выражаются с помощью ряда по функциям Бесселя:

$$L_n(W, U) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(-1)^p W^{n+2p} \cdot J_{n+2p}(U)}{U^{n+2p}}, \quad (3)$$

где $W = \frac{kD^2}{8R} = \frac{\pi}{8\Delta}$, I — действующее значение электрического тока на круглой апертуре.

В дальней зоне $\Delta \geq 1$, $W \leq \pi/8 \leq 0.39$, и достаточно взять первый член ряда:

$$L_1(W, U) = \frac{\pi}{8\Delta} \cdot \frac{J_1(U)}{U}, \\ L_2(W, U) = \frac{\pi^2}{64\Delta} \cdot \frac{J_2(U)}{U^2} \approx 0.$$

Поэтому выражение для поля в дальней зоне будет иметь вид

$$E_\theta \approx -Z_0 \cos\theta \cos\varphi \cdot \frac{J_1(U)}{2U}. \quad (4)$$

Таким образом, получаем известную ДН равномерно возбужденной круглой апертуры типа $J_1(U)/(2U)$. Если бы рассматривалась равномерно возбужденная квадратная апертура, то ДН была бы типа $(\sin U)/U$. В этом случае в более точной формуле (2) вместо функций Ломмеля фигурировали бы интегралы Френеля

$$C(U) = \int_0^U \cos \frac{\pi t^2}{2} dt, \\ S(U) = \int_0^U \sin \frac{\pi t^2}{2} dt. \quad (5)$$

Именно осцилляции этих функций приводят к колебаниям поля на оси пучка. Огибающая осцилляций затухает по мере приближения к апертуре, стремясь к определенному постоянному значению. В приближении Френеля осцилляции начинаются за границей зоны близких реактивных полей.

Для примера приведем выражения для модуля плотности потока мощности Π на оси квадратной (сторона L) и круглой (радиус $D/2$) апертур [8]:

$$\Pi_{\text{кв}} = 16.4 \left[C^2 \left(\frac{1}{2\sqrt{\Delta}} \right) + S^2 \left(\frac{1}{2\sqrt{\Delta}} \right) \right]^2, \quad (6)$$

$$\Pi_{\text{кр}} = 26.1 \left[1 - \frac{16\Delta}{\pi} \sin \frac{\pi}{8\Delta} + \frac{128\Delta^2}{\pi^2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{8\Delta} \right) \right]. \quad (7)$$

Очевидно, что зависимости $\Pi(\Delta)$ в обоих случаях (6) и (7) осциллируют, что является результатом дифракционного характера полей в зоне излучающего ближнего поля.

По результатам исследований выражений (6) и (7) можно сделать вывод, что на малых расстояниях от апертуры осцилляции малы и считать значение $\Delta \leq 0.01$ ($R \leq 0.01 \cdot 2D^2/\lambda$) в качестве критерия максимального расстояния от апертуры коллиматора до испытуемой антенны. Что касается ограничений по углу θ , то с учетом [8] можно отметить, что формула (2) справедлива при $\theta \leq 30^\circ$.

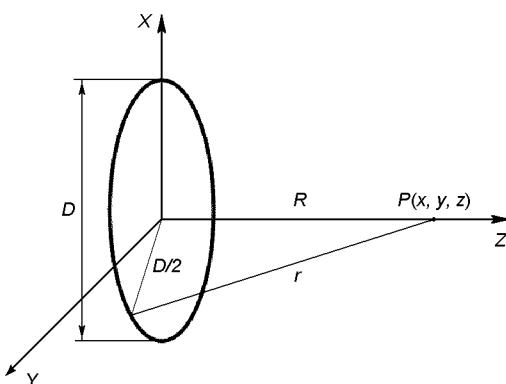


Рис. 1. Расположение круглой излучающей апертуры в декартовой системе координат

Найдем ограничение по расстоянию между апертурой и исследуемой антенной. С одной стороны, в соответствии с рис. 1 точная оптическая длина пути от края апертуры до точки наблюдения P есть

$$r_{\text{опт}} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(R^2 + \frac{D^2}{4} \right)^{1/2}.$$

С другой стороны, в приближении Френеля это расстояние принимается равным

$$r_{\Phi} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(R + \frac{D^2}{8R} \right).$$

Допуская, что разность хода лучей по этим двум расстояниям не превышает $\pi/8$, можно записать

$$\frac{2\pi}{\lambda} \left[\sqrt{R^2 + D^2/4} - \frac{2\pi}{\lambda} \left(R + \frac{D^2}{8R} \right) \right] = \frac{\pi}{8}. \quad (8)$$

Отсюда минимальное расстояние, допустимое в формуле (2), будет решением уравнения

$$R^3 - \frac{R^2\lambda}{32} + \frac{RD^2}{8} - \frac{D^4}{8\lambda} = 0,$$

решая которое, находим [8]

$$R \leq \frac{D}{2} \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{1/3}. \quad (9)$$

Таким образом, из выражения (9) для случая $\lambda = 15$ см и $D = 5$ м, получим $R \leq 8$ м.

Отвлекаясь от приближения Френеля для рассматриваемого случая, применим приближение волновой оптики. Если считать, что на апертуре коллиматора имеется чисто линейная поляризация электромагнитного поля, то поле пучка будет также линейно поляризовано, и его можно представить функцией

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{P}_x U(x, y, z), \quad (10)$$

где \mathbf{P}_x — постоянный единичный вектор поляризации. Вне апертуры функция $U(x, y, z)$, как известно, удовлетворяет однородному волновому уравнению [7]

$$\Delta U + k^2 U = 0. \quad (11)$$

По мере распространения от апертуры пучок излучаемого поля расширяется. Будем, как и в геометрической оптике, считать, что распределение энергии происходит вдоль лучей. Тогда решение уравнения (11) можно искать в виде $U = A(S)e^{-iks}$, где $A(S)$ — амплитуда поля пучка, S — длина вдоль пучка.

Общее решение волнового уравнения (10) будем искать в виде бесконечной суммы

$$U(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n L_n \left(2 \frac{r^2}{W_0^2} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{W_0^2} \right), \quad (12)$$

где L_n — полиномы Лаггера, W_0 — радиус раскрыва коллиматора. Чтобы ряд (12) сходился, на функцию $U(r, 0)$ должны быть наложены определенные ограничения. Она должна быть кусочно-непрерыв-

ной, ограниченной на интервале $0 \dots \infty$ и удовлетворять условию, чтобы интеграл $\int_0^\infty U^2(r, 0)dy$ имел конечное значение. Отсюда следует, что равномерное распределение на апертуре ($U(r, 0) = 1$) не может быть разложено в ряд по полиномам Лагерра. Эту трудность можно преодолеть, если на апертуре задать равномерное распределение, но несколько спадающее к краям. Если задать распределение на апертуре в виде экспоненты, слабо спадающей к краям апертуры, т. е., $U(r, 0) = e^{-\alpha y}$, то для любых $\alpha > 0$ условие разложимости в ряд по полиномам Лагерра будет выполняться.

Расчеты распределения амплитуды и фазы поля в поперечном сечении пучка на различных расстояниях от апертуры были проведены на компьютере. При этом выбрано значение $\alpha = 0.025$, что обеспечивало спад амплитуды поля на краях апертуры менее чем на 0.5 дБ. Поперечные размеры апертуры коллиматора были выбраны равными 5 м. Вычисления полиномов Лагерра проводилось с использованием рекуррентной формулы

$$(n+1)L_{n+1}(y) = (2n+1-y)L_n(y) - nL_{n-1}(y). \quad (13)$$

Для лучшей аппроксимации кривой принималась сумма относительно большого числа N членов ряда по полиномам Лагерра, то есть

$$\begin{aligned} e^{-0.025y} &= \sum_{n=0}^N A_n L_n(y) e^{-y/2}, \\ y &= 2 \frac{r^2}{W_0^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Оценка точности (14) проводилась с использованием табличных значений $e^{-0.025y}$. Различие между табличными значениями и значениями, вычисленными по (14) при $N = 100$, имеется в четвертом-пятом знаке после запятой, то есть, абсолютная точность аппроксимации распределения на апертуре полиномами Лагерра равна 0.01 %.

Расчеты распределения амплитуды и фазы поля в поперечном сечении пучка на различных расстояниях от апертуры коллиматора проводились для расстояний $R = 3 \dots 7$ м и рабочих длин волн $\lambda = 2 \dots 15$ см. Они показали, что расходимость пучка на этих расстояниях чрезвычайно мала и очень медленно увеличивается по мере увеличения расстояния. Таким образом, максимально возможное расстояние от апертуры коллиматора до исследуемой антенны составляет 7–8 м, что соответствует полученным выше результатам с применением приближений Френеля в соответствии с формулами (6) и (7).

Оценим минимально возможное расстояние между апертурой коллиматора и испытуемой в КАП антенной. При этом следует принимать во внимание фактор, ограничивающий снизу расстояние от апертуры коллиматора до облучателя. Это нежелательная кроссполяризационная составляющая, которая определяется кривизной поверхности коллимационного зеркала и которая может быть уменьшена с увеличением фокусного расстояния коллиматора [1]. Поэтому при данной апертуре желательно иметь значительное фокусное расстояние, для чего использовать длиннофокусное зеркало с соотношением $f/D \geq 0.6$, где f — фокусное расстояние, а D — диаметр апертуры. Это означает, что в рассматриваемом случае фокусное расстояние должно быть $f \geq 3$ м, чем и ограничивается минимально возможное расстояние между коллимационным зеркалом и исследуемой антенной. Обычно коллимационное зеркало представляет собой вырезку из параболоида с вынесенным из вторичного поля облучателем (рис. 2).

Облучатель 1 должен быть расположен ниже исследуемой антенны 2, установленной на поворотном столе, чтобы не попадать в зону излучения коллимационного зеркала 3, а также не излучать в направлении испытуемой антенны. Поэтому уровень излучения облучателя 1 в направлении испытуемой антенны должен быть мал (≈ 50 –60 дБ), что практически достигается экранировкой облучателя поглощающим материалом.

Значительное влияние на структуру поля коллинированного пучка оказывает дифракция на краях зеркала коллиматора, приводя к появлению паразитного излучения, не совпадающего по фазе с излучением пучка коллиматора. Это паразитное,

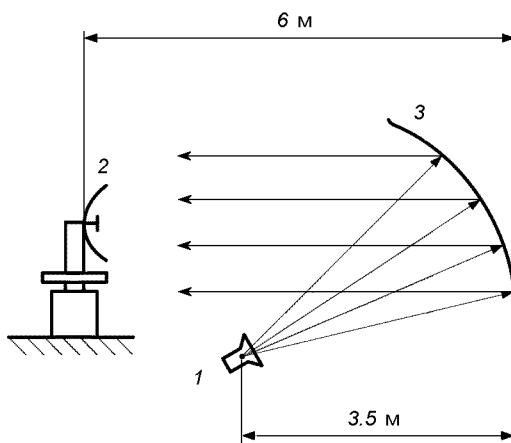


Рис. 2. Схема взаимного расположения исследуемой антенны 2, коллимационного зеркала 3 и облучателя 1 коллимационного зеркала 3

неколлимированное излучение можно уменьшить, если «закруглить» края зеркала коллиматора (см. рис. 2). Имеется еще один фактор, ограничивающий минимальное расстояние от плоскости апертуры коллиматора до исследуемой антенны. При малых расстояниях между коллиматором и испытуемой антенной возникают стоячие волны (эффект взаимодействия), что влечет за собой появление ошибок измерений. Для исключения этого явления испытуемая антенна должна «перехватывать» малую долю отраженной энергии и быть хорошо согласованной. Для этого она должна находиться на достаточном расстоянии от коллиматора, чтобы отраженная в результате дифракции электромагнитная волна была незначительной.

Таким образом, с учетом проведенных расчетов и оценок максимального и минимального расстояний между коллиматором 3 и исследуемой антенной 2 для рабочего частотного диапазона 2...15 ГГц предлагается обеспечивать в компактном антенном по-

лигоне расстояние между коллиматором 3 и облучателем 1 не менее 3 м, а расстояние между исследуемой антенной 2 и коллиматором 3 — не более 7—8 м.

С учетом приведенных выше оценок разработан компактный антенный полигон, структурная схема которого представлена на рис. 3.

Часть аппаратуры и оборудования компактного антенногого полигона располагается в безэховой камере, покрытой изнутри поглощающим материалом, а часть в непосредственной близости от нее в нижней части компактного антенногого полигона. На опорно-поворотном устройстве 1 закреплена исследуемая антенна 2 так, что ее положение можно корректировать с помощью позиционера 3 и механизма поворота исследуемой антенны 4. С противоположной стороны безэховой камеры напротив исследуемой антенны 2 смонтировано коллимационное зеркало 5, с внутренней стороны которого в его фокусе установлен облучатель 6 коллимационного

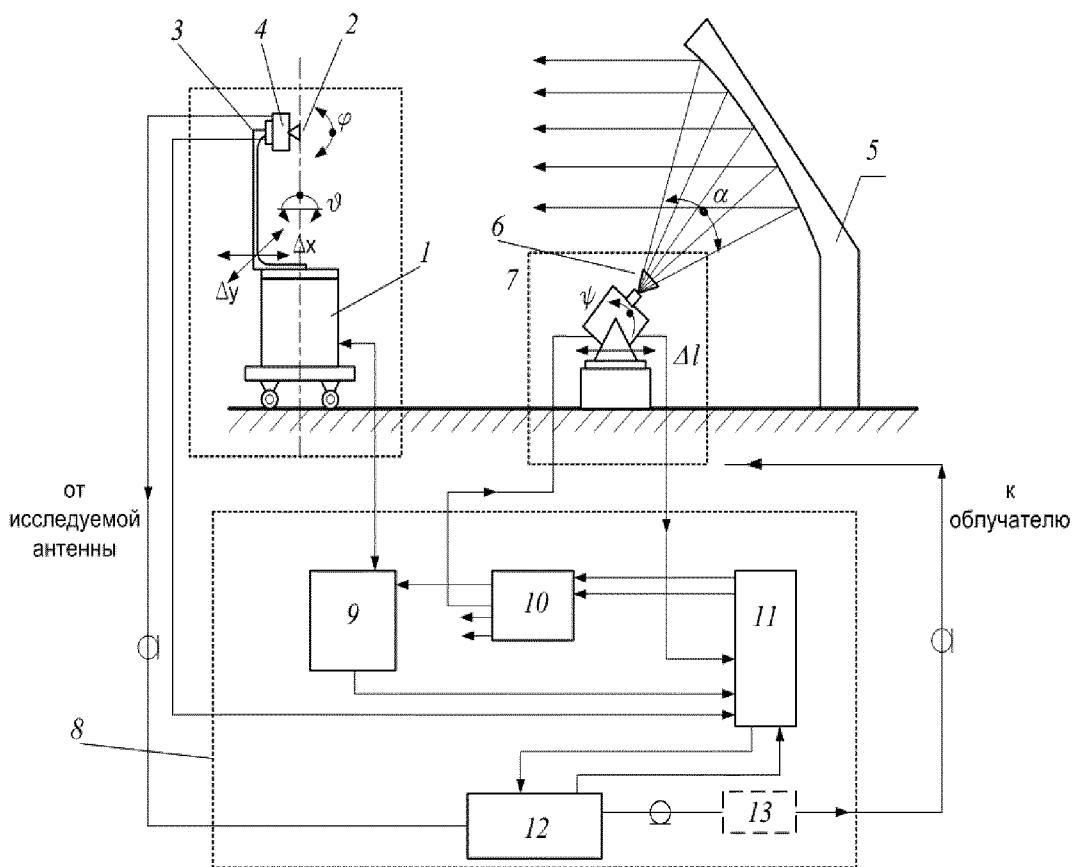


Рис. 3. Структурная схема компактного антенногого полигона: 1 — опорно-поворотное устройство, 2 — исследуемая антенна, 3 — позиционер, 4 — механизм поворота исследуемой антенны, 5 — коллимационное зеркало, 6 — облучатель коллимационного зеркала, 7 — устройство поворота и перемещения облучателя, 8 — измерительно — управляющий комплекс, 9 — блок управления опорно-поворотным устройством, 10 — устройство управления, 11 — специализированная ЭВМ, 12 — измерительное устройство, 13 — усилитель СВЧ-мощности

зеркала 5. С помощью устройства поворота и перемещения облучателя 6 последний можно разворачивать и перемещать, плавно изменяя меридиональный угол ψ или совершать возвратно-поступательные линейные перемещения Δl . Это позволяет корректировать положение облучателя 6 относительно фокуса коллимационного зеркала 5. Автоматизированное функционирование компактного антенного полигона обеспечивается с помощью измерительно-управляющего комплекса 8, который включает в себя блок управления опорно-поворотным устройством 9, устройство управления 10, специализированную ЭВМ 11, измерительное устройство 12 и усилитель СВЧ-мощности 13. Управляющие и измерительные органы компактного антенного полигона соединены между собой высокочастотными экранированными кабелями.

В компактном антенном полигоне опорно-поворотное устройство исследуемой антенны 2, облучателя 6 и коллиматора 5 обеспечивают точность позиционирования не хуже $15'$. Аппаратные и программные средства измерительно-управляющего комплекса 8 являются уникальными как по архитектуре построения, так и по комплектации и исполнению.

Рассмотренный компактный антенный полигон находит применение для измерений параметров антенно-фидерных устройств (АФУ). При этом решаются следующие задачи:

- измерения ДН и других параметров различных антенно-фидерных устройств;
- исследование эффективной поверхности рассеяния аэрокосмических аппаратов;
- исследование фрагментов и узлов фазированных антенных решеток.

Энергетический потенциал измерительно-управляющего комплекса 8 совместно с используемым оборудованием комплексного антенного полигона составляет от 70 до 90 дБ при аппаратной погрешности измерений с помощью данного комплекса, не превышающей 1.8 дБ.

Общий вид коллимационного стенда предприятия Государственного конструкторского бюро «Южное» им. М. К. Янгеля, размещенного в безэховой камере представлен на рис 4. Приближенно наружные размеры компактного антенного полигона составляют в длину 26 м при ширине и высоте 9×9 м. Такие размеры позволили разместить его внутри стандартного помещения цехового типа с отоплением, освещением и кондиционированием воздуха.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанный и изготовленный в конструкторском бюро космических аппаратов и систем Государственного конструкторского бюро «Южное» им. М. К. Янгеля компактный антенный полигон является единственным в Украине уникальным сооружением, позволяющим производить точные антенные измерения, оценку электромагнитной совместимости радиосистем, оценку эффективной поверхности рассеяния аэрокосмических аппаратов и другие измерения при высокой степени имитации безэховости космического пространства.

Использование данного компактного антенного полигона для разнообразных измерений в диапазоне СВЧ позволяет повысить качество и культуру производства, ускорит выпуск новой техники и по многим показателям приведет к экономии затрачиваемых средств.

1. Вуд П. Анализ и проектирование зеркальных антенн: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1984.—207 с.
2. Джонсон Р., Экер Х., Холлис Д. Определение диаграмм направленности антенн по результатам измерений в ближней зоне // ТИИЭР.—1973.—61, № 12.—С. 5—37.
3. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л. Антенно-фидерные устройства. — М.: Сов. радио, 1961.—816 с.
4. Захарьев Л. Н., Леманский А. А., Турчин В. И. и др. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Под ред. Н. М. Цейтлина. — М.: Радио и связь, 1985.—368 с.
5. Кинбер Б. Е., Цейтлин В. Б. Об измерении параметров антенн в поле плоской волны, создаваемой коллиматором // Радиотехника и электроника.—1965.—10, № 7.—С. 1190—1201.
6. Куммер В. Х., Джилеспи Э. С. Антенные измерения // ТИИЭР.—1978.—66, № 4.—С. 143—173.
7. Марков Г. Т., Чаплин А. Ф. Возбуждение электромагнитных волн. — М.-Л.: Энергия, 1967.—376 с.
8. Сканирующие антенные системы СВЧ: Пер. с англ. / Под ред. Г. Т. Маркова, А. Ф. Чаплина. — М.: Сов. радио, 1966.—536 с.

THE COMPACT ANTENNA RANGE FOR EXPERIMENTAL IMPROVEMENT OF SPACE VEHICLES ANTENNAS

V. V. Ovsyanikov, V. M. Popel', A. L. Ol'shevskiy, P. V. Popel'

We present estimates for some characteristics of a new compact antenna range for the experimental improvement and performance of tests of antennas of microwave range. The method of wave optics in view of the theory of Fresnel's diffraction was used to determine one of the main parameters of compact antenna measurement range, namely, the distance between a collimation mirror and tested antenna.

Рис. 4. Общий вид коллимационного стенда, предназначенного для антенных измерений в диапазоне СВЧ: 1 — облучатель коллимационного зеркала, 2 — испытуемая антенна, 3 — коллимационное зеркало

Рис. 2. Симптоми вірусу смугастої мозаїки пшениці (ВСМП) на листках пшениці

УДК 535.51

Л. Т. Міщенко, С. М. Савенков, Є. А. Оберемок

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

**Застосування лазерної мюллер-поляриметрії
для дослідження здорових та вірусінфікованих
рослин пшениці сорту Апогей, вирощених
за умов модельованої мікрогравітації**

Надійшла до редакції 24.11.03

Рослини пшениці сорту Апогей, інфіковані виділенним нами вірусом смугастої мозаїки пшениці, показали зменшення репродукції цього вірусу в умовах модельованої мікрогравітації. Вперше застосовано метод лазерної мюллер-поляриметрії для дослідження впливу умов модельованої мікрогравітації на здорові та вірусінфіковані рослини пшениці. Отримані результати свідчать про можливість застосування методу повної мюллер-поляриметрії для виявлення структурних і функціональних змін у листках пшениці під впливом вірусної інфекції та кліностатування.

Вищі рослини можуть рости і розвиватися за умов космічного польоту [22]. Так, пшениця проходить усі фази онтогенезу і навіть може давати урожай зерна [8]. Останніми роками значної шкоди рослинництву завдають фітопатогени, у тому числі віруси — внутрішньоклітинні патогени. Діагностика вірусів у латентній формі зазвичай ускладнена [16], а у стресових умовах космосу інфекція може проявитися у тих рослин, що вважалися здоровими. Залежно від сили і довготривалості дії стресора живі об'єкти адаптуються до трансформованого навколошнього середовища. Якщо ж дія стресора виходить за межі адаптивних можливостей живого організму, включається механізм запрограмованої смерті (апоптозу) окремих його органел, клітин або їх цілих органів [2, 3]. Тому актуальним залишається питання вивчення особливостей розвитку вірусінфікованих рослин пшениці за умов модельованої мікрогравітації в земних умовах (кліностатування). Особливу цінність для таких досліджень мають безконтактні методи дослідження (БМД). Так, поряд із високою чутливістю, точністю та інформативністю ці методи у більшості випадків не призводять до пошкодження досліджуваного об'єкта.

В основу БМД, використаного нами, закладено процес зондування досліджуваного об'єкта електромагнітним випромінюванням із заданими характеристиками, зміна яких вивчається після взаємодії з об'єктом. Найчастіше використовуються такі характеристики — носії інформації:

- 1) частота (довжина хвилі) випромінювання (спектроскопія відбиття, поглинання, люмінесценції [6, 7]);
- 2) інтенсивність випромінювання [6, 7, 11];
- 3) поляризація випромінювання (еліпсометрія, поляриметрія [1, 5, 15]);
- 4) методи, утворені при поєднанні характеристик 1, 2, 3.

Використання БМД типу 1 та 2 для дослідження об'єктів біологічної природи можна вважати вже традиційними. Вони дозволяють отримувати набір параметрів, які відносно добре піддаються фізичній інтерпретації [11]. Поляризаційні БМД (група 3) обираються переважно для дослідження прозорих слабкорозсіюючих об'єктів, оскільки розробка аналітичного алгоритму для сильнорозсіюючими об'єктів ускладнена [1, 5, 15]. Біологічні ж об'єкти часто є сильнорозсіюючими. Як наслідок, поляричні роботи з дослідження біооб'єктів зводять-

ся переважно до вивчення зміни певних станів поляризації (лінійної, кругової) після взаємодії з такими об'єктами з наступною спробою фізичної інтерпретації отриманих результатів [13, 14, 24, 26, 29, 30]. Але навіть такий спрощений з поляриметричної точки зору підхід дозволяє в деяких випадках вирішувати задачі, які не вирішуються традиційними методами. Так, в роботі [14] вказано на можливість використовувати поляриметричні методи для діагностики на ранніх стадіях такої небезпечної хвороби як остеопороз. В роботі [29] йдеється про застосування поляризаційно-контрастної методології для коректної гістології області шкіри, ураженої раковими клітинами. Для діагностики розвитку катаракти хрусталика ока використовували поляризоване випромінювання [13].

Равен із співробітниками вивчали розсіяння поляризованого випромінювання листками рослин, поверхня яких мала суттєві відмінності [26]. Повна інформація про вплив досліджуваного об'єкта на довільну поляризацію випромінювання може бути отримана в рамках мюллер-поляриметрії [1, 5]. Тому мюллер-поляриметрія (МП) потенційно має більше можливостей у порівнянні з методами, використаними в [13, 14, 24, 26, 29, 30].

Мета нашої роботи — з'ясувати можливість застосування методів МП для проведення діагностики рослин, уражених вірусом смугастої мозаїки пшениці, які вирошуваються за умов модельованої мікрогравітації.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Вирошування рослин проводили на універсальному кліностаті «Цикл-2» [9, 25], який дозволяє реалізувати кілька схем переорієнтації рослин відносно вектора сили земного тяжіння. Кліностат являє собою обертову платформу (центрифугу), що може обертатись навколо вертикальної осі зі швидкістю 0, 1, 3 і 5 об/хв. В наших дослідах платформа оберталась з постійною швидкістю 1 об/хв. На платформі радіально розташовані 4 горизонтальних осі, навколо яких обертаються вегетаційні контейнери з рослинами. Швидкість їхнього обертання незалежна від обертання платформи, її також можна задавати дискретно: 2, 4, 8 об/хв (в наших дослідах 2 об/хв). Контейнери виготовлені із прозорого органічного скла у вигляді циліндрів діаметром 100 мм і висотою 270 мм з системою отворів у кришках і на бокових поверхнях для вентиляції та зволоження. На дні контейнера міститься спеціальний штучний субстрат (базальтове волокно), змочений розчином макро- і мікроелементів у оп-

тимальному співвідношенні; pH розчину становив 6.0—6.3. У дослідах було використано шість контейнерів. Два з них закріплені таким чином, що вісь контейнера збігалася з віссю його обертання та віссю росту рослин; вони розміщені горизонтально і обертаються перпендикулярно до осі платформи («горизонтальне» кліностатування). Чотири контейнери обертаються у вертикальній площині навколо осей, перпендикулярних до осі росту рослин («вертикальне» обертання рослин). За умов обертання повздовжніх осей росту рослин у вертикальній площині, паралельній вектору сили тяжіння, відбувається постійна зміна кута між вказаним вектором та віссю росту рослини. У трьох контейнерах (один для горизонтального кліностатування і два для вертикального обертання) вирошували здорові рослини, а в трьох інших — системно інфіковані вірусом смугастої мозаїки пшениці (ВСМП). Інфікування проводили у фазі трьох листків, рослини вирошували до закінчення вегетації. Контролем служили такі самі рослини, вирощені у нерухомих контейнерах, а також у відкритих посудинах за тих же умов температури і освітлення.

Усі рослини були розміщені у спеціальній кімнаті зі штучним контролюваним мікрокліматом ($t = 21 \pm 1^\circ\text{C}$ та збалансованим штучним освітленням 10000 люксів у режимі 16 год день/8 год ніч). Об'єктом дослідження слугував суперкарликівий надранній сорт пшениці Апогей, який вступає у фазу колосіння приблизно через 30 діб після посіву.

Для виявлення ВСМП у рослинах застосовували електронну мікроскопію (мікроскопи EM-125, Україна; JEOL, Японія) та твердофазний імуноферментний аналіз у непрямому варіанті (ELISA). Оптичну густину продукту ферментативної реакції оцінювали через 30¹ інкубації при кімнатній температурі на ридері фірми «Termo Labsystems Opsys MR» (США) з програмним забезпеченням «Dynex Revelation Quicklink», при двох довжинах хвиль 492/620 нм. Статистична обробка одержаних результатів проведена методом дисперсійного аналізу з використанням відповідних комп'ютерних програм. Очистку віруса провадили за методом Бракке [16] в нашій модифікації.

Для МП були використані такі варіанти:

- 1 — пшениця, уражена ВСМП, вирощена за умов горизонтального кліностатування;
- 2 — пшениця, уражена ВСМП, вирощена за умов вертикального кліностатування;
- 3 — пшениця здорові, вирощена за умов вертикального кліностатування;
- 4 — пшениця здорові, нерухомий контроль.

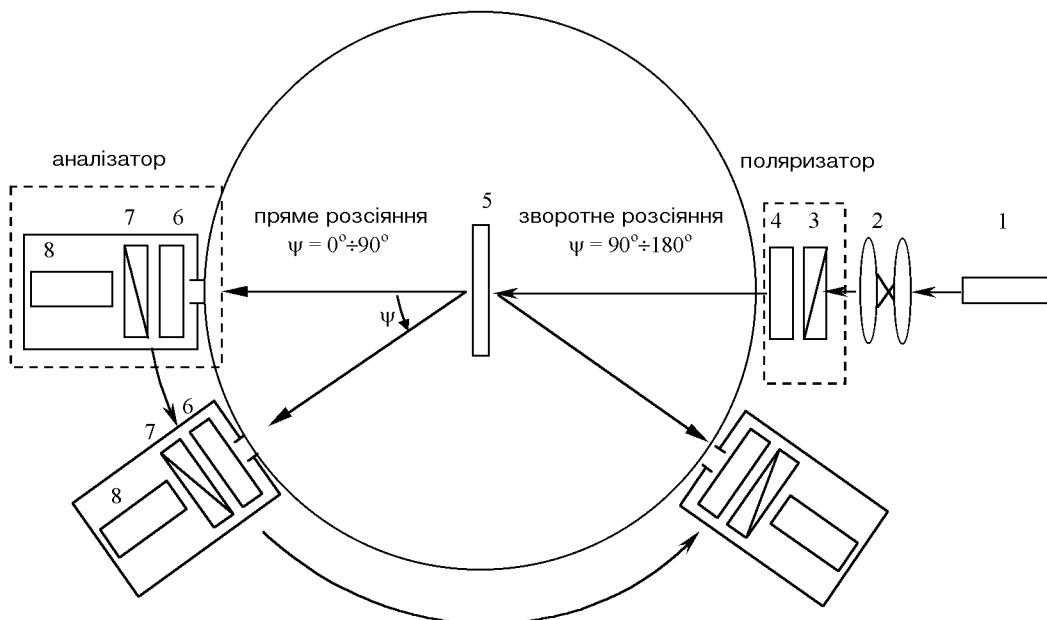


Рис. 1. Схема мюллер-поляриметра для дослідження листків пшениці: 1 — джерело випромінювання (Не-Не-лазер $\lambda = 632.8$ нм, модель ЛГ-126); 2 — поширювач; 3 — поляризатор (може обертатися навколо оптичної осі схеми); 4 — чвертьхвильова фазова платівка (також може обертатися навколо оптичної осі схеми); 5 — досліджуваний об'єкт; 6 — чвертьхвильова фазова платівка, що обертається з постійною частотою; 7 — аналізатор (нерухомий); 8 — фотоприймач (типу ФЕП-62); Ψ — кут розсіяння ($0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$ — пряме розсіяння; $90^\circ < \Psi \leq 180^\circ$ — зворотне розсіяння), відраховується в горизонтальній площині

МЕТОД МЮЛЛЕР-ПОЛЯРИМЕТРІЇ

В рамках МП процес взаємодії поляризованого електромагнітного випромінювання з об'єктом записується у вигляді матричного рівняння:

$$\mathbf{S}^{\text{out}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}^{\text{in}},$$

де $\mathbf{S}^{\text{in}(\text{out})}$ — чотирикомпонентний вектор-стовпець (вектор Стокса випромінювання), який описує поляризацію випромінювання до (після) взаємодії з об'єктом, а \mathbf{M} — матриця 4×4 з дійсними елементами (матриця Мюллера), яка є оператором переворення вектора випромінювання з довільними поляризацією, довжиною хвилі та напрямком розповсюдження у вектор поляризації після взаємодії з об'єктом. Таким чином, матриця Мюллера у повній мірі є об'єктом з поляриметричної точки зору, а її конкретний вигляд повністю визначається анізотропними характеристиками об'єкта, який воно описує [1, 5].

Отже, знаючи матрицю Мюллера об'єкта, після відповідного аналізу можна робити висновки про його анізотропну структуру та про природу її формування.

ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Вимірювались кутові залежності елементів матриць Мюллера для всіх чотирьох варіантів пшениці (по 10 листків кожного). Вимірювання матриці аналізували згідно з процедурами, запропонованими в роботах [21] та [23].

Вимірювання матриць Мюллера здійснювали на поляриметрі, схема якого наведена на рис. 1. Поляриметр працює за методом чотирьох зондувальних поляризацій [27] і може бути розділений на зондувальну та приймальну частину. Зондувальна частина включає джерело випромінювання (в нашому випадку Не-Не-лазер типу ЛГ-126, який генерує на довжині хвилі $\lambda = 632.8$ нм), поширювальну телескопічну систему для збільшення діаметра лазерного пучка (в нашому випадку до 1 см) та поляризаційний формувач (поляризатор), виконаний на основі рухомих призмового поляризатора та чвертьхвильової фазової платівки для формування випромінювання з необхідною поляризацією. Приймальна частина поляриметра складається з аналізатора поляризації, розміщеного у світлозахисній колбі з отвором для сигналу. Аналізатор

поляризації складається з чвертьхвильової фазової платівки, яка обертається зі стороною частотою, призмового поляризатора, фотоприймача (у нашому випадку — фотопомножувач типу ФЭУ-62). Детально з принципом роботи поляриметра можна ознайомитись в роботі [27]. Керування усіма вузлами поляриметра, збір та обробка даних здійснювались в автоматичному режимі за допомогою створеного відповідного апаратного та програмного забезпечення.

Слайди із зразками пшениці розміщувались у поляриметрі на місці досліджуваного об'єкта (рис. 1). Зондування зразків відбувалося нормально до їхньої площини. Технологічні особливості поляриметра дозволяли вимірювати матриці Мюллера у діапазоні кутів розсіяння $\Psi = 0^\circ \dots 160^\circ$, які знаходяться у горизонтальній площині. Попередні вимірювання матриць Мюллера відомих реперних об'єктів дозволяють нам стверджувати, що експериментальна похибка δM вимірювання елементів матриці Мюллера об'єктів (яка оцінювалась нами за відомим співвідношенням [4]

$$\delta M = \frac{\|M^0 - M^{\text{exp}}\|}{\|M^0\|},$$

де M^0 , M^{exp} — відповідно відома таблична та виміряна матриці Мюллера реперного об'єкта, не перевищувала 0.03 відносних одиниць [27, 28] для нормованої на елемент $M_{1,1}$ матриці Мюллера.

Аналіз матриць полягав у наступному.

1. Згідно з [20] для кожної вимірюної матриці ми визначали превалюючий тип детермінованого перетворення поляризації, що описується детермінованою матрицею Мюллера [1, 17]. На основі цього ж методу [20, 21] для всіх кутів спостереження визначали ентропію. Значення останньої лежать знаходяться в діапазоні 0—1 і характеризують ступінь розупорядкованості процесу взаємодії електромагнітного випромінювання з досліджуваним об'єктом.

2. Для детермінованої матриці Мюллера, що описує превалюючий тип детермінованого перетворення поляризації, ми розв'язували векторну обернену задачу поляриметрії [10, 23], тобто визначали величини параметрів анізотропії, лінійної і кругової фазової та лінійної і кругової амплітудної, що характеризує досліджуваний об'єкт для даного кута спостереження.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

Під час проведення агроекологічного моніторингу ураженості посівів пшениці вірусними інфекціями з'ясовано, що найрозповсюдженішим є ВСМП,

який постійно циркулює у природних біоценозах, уражує злакові рослини, особливо озиму пшеницю, від 15 % до 60 % і більше, що призводить до значного зниження урожаю і його якості. На рис. 2 (див. вклейку) представлені симптоми ВСМП на листках пшениці, для яких характерні хлортинність, мозаїчність, різний ступінь пожовтіння та смуги обабіч центральної жилки.

Електронно-мікроскопічне дослідження препаратів очищеного вірусу показало, що ВСМП (полтавський ізолят) має вигляд гнучких ниток діаметром 12—13 нм і довжиною 710 ± 50 нм (рис. 3), характерні для потівірусів.

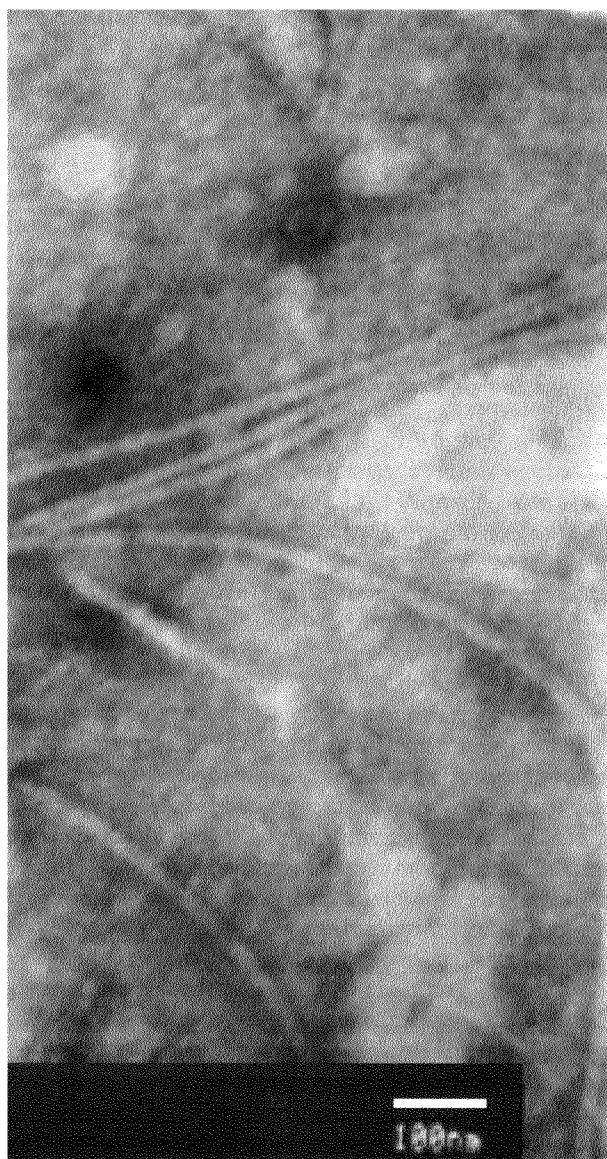


Рис. 3. Електронограма очищеного вірусного препарату ВСМП. Інструментальне збільшення 60 000

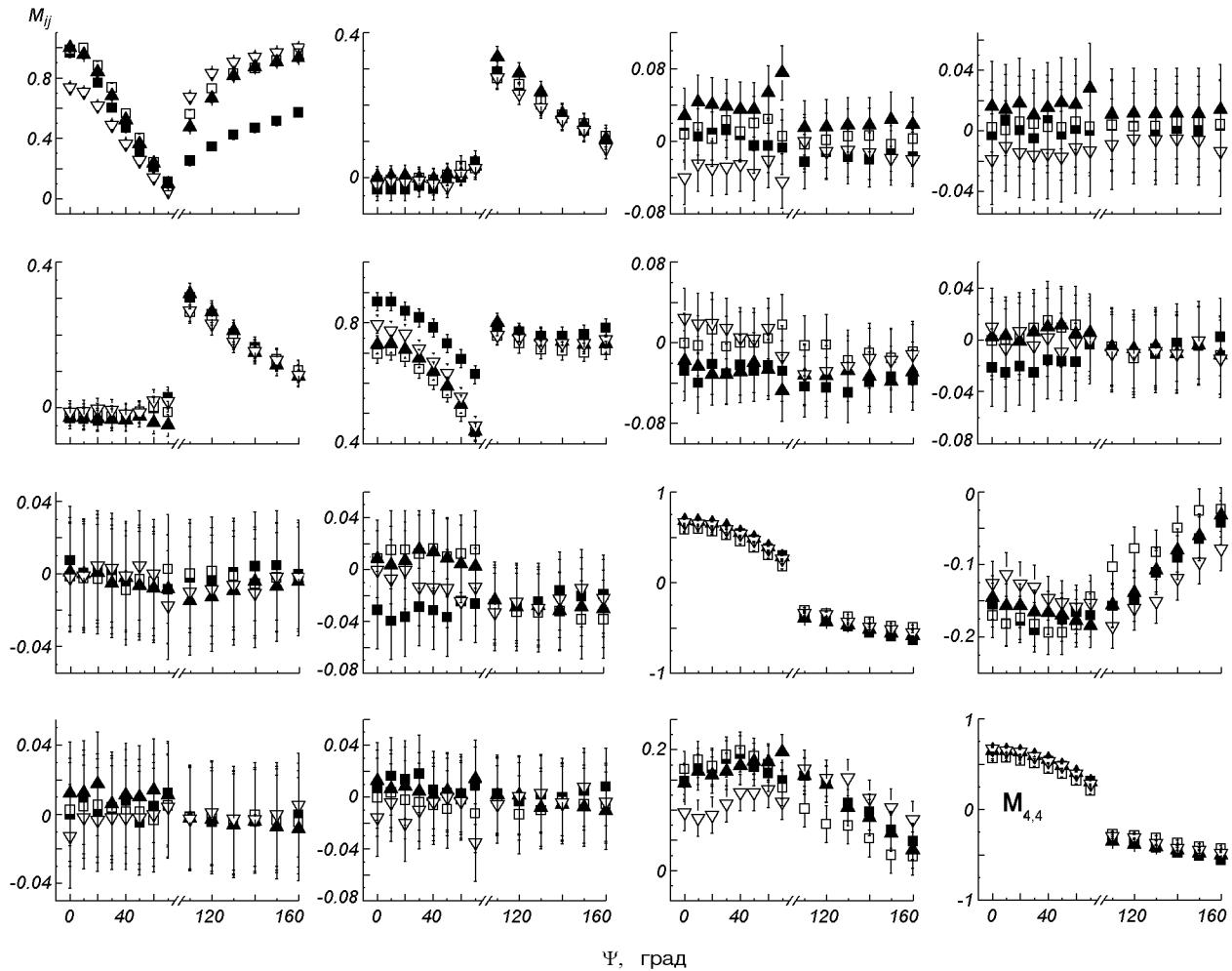


Рис. 4. Залежності значень елементів M_{ij} матриці Мюллера від кута розсіяння Ψ для листків пшениці сорту Апогей. Залежності для елемента M_{11} пронормовані на максимальне значення цього елемента серед всіх варіантів. Залежності для всіх останніх елементів нормовані на відповідні значення M_{11} у кожного варіанта на відповідному куті розсіяння

В кожний контейнер кліностата було висаджено по 35 пророслих зерен пшеници. Для дослідження відбирали рослини протягом усього вегетаційного періоду.

При кліностатуванні в осінньо-зимову вегетацію рослин пшеници сорту Апогей (спеціально виведеного для космічних досліджень Брюсом Бекбі в США [18, 19] і переданого нам) було з'ясовано, що найсприятливішими для росту, розвитку та урожаю зерна виявилися наземні, нерухомі варіанти. Середня вага однієї зернівки була найбільшою у нерухомих контейнерах (25.2 ± 1.3 мг). При горизонтальному кліностатуванні всі колоски виявилися без зернівок. Така ж закономірність була встановлена у пшеници «суперкарлик», що вирощувалась

на борту орбітальної станції «Мир» [12]. При вертикальному обертанні рослин вага однієї зернівки складала 17.2 ± 0.9 мг.

Репродукцію ВСМП визначали в динаміці з 11 до 27 днів з моменту інокуляції методом непрямого імуноферментного аналізу (ІФА). Встановлено, що найвищим із усіх досліджуваних варіантів титр ВСМП (1/2560) протягом вегетаційного періоду виявився у нерухомих наземних рослин. При кліностатуванні титр вірусу знижується, і репродукція ВСМП припиняється на 27-му добу після інфікування. Найменш сприятливі умови для репродукції ВСМП при вертикальному обертанні рослин. На 17-ту добу титр різко знижується, а на 22-гу і 27-му добу репродукцію вірусу не зафіксовано.

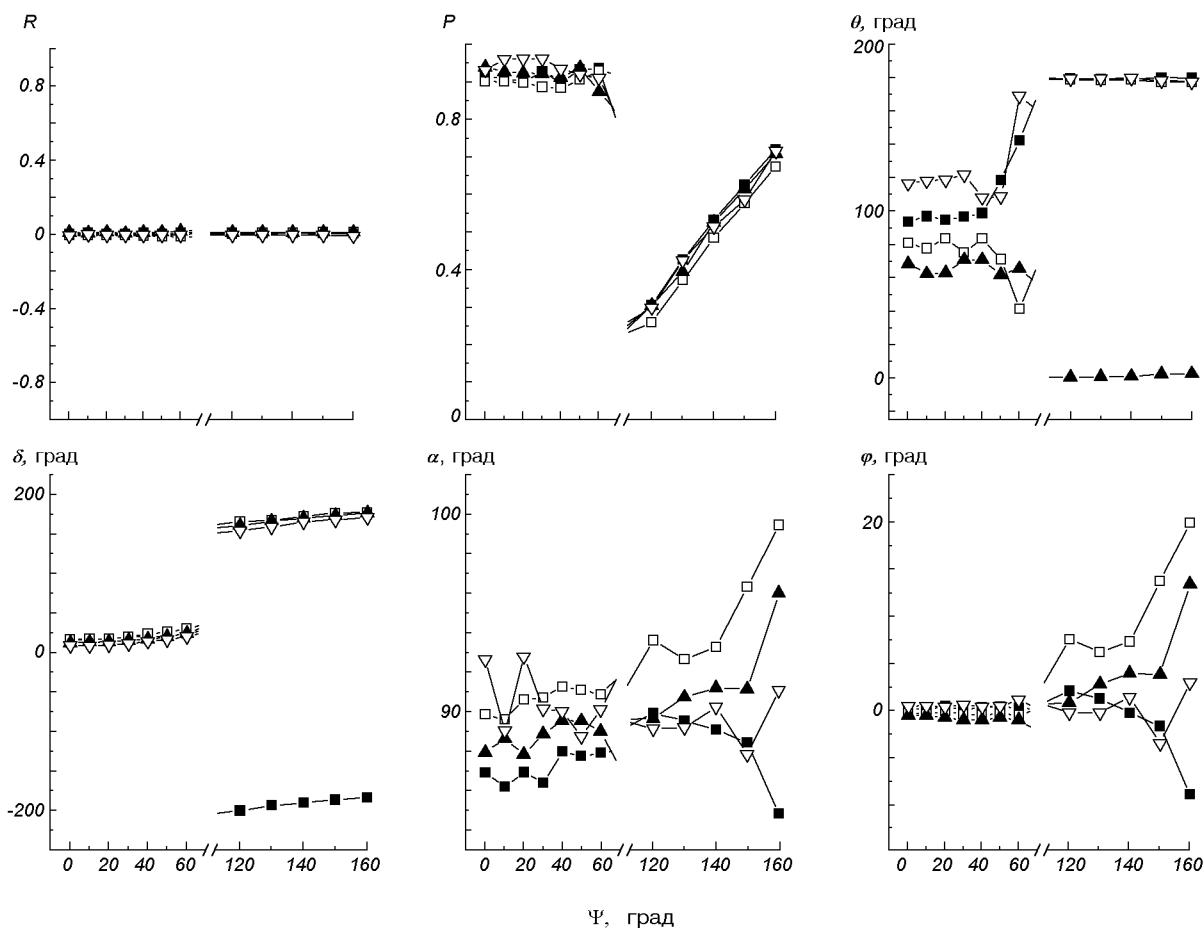


Рис. 5. Залежності значень та азимутів орієнтації амплітудної і фазової анізотропії від кута розсіяння Ψ для листків сорту Апогей. Величини амплітудних анізотропій R , P наведені у відносних одиницях (оскільки вони характеризують відносну різницю у пропусканні власних поляризацій), а азимут лінійної амплітудної анізотропії θ , значення та азимут лінійної фазової анізотропії δ та α , значення кругової фазової анізотропії φ — у градусах

Таким чином, з'ясовано, що при тривалому клініостатуванні репродукція ВСМП у пшениці сорту Апогей не відбувається.

Опису застосування повної МП (вимірювання всіх 16 елементів матриці Мюллера) для дослідження об'єктів біологічної природи (в тім числі листків пшеници) в літературних джерелах до цього часу ми не знайшли. Тому однозначна інтерпретація отриманих результатів ускладнена, і на даному етапі носитиме сутінко оцінковий характер.

Результати вимірювань кутових залежностей матриць Мюллера наведені на рис. 4 (роздріви для кутів розсіяння $75^\circ \leq \psi \leq 110^\circ$ відповідають рівню розсіянного сигналу, нижчому за шумовий). Кожна точка на графіку є результатом усереднення по 10 листках кожного варіанту.

У результаті аналізу експериментальних матриць Мюллера по схемі, наведеній вище, ми отримали деякі важливі параметри розсіяного світла.

На рис. 5 наведені залежності значень та азимутів орієнтації амплітудної і фазової анізотропії від кута спостереження, а на рис. 6 — значення ентропії (п. 2 схеми аналізу).

Поляриметричні параметри різних видів анізотропії та їхньої орієнтації мають різний рівень чутливості щодо умов вирощування рослин та вірусного ураження. Так, величини кругової амплітудної R (для всіх кутів спостереження) і лінійної фазової анізотропії δ (для прямих кутів спостереження) фактично не чутливі до цих процесів. Решта параметрів, а саме: кут орієнтації α лінійної фазової анізотропії (для зворотних кутів спостере-

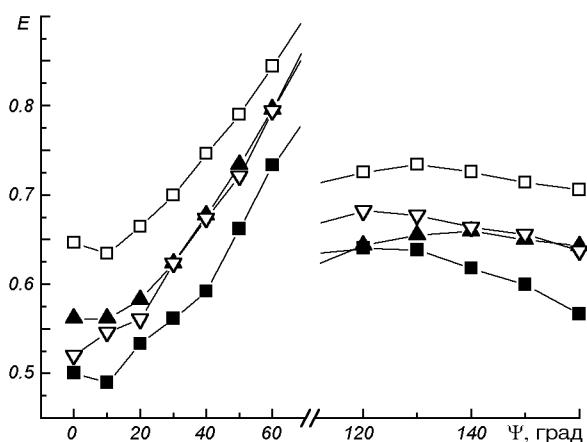


Рис. 6. Залежність величини ентропії від кута розсіяння Ψ для листків пшениці сорту Апогей

ження) і ентропія, навпаки, досить чутливі. Отже, ці параметри становлять певний інтерес для кількісного моніторингу згаданих процесів у листках.

ВИСНОВКИ

Виділений нами полтавський ізолят за морфологією та імунологічними характеристиками є вірусом смугастої мозаїки пшениці (*Wheat streak mosaic virus*).

Умови кліностатування пригнічують репродукцію вірусу в листках пшениці сорту Апогей.

Встановлено, що найбільша різниця параметрів α спостерігається для кута розсіяння $\Psi \approx 160^\circ$ (зворотне розсіяння). Так, для здорових нерухомих рослин величина α складає приблизно 85° , збільшуючись на 7 % в умовах кліностатування. Для вертикально кліностатованих рослин, уражених ВСМП, у порівнянні зі здоровими нерухомими рослинами, різниця α збільшується приблизно на 16 %, та на 12 % для горизонтально кліностатованих рослин.

Показано, що найбільша різниця значень ентропії у зразків досягається для кута розсіяння $\Psi \approx 10^\circ$ (пряме розсіяння). Так, у порівнянні із значенням ентропії для здорових нерухомих рослин (≈ 0.48 відносних одиниць) її величина збільшується в 1.3 рази для інфікованих ВСМП вертикально кліностатованих рослин; для інфікованих ВСМП горизонтально кліностатованих рослин ентропія збільшується в 1.16 разів, а для здорових вертикально кліностатованих — в 1.12 рази.

У випадку зворотного розсіяння $\Psi \approx 160^\circ$ ентропія складає 0.56 відносних одиниць для здорових нерухомих рослин, для вертикально кліностатованих — збільшується в 1.13 рази. Для інфікованих ВСМП вертикально кліностатованих рослин — збільшується в 1.25 рази, для ВСМП горизонтально кліностатованих — в 1.14 рази.

Отже, метод лазерної мюллер-поляриметрії може слугувати для виявлення змін в листках пшениці під впливом віrusу смугастої мозаїки і модельованої мікрогравітації.

1. Аззам Р. А., Башара Н. М. Эллипсометрия и поляризованный свет. — М.: Мир, 1981.—312 с.
2. Бойко А. Л., Силаєва А. М., Міщенко Л. Т., Решетник Г. В. Особливості ультраструктурної організації клітин мезофілу озимої пшениці за умов вірусної інфекції // Цитологія і генетика.—1997.—31, № 5.—С. 71—79.
3. Ванюшин Б. Ф. Апоптоз у растений // Успехи біологической хімии.— 2001.—№ 41.—С. 3—38.
4. Воеводин В. В. Вычислительные основы линейной алгебры. — М.: Наука, 1977.—251 с.
5. Джеррард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику. — М.: Мир, 1978.—341 с.
6. Каневский В. А., Сытник К. М., Росс Ю. К., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Лазерная томография растительности. — Киев: Ин-т ботаники АН України, 1992.—22 с.
7. Кондратьев, Каневский В. А., Росс Ю. К. и др. Лазерное дистанционное зондирование растительности. — Л.: АН СССР, ГАО, 1987.—168 с.
8. Левинских М. А. Онтогенез, репродукция и метаболизм высших растений в условиях космического полета: Автoref. дис.... д-ра биол. наук. — М.: Ин-т Медико-биологических проблем РАН, 2002.—49 с.
9. Мищенко Л. Т. Влияние моделированной микрогравитации на ростовые процессы и фотосинтетический аппарат растений *Triticum aestivum L.*, инфицированных вирусом полосатой мозаики пшеницы // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 5/6.—С. 66—70.
10. Оберемок Є. А., Савенков С. М. Розв'язок оберненої задачі поляриметрії для детермінованих об'єктів на основі неповних матриць Мюллера // Укр. фіз. журн.—2002.—47, № 8.—С. 803—807.
11. Посудін Ю. І. Спектроскопічний моніторинг агросфери. — Київ: Урожай, 1998.—128 с.
12. Сычев В. Н., Шепелев Е. Я., Мелешко Г. И. и др. Биологические системы жизнеобеспечения: исследования на борту орбитального комплекса «Мир» // Авиакосмическая и экологическая медицина (Россия).—1999.—№ 1.—С. 10—16.
13. Тучин В. В. Шубочкин Л. П. Применение лазеров в офтальмологии. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1984.—Ч. 1.—243 с.
14. Ушенко О. Г., Пішак В. П. Лазерна поляриметрична діагностика в біології і медицині. — Чернівці: Мед. академія, 2000.—302 с.
15. Шеркліфф У. Поляризованный свет. Получение и использование. — М.: Мир, 1965.—254 с.
16. Brakke M. K. et al. Degradation of wheat streak mosaic virus capsid protein during leaf senescence // Phytopathology.—1990.—80, N 12.—P. 1401—1405.
17. Brosseau Ch. Fundamentals of polarized light. — New York: Wiley, 1998.—345 p.

18. Bugbee B. Engineering plants for spaceflight environments // Amer. Soc. Gravitational and Space Biol. Bull.—1999.—12.—P. 67—74.
19. Bugbee B., Koerner G., Albrechtsen R., et al. “USU-Apogee”. A new high-yielding dwarf wheat cultivar for life support systems // 31 Scientific Assembly of COSPAR. — The University of Birmingham (England), 1996.—P. 205.
20. Cloud S. R. Group theory and polarization algebra // Optik.—1986.—N 7.—P. 26—36.
21. Cloude S. R., Pottier E. Concept of polarization entropy in optical scattering // Opt. Ing.—1995.—34, N 6.—P. 1599—1610.
22. Kordyum E. L. Plant reproduction systems in microgravity: experimental data and hypotheses // Adv. Space Res.—1998.—21, N 8/9.—P. 1111—1120.
23. Mar'enko V. V., Savenkov S. N. Representation of arbitrary Mueller matrix in the basis of matrices of circular and linear anisotropy // Opt. and Spectroscopy.—1994.—76, N 1.—P. 94—96.
24. McDaniel E. B., McClain S. C., Hsu J. W. P. Nanometer scale polarimetry studies using a near-field scanning optical microscope // Appl. Opt.—1998.—37, N 1.—P. 84—92.
25. Mishchenko L. T., Silayeva A. M. Effect of clinostating on physiological and biochemical characteristics of wheat plants infected by the streak mosaic virus of wheat (SMVW) // Horticulture & Vegetable Growing (Lithuania).—1998.—17, N 3.—P. 386—394.
26. Raven P. N., Jordan D. L., Smith C. E. Polarized directional reflectance from laurel and mullein leaves // Opt. Eng.—2002.—41, N 5.—P. 1002—1012.
27. Savenkov S. N. Optimization and structuring of the instrument matrix for polarimetric measurements // Opt. Eng.—2002.—41, N 5.—P. 965—972.
28. Savenkov S. N., Muttiah R. S., Oberemok Y. A. Transmitted and reflected scattering matrices from an English Oak leaf // Appl. Opt.—2003.—42, N 24.—P. 4955—4962.
29. Smith M. H., Lompado A., Burke P. Mueller matrix imaging polarimetry in dermatology // Proc. SPIE.—2000.—3911.—P. 132—137.
30. Walter G. Egan., Israel S., Johnson W. R., Whitehead V. S. High-resolution space-shuttle polarimetry for farm crop classification // Appl. Opt.—1992.—31, N 10.—P. 1542—1548.

**APPLICATION OF LASER MUELLER-POLARIMETRY
TO THE INVESTIGATION OF HEALTHY AND INFECTED
BY THE WHEAT STREAK MOSAIC VIRUS APOGEE
VARIETY WHEAT GROWN UNDER SIMULATED
MICROGRAVITY CONDITIONS**

L. T. Mishchenko, S. M. Savenkov, Ye. A. Oberemok

Apogee variety wheat plants inoculated by wheat streak mosaic virus isolated by us displayed the reduction of viral reproduction under simulated microgravity conditions. We employed the laser Mueller-polarimetry method for the first time to study simulated microgravity effects on healthy and infected by the wheat streak mosaic virus wheat plants. Our results are indicative of the possibility to apply the laser Mueller-polarimetry procedure to the investigation of structural and functional changes in wheat leaves caused by virus infection and clinorotation.

УДК 616.45-001.1/68.531.5

Х. К. Мурадян, А. Н. Тимченко, Н. А. Утко,
Т. А. Бадова, В. В. Безруков

Інститут геронтології АМН України, Київ

Терморегуляция, дыхательный коеффициент
и активность ключевых ферментов
антиоксидантной системы в печени и миокарде
крыс при остром гипергравитационном стрессе

Надійшла до редакції 25.12.03

Вивчено вплив м'якої ($2g$) гіпергравітації різної тривалості на дихальний коефіцієнт, температуру тіла і коефіцієнт тепlopровідності, а також активності супероксиддисмутази, каталази, глутатіон-пероксідази і глутатіон-редуктази у печінці та міокарді дорослих щурів. Показано, що м'яка гіпергравітація ($2g$), модельована центрифугуванням, вклікає швидке зменшення температури тіла, яка досягає мінімуму на 2-4-ту год центрифугування і повертається до вихідного рівня протягом наступних 3 год відновлювального періоду. У ті ж строки динаміка коефіцієнта тепlopровідності відрізняється змінами протилежної напрямленості — підвищення з наступним відновленням вихідного рівня. Нетривалий сеанс м'якої гіпергравітації ($2g$, 1 ч) не викликає статистично суттєвих змін активностей вивчених антиоксидантних ферментів. Результати лінійного кореляційного і регресійного аналізів свідчать про наявність додатної кореляційної залежності між температурою тіла і VO_2 на етапах як зменшення, так і відновлення температури. Дихальний коефіцієнт зменшується протягом всього дослідженого періоду, що може бути наслідком підсилення термогенезу за рахунок переважного окислення жирних кислот. Аналіз отриманого матеріалу за допомогою тривимірного нелінійного плоттингу дозволяє зробити висновок, що до моменту завершення центрифугування температура тіла більша для особин, які встигають швидше активувати термогенез за допомогою окислення жирів.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что запуск и посадка космических аппаратов связаны со значительными ускорениями и сопряженными с ними гипергравитационными перегрузками. Влияние гравитационных факторов на организм развивается по механизму специфических стрессорных реакций, совокупность которых нередко называют гипергравитационным стрессом [1, 9]. В последние годы обращает на себя внимание еще один аспект этой проблемы, который делает изучение гипергравитационного стресса актуальным не только в начале и конце, но и во время длительных космических экспедиций. Ведь эволюция наземных животных и человека происхо-

дила в практически постоянном гравитационном поле Земли, вследствие чего эти виды не выработали приспособительных механизмов к изменениям гравитации и стали уязвимыми к действию не только гипергравитации, но и микрогравитации. Именно трудности, которые связаны с адаптацией человека к МГ во время полета и гипергравитации при запуске и посадке, являются основными факторами, лимитирующими продолжительность пилотируемых полетов. Не решив эту проблему, трудно представить участие человека в космических экспедициях даже на ближайшие планеты, включая планируемые полеты на Марс [18].

Несмотря на многочисленные нерешенные вопросы медико-биологического и технического характе-

ра, обнадеживающим здесь является консенсус о том, что искусственная гравитация в режимах хронической или периодической нормо- или гипергравитации, моделированная с помощью бортовой центрифуги или вращающихся вокруг собственной оси летательных аппаратов, может стать надежным средством минимизации отрицательных последствий продолжительного пребывания человека вне гравитационного поля Земли. Есть основание полагать, что сеансы гипергравитации могут индуцировать изменения, противоположные действию микрогравитации, тем самым способствуя быстрому восстановлению от негативного влияния невесомости [8].

Следует отметить, что идея о создании искусственной гравитации с помощью центробежных ускорений не нова и технически просто реализуема. Более того, в настоящее время для продолжительных космических полетов она по существу не имеет альтернатив [10]. Однако такая возможность еще мало изучена в общебиологическом плане и, по всей видимости, не лишена «сюрпризов». Например, выяснилось, что гипергравитационные стрессы могут быть сопряжены с нарушением терморегуляции и, возможно, равновесия между образованием и гашением свободных радикалов с последующим развитием окислительного стресса [16]. Вот почему наряду с анализом влияния гравитационных факторов на основные системы жизнеобеспечения организма — газообмен и терморегуляцию — важно выяснить характер влияния гипергравитации на состояние антиоксидантной системы.

Цель настоящей работы — изучить влияние мягких гипергравитационных нагрузок ($2g$) различной продолжительности на дыхательный коэффициент (ДК), температуру тела (ТТ) и константу теплопроводности (КТ), а также активности таких ключевых ферментов антиоксидантной системы, как супeroxиддисмутаза (СОД), каталаза, глутатион-пероксидаза (ГП) и глутатион-редуктаза (ГР).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены с использованием 55 взрослых (9–10 мес.) самцов крыс линии Вистар. Гипергравитацию моделировали центрифугированием в течение 1, 2 и 4 ч при $2g$ на центрифуге собственной конструкции диаметром 3 м. Исследуемые физиологические и биохимические параметры измерялись до начала и сразу после завершения центрифугирования, а также в восстановительный период — через 5 и 7 ч после начала гипергравитационного стресса.

Дыхательный коэффициент определяли по соотношению скоростей потребления кислорода (V_{O_2}) и выделения углекислого газа (V_{CO_2}), которые измеряли с помощью соответствующих блоков газоанализатора фирмы Gebr. Mijnhardt (Нидерланды).

Температуру тела измеряли ректально с помощью специально сконструированного электрического термометра с полупроводниковым датчиком, вмонтированным в тонкую (1 мм) гибкую пластмассовую трубку, как описано ранее в работе [1].

Константу теплопроводности КТ вычисляли с учетом скорости V_{O_2} , температуры тела ТТ и температуры воздуха ТВ по известной формуле $KT = \frac{E\cdot V_{O_2}}{(TT - TV)}$, где ЭЭК — энергетический эквивалент кислорода, равный 20.2 кДж/л. Константу теплопроводности выражали в единицах $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$ [3].

Активность ферментов и содержание белка измеряли по общезвестным методам в супернатантах печени и миокарда, для приготовления которых животные подвергались эвтаназии с помощью CO_2 , согласно рекомендациям Американской ветеринарной ассоциации. В рамках этой работы важно то, что такой способ эвтаназии не оказывает существенного влияния на активность указанных антиоксидантных ферментов [7]. Через 1 ч центрифугирования печень и миокард быстро извлекали, взвешивали, гомогенизировали в охлажденном 0.05 М фосфатном буфере и центрифугировали при нагрузке 10 000 g и 4 °C в течение 20 мин.

Активность СОД (ед. \cdot мин $^{-1}$ \cdot мг·белка $^{-1}$) определяли по степени ингибирования реакции восстановления феррицитохрома-С супероксид-анион радикалом, который генерировался ксантил-ксантиноксидазной системой. За единицу принималась активность, необходимая для ингибирования реакции на 50 % [12].

Активность каталазы (мкмоль \cdot мин $^{-1}$ \cdot мг белка $^{-1}$) определяли по скорости разрушения H_2O_2 [2].

Активность глутатион-пероксидазы (нмоль \cdot мин $^{-1}$ \cdot мг белка $^{-1}$) определяли по скорости окисления NADPH в реакции с H_2O_2 в присутствии восстановленного глутатиона [14].

Активность глутатион-редуктазы (нмоль \cdot мин $^{-1}$ \cdot мг белка $^{-1}$) определяли по снижению уровня восстановленного НАДФ в системе, состоящей из 65 мкМ NADPH и 0.25 мМ окисленного глутатиона [15].

Содержание белка определяли по методу Лоури [11].

Все реагенты, использованные для измерения активностей ферментов, были приобретены у фирмы «Sigma-Aldrich» (США—Германия).

Полученные данные обрабатывали одно-, двух- и

трехмерными методами статистики с помощью пакета программ «Statistica-5».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая, что основными участниками космических экспедиций являются мужчины среднего возраста, то в настоящей работе были использованы зрелые самцы крыс, возраст которых (9–10 мес) примерно соответствует 1/3 их средней продолжительности жизни [4].

Проведенные исследования подтвердили известные данные о том, что у грызунов даже мягкий гипергравитационный стресс ($2g$) может вызвать существенное снижение температуры тела [5, 6, 13, 17]. Такое снижение легко обратимо и обычно устраняется в течение нескольких часов пост-стрессового восстановительного периода. В наших опытах температура достигала минимума к 2–4 ч гипергравитационного стресса (до 32 – 33 °C), но в течение трех часов восстановительного периода этот показатель практически возвращался к исходному уровню.

Интенсивность продукции тепла, как известно, определяется уровнем окислительных процессов, и следовательно, между температурой тела и скоростью потребления кислорода (V_{O_2}) может быть положительная коррелятивная связь. Представлялось интересным выяснить, изменяется ли характер такой зависимости на этапах понижения и повышения температуры тела. Как видно из линий регрессии и соответствующих им коэффициентов корреляции, положительная корреляция между температурой тела и V_{O_2} сохраняется на всех изученных этапах гипергравитационного стресса (рис. 1). Только в группе крыс через 1–2 ч после начала гипергравитации (рис. 1, б) такая зависимость была ниже общепринятого уровня достоверности и свидетельствовала только о тенденции к положительной корреляции ($r = 0.43$, $P = 0.1$).

Так как при гипергравитационном стрессе интенсивность газообмена мало изменяется (данные не представлены), то можно было допустить, что вызванное гипергравитацией снижение температуры тела прежде всего является следствием усиления теплопотерь. Обоснованность такого предположения можно было количественно оценить, например, с помощью коэффициента теплопроводности. Результаты однофакторного дисперсионного анализа свидетельствуют, что гипергравитация оказывает высоко достоверное влияние на константу теплопроводности ($P < 0.00001$). При этом динамика изменений константы теплопроводности по сущест-

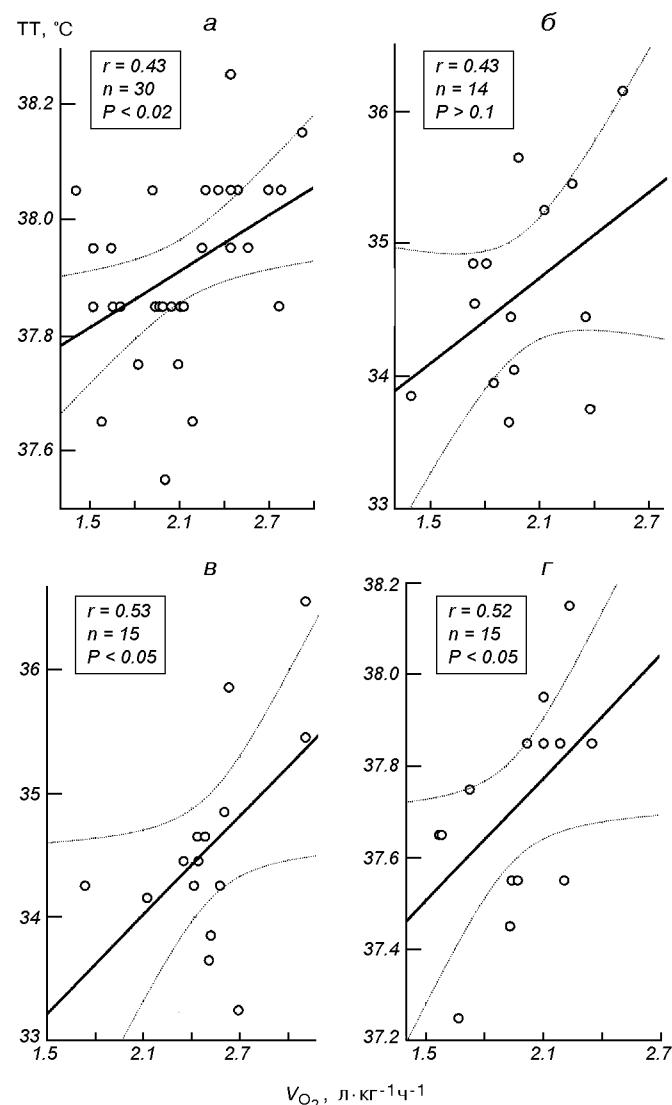


Рис. 1. Линейная регрессионная зависимость между температурой тела ТТ и скоростью потребления кислорода V_{O_2} в группе контрольных крыс (а), через 1–2 ч (б) и 4 ч (в) центрифугирования и 3 ч восстановительного периода (г)

ву противоположна динамике температуры тела. Так, если при гипергравитационном стрессе температура сначала снижается, а потом возвращается к норме, то константа теплопроводности, напротив, сначала увеличивается, а потом уменьшается к исходным величинам (рис. 2).

Быстрое восстановление температуры тела, очевидно, объясняется усилением термогенеза, при котором изменяется соотношение между окислением углеводов и жирных кислот в сторону повышения доли последних. Поэтому при гипергравитации

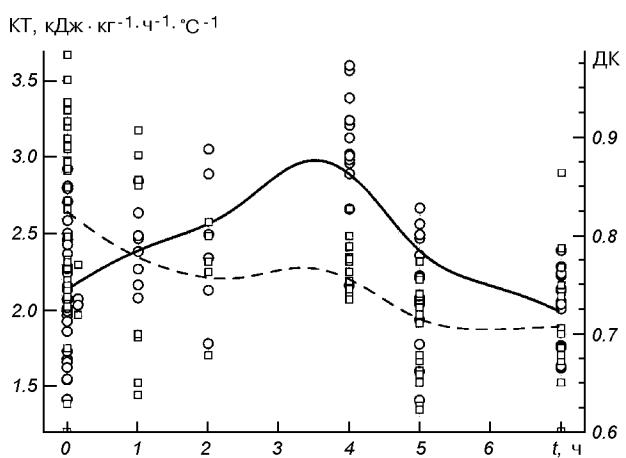


Рис. 2. Динамика константы теплопроводности КТ (кружки и сплошная линия) и дыхательного коэффициента ДК (квадратики и штрихи) в разные сроки гипергравитационного стресса (1—4 ч) и восстановительного периода (5—7 ч)

онном стрессе следовало ожидать снижение дыхательного коэффициента ДК. Предположение о влиянии гипергравитации на ДК подтверждается как его динамикой, так и результатами дисперсионного анализа ($P < 0.0001$). Из приведенного на рис. 2 графика следует, что дыхательный коэффициент прогрессивно снижается в течение всего исследуемого срока, и к 7 ч достигает величин, которые статистически значимо ниже нормы и характерны для окисления жиров и/или накопления продуктов неполного окисления (рис. 2).

Казалось, такие изменения окислительных процессов должны были отразиться на антиоксидантной

ситуации и активности ключевых ферментов гашения свободных радикалов кислорода. Действительно, представленные на рис. 3 данные свидетельствуют, что под влиянием даже короткого периода мягкой гипергравитации ($2g$, 1 ч) происходят заметные изменения активностей СОД, каталазы, ГП и ГР как в печени, так и миокарде крыс. Однако из-за разброса данных и, вероятно, сравнительно небольших групп исследованных животных ни в одном из исследованных случаев отличия между контрольными и подопытными группами не были статистически достоверными (рис. 3).

Определенный интерес представляло изучение взаимосвязей между температурой тела, константой теплопроводности и дыхательным коэффициентом на разных этапах гипергравитационного стресса с помощью трехмерного нелинейного плоттинга. Как следует из рис. 4, а, в группе контрольных крыс зависимость температуры тела ТТ от дыхательного коэффициента ДК и константы теплопроводности КТ описывается вогнутой поверхностью, основание которой примерно совпадает с диагональю горизонтальной плоскости, т. е. температура тела одновременно зависит от обоих указанных переменных. Через 4 ч гипергравитационного стресса аналогичная зависимость (рис. 4, б) принимает форму выпуклой поверхности, которая имеет максимум при значениях $\text{ДК} \approx 0.75$, что соответствует преимущественному окислению жирных кислот. По всей видимости, при гипергравитационном стрессе температура выше у особей, у которых раньше происходит включение термогенеза за счет преимущественного окисления жиров. Другой отличительной особенностью этой поверхности является то, что она параллельна оси КТ, т. е. к моменту

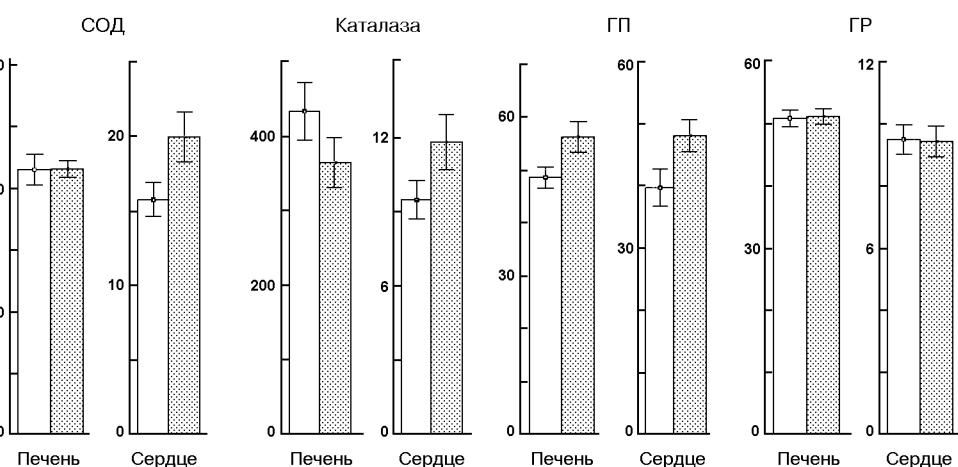


Рис. 3. Активность супероксиддисмутазы (СОД, ед. · мин⁻¹ · мг белка⁻¹), каталазы (мкмоль · мин⁻¹ · мг белка⁻¹), глутатион пероксидазы (ГП, нмоль · мин⁻¹ · мг белка⁻¹) и глутатион редуктазы (ГР, нмоль · мин⁻¹ · мг белка⁻¹) в печени и миокарде до (светлые столбики) и после (темные столбики) гипергравитационного стресса ($2g$, 1 ч)

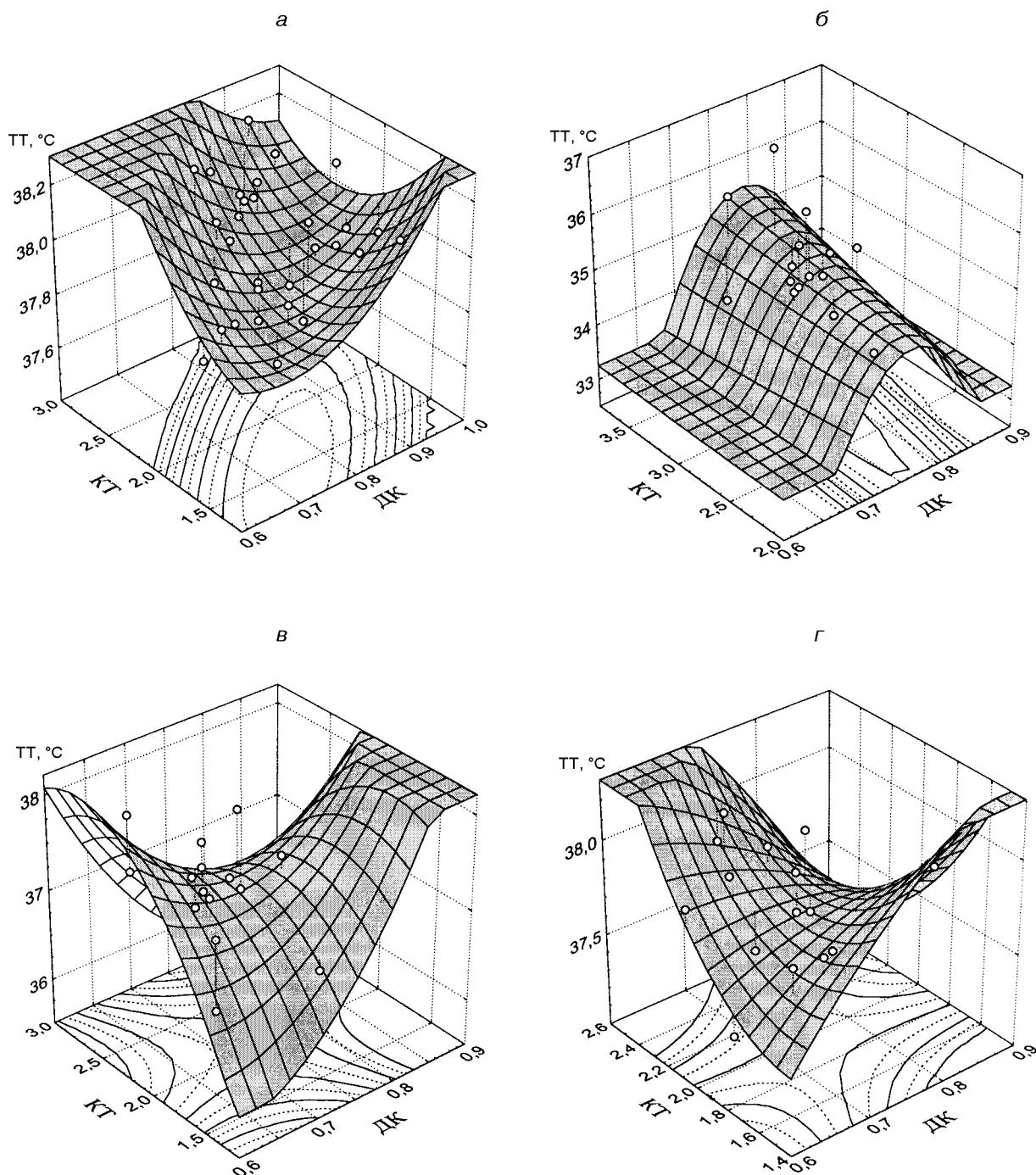


Рис. 4. Трехмерные нелинейные зависимости температуры тела ТТ ($^{\circ}\text{C}$) от константы теплопроводности КТ ($\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}$) и дыхательного коэффициента ДК в группе контрольных крыс (*а*), через 1—2 ч (*б*) и 4 ч (*в*) центрифугирования и 3 ч восстановительного периода (*г*)

завершения центрифугирования температура практически не зависит от изменений теплопроводности (рис. 4, *б*). После переходной формы к первому часу восстановительного периода

(рис. 4, *в*) к третьему часу восстановления поверхность начинает приобретать вогнутые очертания (рис. 4, *г*), характерные для контрольных животных (рис. 4, *а*).

Таким образом, мягкий гипергравитационный стресс различной продолжительности, моделированный центрифугированием при $2g$, индуцировал существенные изменения температуры тела, дыхательного коэффициента и константы теплопроводности, но не активностей СОД, каталазы, ГП и ГР в печени и миокарде взрослых крыс. При этом динамика изменений температуры тела характеризовалась фазой снижения до 2–4 ч центрифугирования и восстановления в течение 3 ч пост-стрессового периода. Изменения константы теплопроводности укладывались в те же временные интервалы с той лишь принципиальной разницей, что динамика константы теплопроводности отличалась противоположной направленностью — повышение с последующим восстановлением исходного уровня. При этом дыхательный коэффициент прогрессивно снижался в течение всего исследуемого периода, достигая уровня, который характерен для окисления жирных кислот и/или накопления продуктов неполного окисления. То, что дыхательный коэффициент, в отличие от температуры тела и константы теплопроводности, не возвращается к исходному уровню к концу исследуемого срока, может свидетельствовать о том, что к 7 ч не все функциональные системы подопытных животных успевают восстанавливаться от гипергравитационного стресса. Вероятно, об этом свидетельствуют и данные трехмерного плоттинга, согласно которым к концу исследуемого срока поверхность отклика лишь начинает приобретать очертания, характерные для контрольной группы.

1. Тимченко А. Н., Мозжухина Т. Г., Мурадян Х. К. Влияние гипергравитационного стресса на выживаемость, газообмен, терморегуляцию и синтез РНК и белка у мышей разного возраста // Пробл. стар. долголет. — 1996. — 6, № 2. — С. 145–150.
2. Aeby H. Catalase *in vitro* // Meth. Enzymol. — 1984. — 105. — P. 121–126.
3. Balmagia T., Rosovsky S. J. Age-related changes in thermoregulation in male albino rats // Exp. Gerontol. — 1983. — 18, N 4. — P. 199–210.
4. Frolkis V. V., Muradian Kh. K. Life span prolongation. — Boca Raton: CRC Press, 1991. — 421 p.
5. Fuller P. M., Jones T. A., Jones S. M., Fuller C. A. Neurovestibular modulation of circadian and homeostatic regulation: vestibohypothalamic connection? // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. — 2002. — 99, N 24. — P. 15723–15728.
6. Fuller P. M., Warden C. H., Barry S. J., Fuller C. A. Effects of 2-G exposure on temperature regulation, circadian rhythms, and adiposity in UCP2/3 transgenic mice // J. Appl. Physiol. — 2000. — 89, N 4. — P. 1491–1498.
7. Godin D. V., Garnett M. E. Effects of various anesthetic regimens on tissue antioxidant enzyme activities // Res. Commun. Chem. Pathol. Pharmacol. — 1994. — 83, N 1. — P. 93–101.

8. Iwasaki K. I., Sasak I., Hirayangi K., Yajima K. Usefulness of daily +2Gz load as a countermeasure against physiological problems during weightlessness // Acta Astronaut. — 2001. — 49, N 3–10. — P. 227–235.
9. Kumei Y., Shimokawa R., Kimoto M., et al. Gravity stress elevates the nociceptive threshold level with immunohistochemical changes in the rat brain // Acta Astronaut. — 2001. — 49, N 3–10. — P. 381–390.
10. Lackner J. R., DiZio P. Artificial gravity as a countermeasure in long-duration space flight // J. Neurosci. Res. — 2000. — 62. — P. 169–176.
11. Lowry O. H., Rosenbrough N. H., Farr A. L., Randall J. R. Protein measurement with the Folin phenol reagent // J. Biol. Chem. — 1951. — 193. — P. 265–275.
12. McCord J. M., Fridovich I. J. M. Superoxide dismutase. An enzymic function for erythrocuprein (hemocuprein) // 1969. — 24, N 22. — P. 6049–6055.
13. Monson C. B., Horowitz J. M., Horowitz B. A. Core temperature is regulated, although at a lower temperature, in rats exposed to hypergravitic fields // J. Therm. Biol. — 1988. — 13, N 3. — P. 93–101.
14. Paglia D. E., Valentine W. N. Studies on the quantitative and qualitative characterization of erythrocyte glutathione peroxidase // J. Clin. Med. — 1967. — 70. — P. 158–169.
15. Roos D., Weening R. S., Voetman A. A., et al. Protection of phagocytic leukocytes by endogenous glutathione: studies in a family with glutathione reductase deficiency // Blood. — 1979. — 53. — P. 851–866.
16. Stein T. F. Space flight and oxidative stress // Nutrition. — 2002. — 18, N 10. — P. 867–871.
17. Wade C. E., Moran M. M., Oyama J. Resting energy expenditure of rats acclimated to hypergravity // Aviat. Space Environ. Med. — 2002. — 73, N 9. — P. 859–864.
18. Young L. R. Artificial gravity consideration for a Mars exploration mission // Annals N. Y. Acad. Sci. — 1999. — 871. — P. 367–378.

THERMOREGULATION, RESPIRATION QUOTIENT AND KEY ANTIOXIDANT ENZYME ACTIVITIES IN THE LIVER AND HEART OF RATS UNDER HYPERGRAVITY STRESS

Kh. K. Muradian, A. N. Timchenko, N. A. Utko,
T. A. Badova, V. V. Bezrukov

Effects of mild hypergravity stress ($2g$) on respiration quotient, body temperature and coefficient of thermoconductivity, as well as activities of superoxide dismutase, catalase, glutathione peroxidase, and glutathione reductase in the liver and heart of male Wistar rats are studied. Hypergravity stress, modelled by centrifugation, induced a significant decline of body temperature which reached the minimal level at 2–4 h and almost returned to the normal values within 3 h of the post-hypergravity recovery period. Thermoconductivity exhibited almost opposite dynamics, namely, increase followed by normalization. Results of linear regression and correlation analyses demonstrated positive correlation between body temperature and V_{O_2} during the both phases of body temperature decrease and recovery. Respiration quotient declined progressively within the whole investigated period, which can be a result of enhancing thermogenesis due to preferential oxidation of fatty acids. The data of 3D non-linear plotting indicated that body temperature could be higher in the individuals which manage quicker switching on fatty acid oxidation during the centrifugation.

К 70-летию со дня рождения
члена-корреспондента НАН Украины
Владимира Иосифовича Драновского



Владимир Иосифович Драновский родился 10 января 1934 г. в г. Днепропетровске в семье рабочего. Сразу после рождения семья переехала в г. Запорожье, где он в 1952 г. с золотой медалью окончил среднюю школу и поступил в Днепропетровский горный институт. С января 1953 г. был переведен в недавно созданный физико-технический факультет Днепропетровского государственного университета.

После окончания с отличием этого высшего учебного заведения работал в нем на кафедре теории механизмов и машин, а потом на одной из специальных кафедр ассистентом. Здесь он сделал свои первые шаги в науке, выполнив цикл экспериментальных исследований многомассовой расчетной модели ракеты с жидкостным наполнением, занимался изучением характеристик разнообразных пар трения.

В 1961 г. перешел на работу в Государственное конструкторское бюро «Южное» в г. Днепропетровске, где последовательно занимал должности инженера, старшего инженера, начальника лаборатории, отдела, отделения, заместителя главного конструктора конструкторского бюро. С 1989 г. — он

главный конструктор и начальник КБ космических аппаратов и систем.

Работы В. И. Драновского в основном связаны с разработкой и созданием космических летательных аппаратов и космических систем. Они охватывают широкий комплекс вопросов проектирования, экспериментальной отработки, натурных испытаний и эксплуатации средств космической техники.

В числе его работ — основополагающие теоретические положения и прикладные методы исследований, которые легли в основу создания ряда систем применительно к нескольким поколениям космических аппаратов, в том числе серий «Космос», «Интеркосмос», «Океан», АУОС, «Січ», «Микроспутник».

Им предложен новый, оригинальный способ гашения начальных угловых скоростей спутника после отделения от ракеты-носителя, основанный на взаимодействии подвижного магнита, установленного на корпусе спутника, с магнитным полем Земли и рассеянии энергии вращательного движения спутника за счет момента сил трения в опорах подвески магнита. Разработанная теория таких систем позволила создать для спутников «Космос-426» и «Интеркосмос-5», на которых были успешно решены фундаментальные научные задачи, простейшую, не имеющую аналогов магнитную систему успокоения.

Результаты этих работ легли в основу кандидатской диссертации, которую он успешно защитил в 1969 г.

Свойственный В. И. Драновскому поиск неординарных научных решений в целом ряде случаев привел к созданию оригинальных систем, определивших облик конструктивно-компоновочной схемы спутников и способ ориентации их в пространстве. К числу таких работ следует отнести его работы по теории аэрогироскопических систем ориентации, положенные в основу проектирования спутника «Космическая стрела». Разработка аэрогироскопической системы ориентации проведена впервые в мировой практике и явила новым

этапом в технике управляемого движения космических аппаратов.

Владимир Иосифович Драновский внес большой вклад в разработку полупассивных магнитно-гравитационных и полуактивных гравитационно-гироскопических систем ориентации. Под его научно-техническим руководством был выбран тип систем, разработаны динамические схемы и методы исследования динамики космических аппаратов, а также проведены исследования на различных стадиях проектирования с учетом оригинальных конструктивно-компоновочных схем аппаратов, в частности совмещающих гравитационную ориентацию аппарата на Землю и активную ориентацию на Солнце подвижной относительно корпуса аппарата солнечной батареи. Известны и получили широкое распространение в практике создания спутников с пассивными и полупассивными системами ориентации его работы по измерению и компенсации магнитных возмущений, возникающих за счет взаимодействия дипольного момента спутника и его магнитномягких составляющих с магнитным полем Земли. Работы в этой области доведены до практически реализованных методов, способов и устройств, отраженных в государственных стандартах.

В 1970 г. за большой вклад в эту область науки и техники он в составе авторского коллектива был удостоен Государственной премии СССР.

Одновременно, начиная с середины 1960-х гг., работает в области создания активных систем ориентации летательных аппаратов. При его непосредственном участии выполнены исследования, проектирование, экспериментальная отработка и обеспечены натурные испытания систем ориентации с использованием в качестве исполнительных органов различных типов гиростабилизаторов.

Под его руководством разработан ряд систем индикации положения космических аппаратов средней точности, а также прецизионная астротелевизионная система определения углового положения спутника. При этом определены целесообразные схемы, алгоритмы определения ориентации, выбраны критерии и разработаны методы оценки основных характеристик систем на всех этапах их создания.

Астротелевизионная система прецизионной индикации параметров углового движения космического аппарата занимает особое место в ряду научно-технических достижений космической техники. Ее создание явилось следствием развития нового направления в практике проектирования космических аппаратов — отказа от необходимости для широкого класса задач высокоточной стабилизации и обоснование возможности перехода к грубой стабилизации с использованием прецизионных систем индикации. Это направление позволило суще-

ственную улучшить тактико-технические характеристики созданных и создаваемых ГКБ «Южное» космических аппаратов. Рациональная комбинация таких систем позволила создать энергетически выгодные, удобные в эксплуатации высоконадежные спутники, с помощью которых было решено в течение второй половины 1970-х гг. вплоть до настоящего времени большое количество задач в рамках программ Академии наук СССР и НАН Украины по использованию космического пространства с околоземных орбит.

Результаты работ в этом направлении были положены в основу докторской диссертации, которую он блестяще защитил в 1992 г.

В. И. Драновский явился инициатором и возглавил новое направление: разработку и создание микроспутников. Развитие этого направления потребовало решения целого ряда проблем механики, материаловедения, микроминиатюризации, проблем, возникших в связи с созданием аппарата в негерметичном исполнении, в частности обусловленных воздействием температурных и радиационных факторов, наличием собственной атмосферы и др. Он обеспечил создание отечественной кооперации в рамках Национальной академии наук, отраслевых НИИ и промышленных организаций, которая позволяет решить весь комплекс вопросов, связанных с проектированием, отработкой и созданием летных образцов микроспутников. В настоящее время в ходе разработки микроспутников под руководством В. И. Драновского закладывается технологическая основа создания новых платформ малого и среднего класса. Внедрение этого направления позволяет получить существенный экономический выигрыш при одновременном резком увеличении срока активного существования аппаратов.

В последние годы под его руководством разработан ряд новых унифицированных бортовых систем служебного комплекса для широкого класса компоновочных схем космических аппаратов. Многие идеи и решения, предложенные им, были положены в основу создания в Украине наземного комплекса управления, центра управления полетом и реализованы в кратчайшие сроки. В частности, за два года была создана и введена в эксплуатацию полная наземная инфраструктура управления в полете первым Украинским спутником «Січ-1» с эксплуатационными характеристиками современного мирового уровня.

В 1999 г. за огромный вклад в эту область деятельности он вместе с другими коллегами был удостоен Государственной премии Украины.

Приоритет многих перечисленных выше решений подтвержден авторскими свидетельствами на изобретения и патентом.

Комплексность подхода к проблемам разработки космических аппаратов, умение выделить важнейшие направления исследований позволяют В. И. Драновскому концентрированно и оптимально организовать взаимодействие с научными организациями ранее Академии наук СССР и в настоящее время НАН Украины, правильно поставить задачу исследований и довести результаты совместных работ до их внедрения в реальные разработки. Примерами такого творческого сотрудничества является многолетняя практика его взаимодействия с Институтом технической механики НАН Украины, Институтом механики НАН Украины, Институтом прикладной математики и механики НАН Украины. Уже на ранних стадиях деятельности проявились его незаурядные качества нахождения путей универсализации технических решений, обеспечивающих конверсионность использования разработок, проводимых в интересах обороны, для народно-хозяйственных задач. Исходя из принципа двойного назначения, были проведены работы и создан класс космических аппаратов серии «Океан», сданных в эксплуатацию. Он был техническим руководителем подготовки и запуска многих спутников.

В. И. Драновский ведет большую научно-организационную работу. Известна его деятельность по реализации ряда международных проектов на космических аппаратах серии «Интеркосмос», где прежде всего проявился его талант крупного организатора и руководителя работ. В ходе более чем 25 лет взаимодействия с научными организациями бывших социалистических стран восточной Европы, Швеции, Франции — непосредственными разработчиками комплексов научной аппаратуры — по существу была создана школа международного сотрудничества в деле освоения космического пространства, отработаны механизмы совместной работы на всех этапах разработки, экспериментальной отработки и орбитального полета спутников серии «Интеркосмос» и по проектам «Аркад». Он внес огромный вклад в создание нового класса высокоточных платформ, на основе которых реализованы научные проекты по программам «Коронас-И» и «Коронас-Ф».

В период 1976-1986 гг. как руководитель смешанной советско-индийской группы на основе межгосударственного соглашения В. И. Драновский принимал непосредственное участие в совместных работах с Индийской организацией космических исследований (ISRO) по созданию и запускам индийских спутников «Ариабата» и «Бхаскара». Его деятельность в этих работах получила международную известность.

В. И. Драновский является членом ряда межведомственных структур по отдельным направлениям

научного и народно-хозяйственного использования космических средств. Входит в состав секции «Дистанционное зондирование Земли из космоса» Совета РАН по космосу и НТС Росавиакосмоса. Он — член Совета по космическим исследованиям НАН Украины, член редколлегии журнала «Космическая наука и технология». По поручению Правительства Украины работал в составе экспертной группы государств — членов СНГ по подготовке межгосударственных соглашений по использованию космического пространства, в том числе подписанных на совещании глав государств и правительств в Ташкенте 15 мая 1992 г. Проявил личную активность в подготовке и подписании соглашения между Российской академией наук и Академией наук Украины о совместной программе фундаментальных космических исследований с использованием автоматических космических аппаратов.

В. И. Драновский представлял Украину в работе 11 сессии Научно-технического подкомитета Комитета ООН по мирному использованию космического пространства в Нью-Йорке, где выступил с докладами и рядом инициатив по международным космическим программам. Одной из них, принятой Комитетом ООН как предложение Украины, является программа создания космической системы краткосрочного прогноза землетрясений. Его деятельность в этом органе получила положительную оценку МИД Украины.

Неоднократно выступал с научными докладами на конференциях, семинарах. Участвовал в работе многих конгрессов международной астронавтической федерации. По предложению английских деловых кругов, как известный специалист по космическим системам дистанционного зондирования, участвовал в работе симпозиума «Миссия к планете Земля — 2000 г.» в Лондоне, где популяризировал достижения украинских промышленных и научных организаций по созданию спутников серии «Океан-О» нового поколения.

Ведет активную и плодотворную работу по расширению сферы внедрения научно-технических разработок ГКБ «Южное» в области создания космических аппаратов на международном рынке услуг. Как следствие этого выигран международный тендер и начаты с 2002 г. работы по созданию спутника для государства Египет.

Более 200 научных трудов и 3 монографии являются свидетельством неиссякаемой творческой активности В. И. Драновского, его умения определять наиболее перспективные пути разработки космических аппаратов и систем.

Большое внимание уделяет подготовке научных и технических кадров. В течение многих лет он читает лекции студентам Днепропетровского госу-

ниверситета, Харківського авіаційного інститута і на курсах підвищення кваліфікації ІТР. Ему присвоєно учене звання професора. Неоднократно був председателем ГЭК ДГУ. Семь його учеников успішно захистили кандидатські дисертації, а один — докторську дисертацію в області створення косміческих апаратів, ряд других успішно працюють над підготовкою докторських і кандидатських дисертацій.

Знаком призначення заслуг і високого авторитета в наукових кругах стало звання В. І. Драновсько-

го в 2003 р. членом-корреспондентом НАН України по отделенню механіки.

Заслуги В. І. Драновського в розвитку науки і нової техніки отмечено не тільки преміями і присудженням ученых степеней і звань. Награждений орденом «Знак почета». Ему присвоєні звання «Заслужений деятель науки и техники України» і «Заслуженный машиностроитель України».

*Генеральний конструктор ГКБ «Южное»
академик С. Н. Конюхов*

**Академіку НАН України
Володимиру Павловичу Горбуліну
виповнилось 65 років**



17 січня 2004 р. виповнилось 65 років першому Генеральному директору Національного космічного агентства, академіку НАН України Володимиру Павловичу Горбуліну.

Володимир Павлович Горбулін — видатний вчений у галузі ракетної і космічної техніки. Зробив великий внесок в розвиток методів теорії технічної надійності, проектних методів оцінки та ймовір-

нісного прогнозування основних характеристик і параметрів складних систем та їхнього упровадження в розв'язок проектно-конструкторських задач при створенні бойових ракетних комплексів стратегічного призначення, космічних апаратів і систем. Створив методологію та інформаційні технології для оцінки національної безпеки держави в економічній, військовій і військово-технічній сферах. З використанням створеної ним методологічної бази вирішено низку великих проблемних різнопланових задач, які мають практичне значення для розвитку держави.

В. П. Горбулін народився 17 січня 1939 р. у м. Запоріжжя. По закінченні 1962 р. фізико-технічного факультету Дніпропетровського державного університету за фахом інженер-механік працював (до 1976 р.) в КБ «Південне» науковим співробітником, брав участь у створенні космічних апаратів серії «Космос» та в розробках стратегічних ракетних систем. В 1977—1990 рр. працював у апараті ЦК КПУ (з 1980 по 1990 рр. — завідувач сектору ракетно-космічної і авіаційної техніки). З грудня 1990 р. — завідувач підвідділу оборонного комплексу Кабінету Міністрів України. Організатор і перший генеральний директор Національного космічного агентства України (з березня 1992 р.), керував розробкою національної космічної програми України. В 1994—1999 рр. — секретар Ради безпеки України при президентові України, з березня 1996 р. — заступник голови Ради з питань науки і науково-технічної політики, з липня

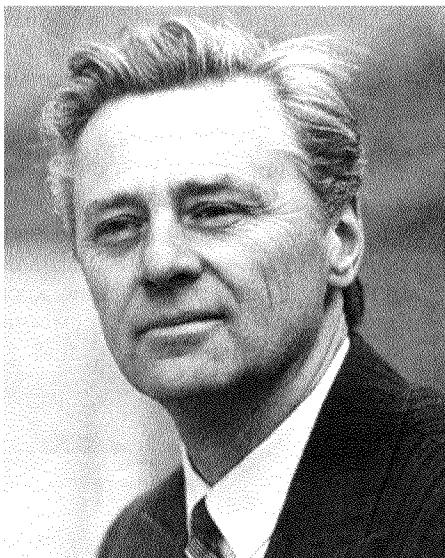
1996 р. — член Вищої економічної Ради при президентові України, з 1999 р. — радник президента України з питань національної безпеки, а також, з 2000 р., — голова Державної комісії з питань оборонно-промислового комплексу України.

В. П. Горбулін — член Комісії з державних нагород та член Комітету з Державних премій в галузі науки і техніки. Нині обіймає посаду голови Національного центру з питань євроатлантичної інтеграції.

В. П. Горбулін — доктор технічних наук, професор, академік Національної академії наук України.

раїни, заслужений машинобудівник України (з 1994 р.). Лауреат Державної премії СРСР (1990 р.), премії імені академіка М. К. Янгеля (1988 р.). Двічі (в 1976 і 1982 рр.) нагороджувався орденом Трудового Червоного Прапора, нагороджений також орденом князя Ярослава Мудрого V ступеня (1997 р.) та IV ступеня (2004 р.), медаллю Міжнародної академії астронавтики (1993 р.). Президент Федерації баскетболу України. Був головою наглядової ради Фонду ділового співробітництва «Україна» (з листопада 1994 р.).

Академіку НАН України
Всеволоду Михайловичу Кунцевичу
75 років



15 березня 2004 року виповнюється 75 років від дня народження Всеволода Михайловича Кунцевича, відомого вченого у галузі теорії та практики систем управління, організатора науки, Заслуженого діяча науки і техніки України, академіка НАН України, директора Інституту космічних досліджень НАН та НКА України.

В 1952 р. В. М. Кунцевич закінчив Київський політехнічний інститут. З 1955 р. почав працювати в установах АН України. Спочатку — інженером Інституту гірничої справи АН УРСР, з 1957 р. став

асpirантом Інституту електротехніки АН УРСР, де після захисту кандидатської дисертації працював молодшим, далі старшим науковим співробітником лабораторії автоматичного управління виробничих процесів. В ці роки В. М. Кунцевич провадив дослідження, присвячені теорії та застосуванню екстремальних систем, що тільки зароджувались як новий напрямок у загальній теорії управління.

У 1963 р. В. М. Кунцевич перейшов до Інституту кібернетики АН УРСР, де захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, і з 1966 р. став завідувачем відділу дискретних систем управління. Наукові дослідження цього періоду присвячені розробці основ теорії спеціального класу нелінійних систем управління з частково-імпульсною модуляцією. Отримані результати увійшли у монографію, що була першою роботою у цьому напрямку, як у колишньому СРСР, так і за його кордонами.

Наукові праці В. М. Кунцевича 1973—1978 рр. присвячені проблемі синтезу систем управління за допомогою апарату функцій Ляпунова. Досліджено та розв'язано задачу синтезу оптимальних систем управління широкого класу нелінійних об'єктів.

У період з 1979 р. В. М. Кунцевичем та його учнями був розвинутий новий підхід до побудови адаптивних систем управління, який базується на методах розв'язування задач параметричної ідентифікації, що дають гарантовані оцінки, а також на нових алгоритмах розв'язування задач оптимального управління в умовах невизначеності.

З 1986 р. роботи В. М. Кунцевича присвячені сучасній проблемі теорії управління — робастності, отримано ряд істотних результатів у галузі робастності стійкості.

В. М. Кунцевич був керівником ряду розробок автоматичних систем управління, запроваджених в авіаційній промисловості, а також АСУ ТП в нафтопереробній галузі.

В 1988 р. В. М. Кунцевича обрано членом-кореспондентом АН України, а у 1992 р. — академіком НАН України. Зараз В. М. Кунцевич є заступником академіка-секретаря Відділення інформатики НАН України.

У 1995 р. В. М. Кунцевич став заступником директора Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, а в травні 1996 року очолив Інститут космічних досліджень НАН та НКА України. На посаді директора В. М. Кунцевич спрямував свою діяльність на становлення інституту як провідного закладу космічної науки в Україні, на розвиток фундаментальних та прикладних наукових досліджень та їхню координацію з головними напрямками Загальнодержавної (Національної) космічної програми України. Зокрема, багато уваги приділяє В. М. Кунцевич формуванню програми спільних російсько-українських наукових і технологічних експериментів на борту російського сегменту Міжнародної космічної станції.

В. М. Кунцевич — автор понад 200 наукових робіт, серед яких 7 монографій. В. М. Кунцевич — ініціатор і керівник міжнародних конференцій з автоматичного управління і з перспективних космічних досліджень. В Україні ним створена наукова школа у галузі дискретних систем управління, підготовлено понад 30 кандидатів наук, 9 докторів наук. Понад 25 років Всеволод Михайлович читав

курс лекцій з теорії управління в Київському політехнічному інституті.

У складі авторського колективу першої в світі «Енциклопедії кібернетики» В. М. Кунцевич у 1979 р. отримав Державну премію УРСР у галузі науки і техніки. У 1991 р. за роботи з теорії інваріантності та її застосувань разом з іншими вченими він був удостоєний звання Лауреата Державної премії України. У 1987 р. за цикл робіт з теорії цифрових систем управління Всеволод Михайлович був відзначений премією імені С. А. Лебедєва Президії АН України, а в 1995 р. — за розробку і застосування методів системного аналізу — премією імені В. М. Глушкова. Досягнення Всеволода Михайловича на науковій ниві відзначені також урядовими нагородами — орденом «Знак Пошани» та медалями «За трудову відзнаку» і «За доблесний труд».

У 1988 р. В. М. Кунцевич став головним редактором журналу «Автоматика» (з 1994 р. — «Проблеми управління та інформатика»).

Всеволод Михайлович тривалий час був членом Національного Комітету колишнього СРСР з автоматичного управління, а у 1992 р. обраний Головою Національного комітету Української асоціації з автоматичного управління — Національної організації Міжнародної Федерації автоматичного управління (IFAC).

Всеволод Михайлович Кунцевич очолює секцію «Системний аналіз і перспективні космічні дослідження» Ради з космічних досліджень при Президії НАН України, є членом НТС Національного космічного агентства України. Здійснює координаційну діяльність з ряду напрямків космічних досліджень в Україні у кооперації з Росією та іншими країнами.