

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

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

КИЇВ

Том 11, № 5/6, 2005

KYIV

ЗМІСТ

Указ Президента України

Грицай А. В., Євтушевський О. М., Міліневський Г. П., Грицай З. І., Агапітов О. В. Довготний розподіл загального вмісту озону в атмосфері у крайовій області антарктичного стратосферного вихору

Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь

Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Вейвлет-анализ в задачах физики геокосмоса

Kotsarenko A., Molchanov O., R. Perez Enriquez, Lopez Cruz-Abeyro J. A., Kosheva S., Grimalsky V. Possible seismogenic origin of changes in the ULF EM resonant structure observed at the Teoloyucan geomagnetic station, Mexico, 1999—2001

CONTENTS

4 Decree of the President of Ukraine

5 *Grytsai A. V., Evtushevsky A. M., Milinevsky G. P., Grytsai Z. I., Agapitov A. V.* Longitudinal distribution of total ozone content in edge region of Antarctic stratospheric vortex

12 *Gokov A. M., Chernogor L. F.* Electron density variations in the ionospheric D region at mid-latitudes during magnetic storms

22 *Lazorenko O. V., Lazorenko S. V., Chernogor L. F.* Wavelet analysis in problems of the near-to-Earth space

30 *Коцаренко А., Молчанов О., Р. Перес Енрикес, Лопес Крус-Абейро Х. А., Кошова С., Гримальський В.* Імовірна сейсмогенічна природа змін в ультранизькочастотній електромагнітній резонансній структурі, спостереженій НА Теолоюканській геомагнітній станції в Мексиці протягом 1999—2001 рр.

- Grimalsky V., Koshevaya S., Kotsarenko A., Malnev V., Juarez D.* Passage of the acoustic waves caused by seismic and volcano activity through the lithosphere into the ionosphere 35
- Гримальський В., Кошова С., Коцаренко А., Мальнев В., Хуарес Д.* Проходження акустичних хвиль через літосферу в іоносферу, викликаних сейсмічною й вулканічною активністю
- Лялько В. І., Костюченко Ю. В., Ющенко М. В., Білоус Ю. Г.* Використання систем супутникового спостереження Землі для моніторингу природних катастроф: аналіз наслідків цунами у Південно-Східній Азії 42
- Lyalko V. I., Kostyuchenko Yu. V., Yuschenko M. V., Bilous Yu. H.* Satellite Earth observation systems application for the natural catastrophes monitoring: An analysis of the southern-east tsunami impact
- Волошин В. И., Шапарь А. Г., Переметчик Н. Н.* Исследование опасных экзогенных процессов на территории города Днепропетровска с использованием спутниковых снимков 51
- Voloshin V. I., Shapar A. G., Peremetchik N. N.* Study of dangerous exogenous processes located on Dnepropetrovsk city territory using satellite images
- Литвин М. О.* Порівняння результатів обробки даних української перманентної GPS-мережі програмним комплексом GAMIT/GLOBK з результатами Локального центру аналізу GPS-даних ГАО НАН України 56
- Lytvyn M. O.* Comparison between results of Ukrainian permanent GPS-network data processing with GAMIT/GLOBK and MAO GPS Local Analysis Centre results
- Гаврилов Р. В.* Наземные и орбитальные исследования материалов, процессов и конструкций ракетно-космической техники. Создание наземной имитационной базы 64
- Gavrylov R. V.* Ground-based and aboard investigations of materials, processes, and designs of the rocket-space engineering. Creation of onground ground-based simulation equipment
- Шувалов В. А., Тихий В. Г., Приймак А. И., Гусарова И. А., Письменный Н. И., Токмак Н. А., Резниченко Н. П., Носиков С. В., Кочубей Г. С.* Деградация полимерных материалов обшивок солнечных батарей КА при длительном воздействии потоков атомарного кислорода 78
- Shuvalov V. A., Tihiy V. G., Priymak A. I., Gusarova I. A., Pismenny N. I., Tokmak N. A., Reznichenko N. P., Nosikov S. V., Kochubey G. S.* Degradation of polymeric materials for covering spacecraft solar arrays under exposure to atomic oxygen flows
- Боровик В. Г.* Модульный узел трения «диск — индентор» для триботехнических исследований в космическом пространстве 87
- Borovyk V. G.* Friction module of pin on disk type for tribotechnical investigations in space
- Батуркин В. М.* Терморегулирование микроспутников — современные тенденции 92
- Baturkin V. M.* Modern tendencies in thermocontrol of microsattelites
- Ван Сяоянь, Похил Ю. А., Коваль К. В., Хе Ши Юй, Гаврилов Р. В.* Расчет напряженно-деформированного состояния панели солнечной батареи космического аппарата при термическом нагружении 103
- Xiaoyan Wang, Pokhyl Yu. A., Koval' K. V., He Shiyu, Gavrylov R. V.* Calculations for stress-strained state of a panel of a solar array under thermal loading conditions
- Коломзаров Ю. В., Кравченко С. Л., Маслов В. П., Забудський В. В.* Тепловізійний неруйнівний метод дослідження прозорих тонкоплівкових нагрівачів 111
- Kolomzarov Y. V., Kravchenko S. L., Maslov V. P., Zabudsky V. V.* Thermal imaging non-destructive method for investigations of transparent thin film heaters
- Сарнацька В. В., Гладун Г. О., Падалко С. Ф.* Трансформація рослинних клітин за допомогою *Agrobacterium tumefaciens* в умовах кліностакування 115
- Sarnatska V. V., Hladun H. O., Padalko S. F.* Plant cell transformation with *Agrobacterium tumefaciens* under clinorotation
- Академіку НАН України Віктору Васильовичу Пилипенку 70 років 122
- 70th birthday of Academician V. V. Pylypenko
- НАШІ АВТОРИ 124
- OUR AUTHORS

*15 листопада 2005 року виповнилось 70 років
видатному вченому в галузі механіки
та ракетно-космічної техніки,
одному із засновників та Почесному директору
Інституту технічної механіки НАН України і НКА України,
Заслуженому діячеві науки і техніки України,
голови Придніпровського наукового центру НАН України і МОН України,
академікові НАН України*

Віктору Васильовичу ПИЛИПЕНКУ

*Редакційна колегія журналу сердечно вітає
Віктора Васильовича з ювілеєм
і зичить йому міцного здоров'я та наснаги
для здійснення всіх його творчих задумів*

УДК 551.510.534

А. В. Грицай^{1,2}, О. М. Євтушевський¹, Г. П. Міліневський^{1,2},
З. І. Грицай¹, О. В. Агапітов¹

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

²Національний антарктичний науковий центр МОН України, Київ

Довготний розподіл загального вмісту озону в атмосфері у крайовій області антарктичного стратосферного вихору

Надійшла до редакції 08.04.05

Проаналізовано довготний розподіл загального вмісту озону (ЗВО) у крайовій області антарктичного стратосферного полярного вихору за даними вимірювань супутникового спектрометра TOMS (версія 8) у 1979—2004 рр. Розглядається п'ятимісячний часовий інтервал (серпень—грудень), що охоплює кінець антарктичної зими, весну та початок літа. З використанням щоденних даних TOMS для широт 65° S та 70° S отримано усереднені за 5 місяців зональні розподіли ЗВО. Домінуючою є хвиля із зональним хвильовим числом 1, яка і формує зональну асиметрію з існуванням розташованих у протилежних довготних секторах максимуму та мінімуму квазістаціонарної хвилі. Впродовж останніх 26 років відбувалося збільшення асиметрії, яка в останні роки досягла 70—90 одиниць Добсона, або близько 30 % відносно середнього зонального значення. Спостерігаються міжрічні варіації довготи максимуму ЗВО навколо стійкого положення близько 162° E і 172° E на широтах 65° S і 70° S відповідно. Довгота мінімуму, крім міжрічних варіацій, у 1979—2004 рр. зазнає систематичного зміщення на схід у довготному секторі між 45° W і 10° E. Спектральний аналіз показує, що ця тенденція зумовлена взаємодією квазістаціонарних складових із зональними хвильовими числами 1 та 2, які в останні десятиліття мають протилежний довготний дрейф фази максимальної амплітуди.

ВСТУП

Два основних прояви великомасштабних атмосферних збурень — біжучі та стоячі планетарні хвилі — широко досліджуються впродовж останніх десятиліть [2, 3, 7, 9, 12]. Біжучі планетарні хвилі (ПХ), поширюючись в атмосфері, реєструються у певному пункті спостережень як періодичні варіації атмосферних параметрів. Стоячі хвилі зумовлюють порівняно стійкий просторовий розподіл характеристик атмосфери з хвилеподібною структурою у горизонтальному та вертикальному напрямках. В реальній атмосфері вони спостерігаються як квазістаціонарні, тобто відхилення від стійкого просторового розподілу відбуваються у певних межах. Відомо, наприклад, що залежно від сезону квазістаціонарні хвилі температури та геопотенціалу у стратосфері можуть мати значні коливання амплі-

туди і фази або бути порівняно стійкими [2]. Спектральний склад ПХ також враховується при дослідженні викликаних ними збурень. Квазістаціонарним планетарним хвилям над Антарктикою властиве домінування низьких зональних хвильових чисел 1 і 2 з переважанням хвилі 1 та максимальна амплітуда у весняні місяці [10, 16].

Робота присвячена аналізу довготного розподілу загального вмісту озону (ЗВО) в атмосфері над Антарктичним регіоном. Використано супутникові вимірювання TOMS (версія 8) за 1979—2004 рр. Для широт 65° S і 70° S визначено характеристики квазістаціонарного довготного розподілу ЗВО для сезону серпень—грудень. Зроблено оцінки внеску планетарних хвиль із зональними хвильовими числами 1—5. Це крайова зона стратосферного полярного вихору (60—70° S, [8]), де хвильові збурення проявляються особливо контрастно (рис. 1) і

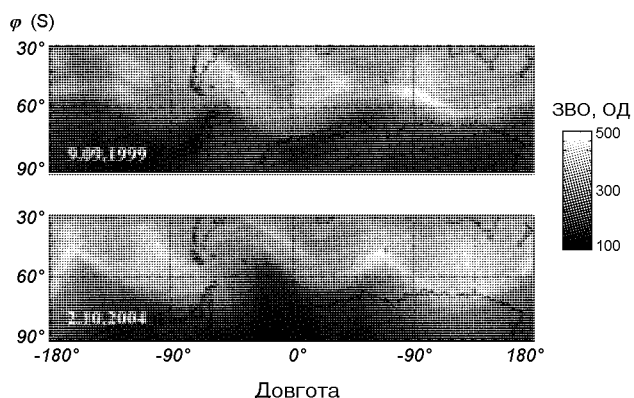


Рис. 1. Деформація озонної діри під дією планетарних хвиль. Фрагменти глобального розподілу ЗВО для широтного інтервалу 30—90° S за даними супутникового спектрометра EP/TOMS 9 вересня 1999 р. та 2 жовтня 2004 р.

квазістаціонарна складова хвиль тут має найбільшу амплітуду. Саме тут, у зоні найвищої хвильової активності у зимово-весняний період, розташована українська антарктична станція Академік Вернадський (65.15° S, 64.15° W).

В роботі розглянуто міжрічні варіації і довготри-валі тренди характеристик квазістаціонарного довготного розподілу ЗВО. Вони дозволяють оцінити рівень зональної асиметрії ЗВО, важливого і мало-дослідженого показника стану середньої атмосфери у період антарктичної весни.

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ

Для вивчення варіацій довготного розподілу ЗВО застосовано методику, викладену в роботі [5]. Щоденні дані розподілу ЗВО над поверхнею Землі за вимірюваннями супутникового спектрометра TOMS формуються з кроком по широті 1° і по довготі 1.25° [TOMS ozone data, <http://toms.gsfc.nasa.gov/ftpdata.html>, 2005]. Розроблено програмне забезпечення для візуалізації щоденних полів ЗВО у заданих інтервалах географічних координат (рис. 1), а також змін його довготного розподілу на заданій широті упродовж одного місяця, придатне для роботи з форматами даних NASA CDF, HDF та netCDF.

На рис. 2, *a—б* показані варіації довготного розподілу ЗВО для широтного кола 65° S упродовж серпня—грудня 1996 і 2003 рр. Часовий інтервал для аналізу вибрано з урахуванням тривалості існування озонної діри — це переважно вересень—листопад. Серпень і грудень додано для повнішого розгляду процесу наростання та зниження хвильової активності у цей сезон.

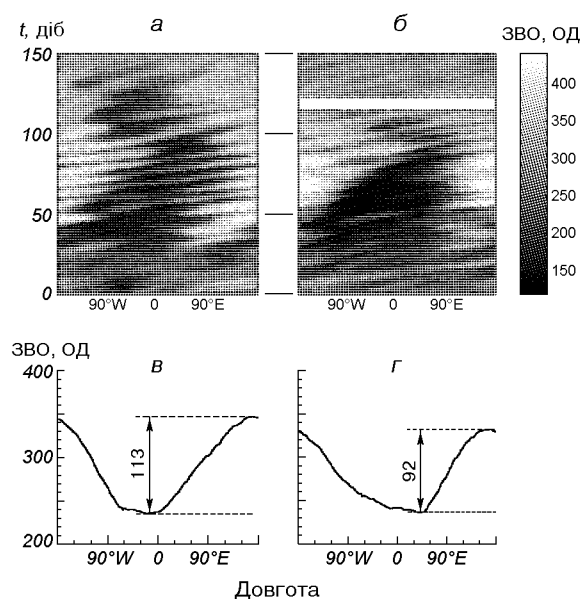


Рис. 2. Варіації щоденного довготного розподілу ЗВО на широті 65° S протягом серпня—грудня 1996 р. (*a*) та 2003 р. (*б*) та відповідні усереднені за п'ять місяців розподіли (*в*, *г*), які показують домінування квазістаціонарної хвилі із зональним хвильовим числом 1

Хоча хвильова активність у південній стратосфері висока і в зимовий період [4, 6], розширити аналіз на всі зимові місяці неможливо через відсутність озонних даних. Вимірювання ЗВО спектрометром TOMS на широтах 65° S і 70° S раніше серпня не виконуються через велику зенітну відстань Сонця в умовах полярної ночі.

Прояви квазістаціонарного довготного розподілу на рис. 2, *a—б* видно в стійкості низьких значень ЗВО в секторі навколо нульової довготи та високих — у протилежному довготному секторі ~180° E. Усереднений за 5 місяців довготний розподіл свідчить про домінування зональної хвилі 1 (рис. 2, *в—г*).

У 8-й версії алгоритму обробки вимірювань TOMS дані за серпень—грудень наявні, починаючи з 1979 р., за виключенням трьох років — 1993, 1994 і 1995 рр. Для визначення характеристик стаціонарної складової планетарних хвиль проведено аналіз 5-місячних середніх довготних розподілів ЗВО, згладжених із застосуванням 50-градусного вікна; виконано спектральний аналіз щоденних розподілів з виділенням зональних хвильових чисел 1—5 і одержано п'ятимісячні середні довготні профілі стаціонарного розподілу для кожної гармоніки.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАЗИСТАЦІОНАРНОГО
ДОВГОТНОГО РОЗПОДІЛУ
ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ

Для широт 65°S і 70°S визначено екстремальні значення ЗВО за період 1979—2004 рр. (рис. 3, *a*) та обчислено амплітуду зональної хвилі як половину різниці між максимумом та мінімумом (рис. 3, *б*). Варіації довготного положення максимуму і мінімуму квазістаціонарної хвилі ЗВО показані на рис. 3, *в*.

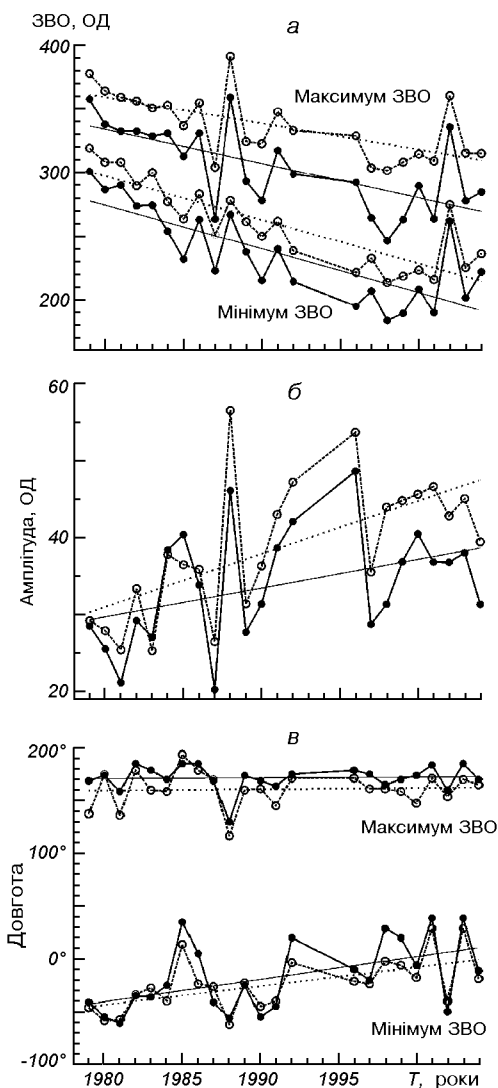


Рис. 3. Максимальний і мінімальний рівень ЗВО у 5-місячному середньому довготному розподілі на широтах 65°S (пунктирна лінія) та 70°S (суцільна лінія) (*a*), амплітуда квазістаціонарної зональної хвилі ЗВО (*б*) та варіації довготного положення максимуму і мінімуму ЗВО в 1979—2004 рр. (*в*)

З рис. 3, *a* видно, що як на максимальному, так і на мінімальному рівнях ЗВО спостерігається багаторічний негативний тренд, що відбиває тенденцію глобального зниження вмісту озону в атмосфері. Лінійна апроксимація свідчить про вищі темпи цього процесу на рівні мінімальних значень (див. таблицю). Різниця між швидкістю зниження ЗВО в області низьких і високих рівнів ЗВО на рис. 3, *a* пояснюється умовами формування квазістаціонарного розподілу стратосферного озону.

На окремому широтному кільці в крайовій зоні полярного вихору низькі рівні виникають при надходженні збідненого озonom стратосферного повітря із полярних областей у виступах планетарних хвиль (рис. 1). Високі рівні спричинені збагаченим озonom середньозонним повітрям, яке зміщується в бік полюса у вигинах хвиль. Якщо, наприклад, відносно широти 60°S хвильове збурення досягає $\pm 15^{\circ}$ (нижче зображення на рис. 1), то в довготному розподілі ЗВО на цій широті одночасно є повітряні маси з широти 45°S і 75°S .

У період існування вихору його внутрішня область, яка фактично відповідає озоновій дірі, ізолювана від середньозонного стратосферного повітря, де через відсутність обміну накопичується високий вміст озону. Тому на краю вихору утворюються високі градієнти малих складових атмосфери [14], в тому числі озону, а хвильове збурення краю вихору створює значні контрасти ЗВО уздовж фіксованого широтного кола. Як було показано в роботі [5], для широти станції Академік Вернадський 65°S різниця багаторічних трендів для квазістаціонарних екстремумів ЗВО узгоджується з різницею середніх трендів у широтних зонах, розташованих з полярного і екваторіального боку від станції. Отже, основною причиною квазістаціонарного зонального розподілу ЗВО у даному регіоні є викликане планетарними хвилями меридіональне зміщення полярного (в бік екватора) і середньозонного (у бік полюса) стратосферного повітря, яке в період існування циркумполярного вихору має високий градієнт ЗВО на межі вихору.

Амплітуда зональної хвилі в останнє десятиліття досягла в середньому 45 та 35 OD на широтах 65°S та 70°S відповідно (рис. 3, *б*). Це дорівнює різниці між максимальним і мінімальним значеннями на рівні 90 та 70 OD відповідно. Наприклад, на широті 65°S спостерігається зональна асиметрія ЗВО з екстремумами 230 та 320 OD (рис. 3, *a*). При цьому на кожній широті асиметрія ЗВО становить близько 30 % відносно середніх зональних значень, а в окремі роки наближається до 40 % (див. 1996 р. на рис. 2, *в*). Нагадаємо, що це усереднені характеристики для п'ятимісячного часового інтервалу.

З одержаних даних випливає також існування іншого прояву зональної асиметрії — у довготному положенні квазістаціонарних екстремумів ЗВО. Якщо довгота максимуму досить стабільна (162° E і 172° E на широті 65° S і 70° S відповідно), то мінімум упродовж 1979—2004 рр. систематично зміщується на схід від 45° W до 0° та від 40° W до 10° E відповідно (див. рис. 3, в і таблицю). Лінійна апроксимація показує близьку швидкість дрейфу на схід на двох широтах (рис. 3, в), в середньому 19.6 ± 4.7 градусів за десятиліття (див. таблицю). На рівні середнього квадратичного відхилення 2σ систематичний зсув довготи мінімуму фіксується досить надійно, тоді як зсувом максимуму можна знехтувати (1.0 ± 2.9 градусів за десятиліття). Одержані характеристики квазістаціонарних екстремумів ЗВО зведено в таблиці.

Основні характеристики квазістаціонарного довготного розподілу ЗВО (похибки вказані на рівні 2σ)

| Характеристика | Південна широта | |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | 65° | 70° |
| Тренд ЗВО-макс за 10 років, % | -5.7 ± 1.5 | -8.0 ± 2.0 |
| Тренд ЗВО-мін за 10 років, % | -11.4 ± 1.6 | -12.3 ± 2.2 |
| Тренд амплітуди за 10 років | 6.9 ± 1.8 | 3.7 ± 1.8 |
| Східна довгота ЗВО-макс | $161.5^\circ \pm 16.6^\circ$ | $172.1^\circ \pm 12.0^\circ$ |
| Зсув довготи ЗВО-макс за 10 років | $1.0^\circ \pm 2.9^\circ$ | |
| Зсув довготи ЗВО-мін за 10 років | $19.6^\circ \pm 4.7^\circ$ | |
| Зсув фази хвилі 1 за 10 років | $8.2^\circ \pm 3.7^\circ$ | |
| Зсув фази хвилі 2 за 10 років | $-27.7^\circ \pm 5.4^\circ$ | |

СПЕКТРАЛЬНІ СКЛАДОВІ СТАЦІОНАРНОГО ЗОНАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ

Для встановлення причини відмінностей у варіаціях довготного положення максимуму та мінімуму проаналізовано спектральний склад щоденних довготних розподілів ЗВО за серпень—грудень і отримано середні за п'ять місяців довготні профілі для зональних хвильових чисел 1–5 (рис. 4). Видно, що багаторічна стійкість довготного розподілу ЗВО найвиразніше виявляється у положенні фази максимальної амплітуди хвилі 1. Крім того, характерною є більш висока стійкість хвильових чисел 2–5 на широті 70° S порівняно з широтою 65° S. Стійкою особливістю є і майже протифазне поєднання хвиль 1 і 2 в довготному секторі квазістаціонарного мінімуму ЗВО (в середньому 45° W — 10° E, рис. 3, в) і відповідно близьке до синфазного — в секторі максимуму (навколо 160 — 170° E). Ці гармоніки мають і найбільшу амплітуду, тоді як хвилі

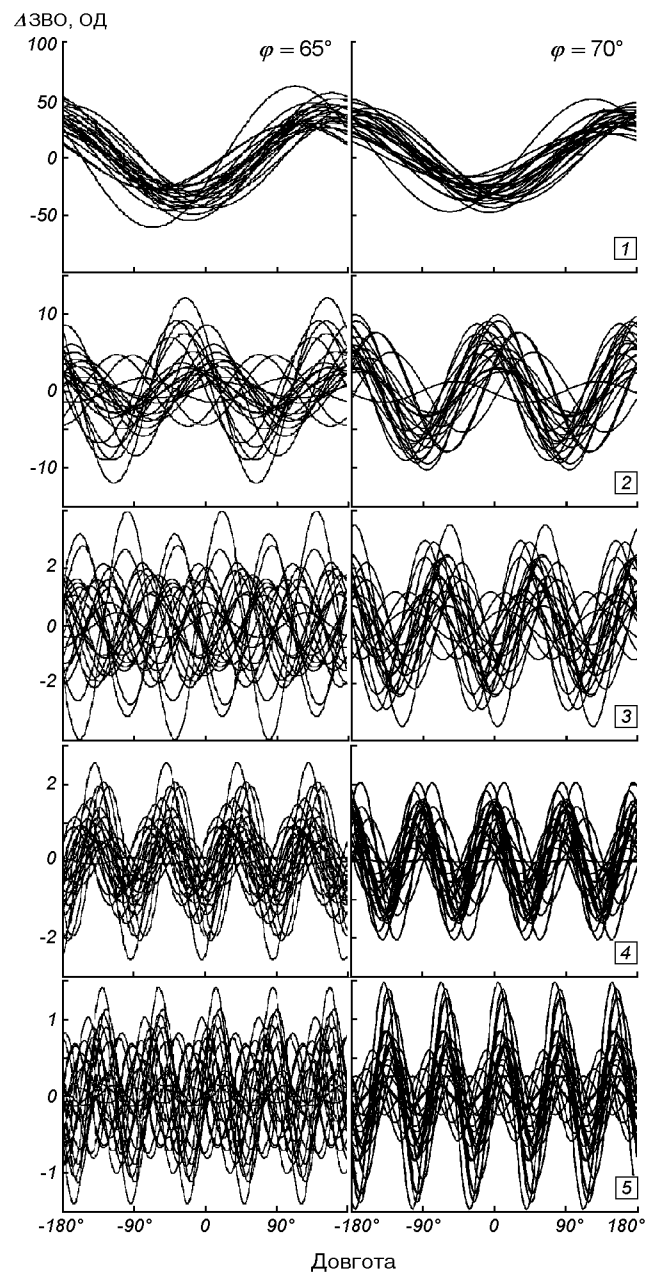


Рис. 4. Міжрічні варіації фази та амплітуди стаціонарного зонального розподілу ЗВО в 1979—2004 рр. для хвильових чисел 1—5 на широті 65° S і 70° S. Кожна крива подає п'ятимісячний (серпень—грудень) середній розподіл

3—5 з амплітудою, меншою за 2 ОД, не впливають істотно на середній п'ятимісячний довготний розподіл ЗВО. Докладніше характеристики хвиль 1—5 висвітлено в окремій публікації.

Тут ми звертаємо увагу на результати спектрального і статистичного аналізу, які дозволили виявити відмінність характеру довготривалої зміни фази

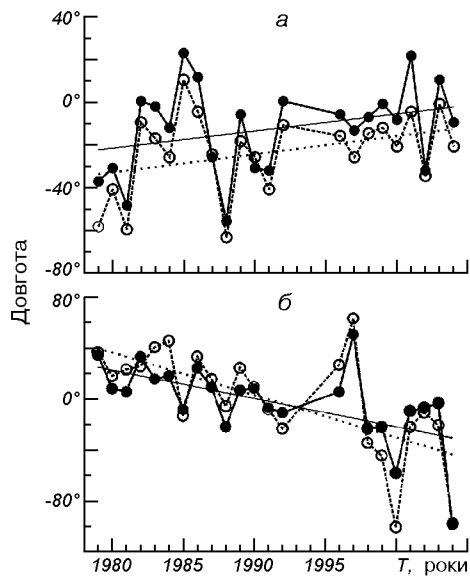


Рис. 5. Багаторічні зміни і тренди фази мінімуму квазістаціонарної зональної хвилі 1 (а) і максимуму хвилі 2 (б) на широті 65° S (пунктирна лінія) та 70° S (суцільна лінія)

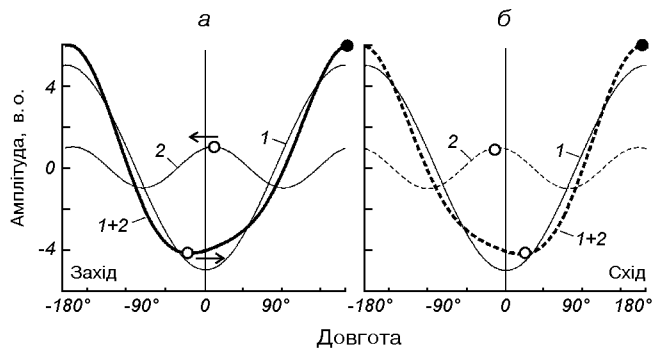


Рис. 6. Результат взаємодії квазістаціонарних хвиль 1 і 2 з близькими фазами максимальної амплітуди при довготному зміщенні хвилі 2 відносно хвилі 1

максимальної амплітуди стаціонарних хвиль 1 і 2 (рис. 5). Швидкість довготного дрейфу, як впливає з лінійної апроксимації, в середньому для двох широт становила 8.2 ± 3.7 та -27.7 ± 5.4 градусів за десятиліття відповідно. За 1979—2004 рр. це зумовило загальний зсув фаз у протилежних напрямках: 20° на схід (хвиля 1) та 60° на захід (хвиля 2). Саме таке поєднання положень і напрямів багаторічного дрейфу стаціонарних хвиль 1 і 2, як показало моделювання (рис. 6), забезпечує довготривалу стійкість максимуму і східний дрейф мінімуму в квазістаціонарному зональному розподілі ЗВО, показані на рис. 3, в.

З рис. 6 видно, що при протифазному поєднанні екстремумів хвиль 1 і 2, що має місце поблизу

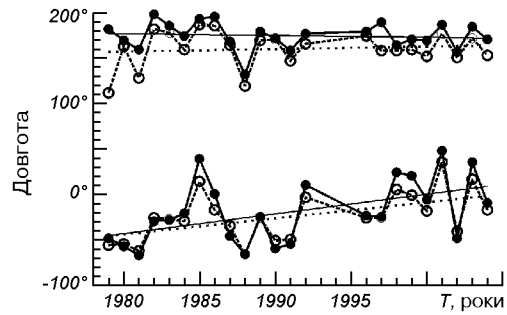


Рис. 7. Положення максимуму і мінімуму стаціонарного розподілу ЗВО на широті 65° S (пунктирна лінія) та 70° S (суцільна лінія), отримані додаванням хвиль із зональними хвильовими числами 1 і 2. Варіації 5-місячних середніх значень фази, показані на рис. 3, в, практично повністю відтворюються поєднанням перших двох гармонік

нульової довготи (див. рис. 4), у результаті зміщення хвилі 2 на захід (тонка пунктирна лінія на рис. 6, б) відносно нерухомої хвилі 1 (тонка суцільна лінія) мінімум сумарного розподілу «хвиля 1 + хвиля 2» зміщується на схід (білий кружок на жирній пунктирній лінії). Положення ж максимуму суми двох хвиль при цьому залишається майже незмінним (точка). Співвідношення амплітуд стаціонарних хвиль 1 і 2 становить 5:1 для широти 70° S.

Якщо взяти реальні значення фази і амплітуди хвиль 1 і 2, одержані в результаті спектрального аналізу та п'ятимісячного усереднення (рис. 4), то можна пересвідчитися: зміни довготних положень екстремумів ЗВО, показані на рис. 3, в, відтворюються сумою лише перших двох зональних гармонік (рис. 7).

Зокрема, для положення максимуму на широті 65° S ця сума дає значення $160.1 \pm 19.6^\circ$ E, що на 1.4° відрізняється від відповідного значення в таблиці. У випадку мінімуму, де важливіша поведінка багаторічного тренду, в середньому для двох широт сума хвиль 1 і 2 забезпечує тренд на схід 19.7 ± 5.0 градусів за 10 років, що практично збігається із відповідним значенням у таблиці.

ОБГОВОРЕННЯ І ВИСНОВКИ

З одержаних результатів видно, що зональна асиметрія ЗВО існує у період формування, існування та руйнування озонної діри. Це майже піврічний період, хоча найбільший рівень втрат озону досягається антарктичної весни — у вересні—листопаді, коли у полярному регіоні реєструються найнижчі значення ЗВО. Саме з цього регіону надходять

збіднені озоном повітряні маси в довготний сектор стаціонарного мінімуму ЗВО.

Відомо, що загальний вміст озону в стовпі атмосфери над Антарктикою забезпечується переважно шаром нижньої стратосфери на висотах 10—20 км, де його концентрація найвища [1, 12]. Як показано в роботі [13], найбільша частина спостереженої змінності ЗВО зумовлена горизонтальним рухом повітря саме тієї ділянки стовпа (quasi-columnar motion), яка розташована у нижній стратосфері. А найбільший внесок у такий горизонтальний рух у зимово-весняний сезон в Антарктиці роблять планетарні хвилі, викликаючи меридіональне зміщення повітряних мас. У динамічному процесі взаємодії планетарних хвиль із краєм стратосферного вихору відбувається його стійке витягування та зміщення в цілому у бік довготного сектора поблизу Антарктичного півострова. Це і формує квазістаціонарний довготний розподіл ЗВО в даному регіоні з певним рівнем зональної асиметрії упродовж майже піврічного інтервалу.

У цій роботі для двох широтних кіл 65° S і 70° S за даними EP/TOMS встановлено характер багаторічних змін квазістаціонарного довготного розподілу ЗВО у серпні—грудні 1979—2004 рр. Наведені результати показують, що:

1) спостерігається стійка асиметрія зонального розподілу ЗВО, яка утримується упродовж п'яти місяців і припадає переважно на антарктичну весну;

2) різниця між мінімальним і максимальним рівнями ЗВО на широтах 65° S і 70° S збільшилась в останні роки до 70—90 ОД (30 % відносно середньозонального значення);

3) довготне положення максимуму досить стабільне (162° E і 172° E на широтах 65° S і 70° S відповідно);

4) положення мінімуму зазнає довготривалого дрейфу на схід зі швидкістю в середньому близько 20° за десятиліття, що призвело до існування змінної асиметрії в довготному положенні екстремумів ЗВО (рис. 3, в).

З урахуванням вертикального розподілу озону, підкреслимо, що виявлені тенденції характеризують головним чином нижню стратосферу, з якою пов'язані динамічні зміни ЗВО. Щодо часових рамок встановлення зональної асиметрії — це зимово-весняний сезон з найвищим рівнем асиметрії у вересні—листопаді, коли реєструються найбільші втрати озону у полярній області. Для аналізу динаміки сезонних змін асиметрії доцільно детальніше розглянути середньомісячні характеристики квазістаціонарного розподілу ЗВО.

Виявлено, що багаторічне довготне зміщення області мінімуму є наслідком протилежно направле-

них дрейфів фази хвиль 1 і 2 — двох основних складових у спектрі хвильових збурень довготного розподілу ЗВО. Це показують результати спектрального аналізу і відтворення змінної довготної асиметрії положень екстремумів при взаємодії перших двох зональних гармонік. Впливом третьої зональної гармоніки на п'ятимісячні середні положення екстремумів можна знехтувати (рис. 4), хоча на середньомісячних даних такий ефект можливий. Відомо, що у високих широтах північної півкулі у жовтні квазістаціонарні хвилі 2 і 3 мають близькі амплітуди (дані для висот геопотенціалу на рівні 300 мб [10]).

Зональна асиметрія у ЗВО з домінуванням стаціонарної хвилі 1, очевидно, частково пов'язана з топографією регіону, яка визначається формою антарктичного материка, та температурним градієнтом на межі океан—континент. Але основний внесок в генерацію квазістаціонарної хвилі 1 на високих широтах південної півкулі, як було показано в [11], дають не ці особливості, а поширення хвильової активності з нижчих широт. Існування багаторічних варіацій фаз та відмінностей у напрямі багаторічного довготного дрейфу стаціонарних хвиль 1 і 2, виявлених у цій роботі, також свідчить про вплив процесів, які не можуть пов'язуватися з фіксованими особливостями топографії. Тому продовження даного дослідження передбачається передусім у напрямі розширення широтного діапазону і зіставлення характеристик стаціонарних хвиль у полі ЗВО та полях геопотенціалу на різних рівнях у тропосфері—стратосфері.

З іншого боку, зональна асиметрія ЗВО у період антарктичної весни сама є фактором впливу на атмосферні параметри. Оскільки основний внесок в асиметрію ЗВО дає озон, зосереджений у нижній стратосфері, а озон є чинником температурного режиму, то слід очікувати відповідних змін асиметрії в зональному розподілі температури у цьому шарі атмосфери. До такого висновку схиляють відомі дані про кореляцію ЗВО і стратосферної температури, встановлені з аналізу характеристик стаціонарних та біжучих планетарних хвиль [3, 4, 15, 16].

Крім того, на широті 65° S впродовж останніх років спостерігаються низькі значення ЗВО (230 ОД) в секторі поблизу нульової довготи, і високі (320 ОД) в секторі довгот поблизу 160° — 170° E (рис. 3, а, в). Існування асиметрії на рівні приблизно 30 %, очевидно, зумовлює відповідний зональний розподіл рівнів поверхневої УФ-опроміненості упродовж весняних місяців. Ця широта перетинає переважно морську поверхню. Тому можливі регіональні відмінності у процесах розвит-

ку фітопланктону приантарктичних морів, викликані довготною асиметрією ультрафіолетового випромінювання, яке досягає поверхні.

Робота частково підтримана грантами Українського антарктичного центру А/2-2004, Н/8-2004, Фонду фундаментальних досліджень України Ф7/362-2001 і STCU Gr-50J.

1. Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. Озонный щит Земли и его изменения. — Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1992.—288 с.
2. Атмосфера. Справочник. — Ленинград: Гидрометеоздат, 1991.—510 с.
3. Варгин П. Н. Анализ распространяющейся на восток планетарной волны по спутниковым данным об общем содержании озона // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.—2003.—39, № 3.—С. 327—334.
4. Fishbein E. F., Elson L. S., Froidevaux L., et al. MLS observations of stratospheric waves in temperature and O₃ during 1992 Southern winter // *Geophys Res. Lett.*—1993.—20, N 12.—P. 1255—1258.
5. Grytsai A. V., Evtushevsky A. M., Milinevsky G. P. Interannual variations of planetary waves in ozone layer at 65°S // *OZONE: Proceedings XX Quadrennial Ozone Symposium, 1—8 June 2004, Kos, Greece / Ed. C. Zerefos.* — Athens, Greece: International Ozone Commission.—2004.—Vol. 1.—P. 544—545.
6. Hio Y., Hirota I. Interannual variations of planetary waves in the Southern Hemisphere stratosphere // *J. Met. Soc. Jap.*—2002.—80, N 4B.—P. 1013—1027.
7. Hio Y., Yoden S. Quasi-periodic variations of the polar vortex in the Southern Hemisphere due to wave-wave interaction // *J. Atmos. Sci.*—2004.—61, N 21.—P. 2510—2527.
8. Lee A. M., Roscoe H. K., Jones A. E., et al. The impact of the mixing properties within the Antarctic stratospheric vortex on ozone loss in spring // *J. Geophys. Res.*—2001.—106, N D3.—P. 3203—3211.
9. Mechoso C. R., Hartmann D. L. An observational study of traveling planetary waves in the Southern Hemisphere // *J. Atmos. Sci.*—1982.—39, N 9.—P. 1921—1935.
10. Quintanar A. I., Mechoso C. R. Quasi-stationary waves in the Southern Hemisphere. Part I. Observational data // *J. Climate.*—1995.—8, N 11.—P. 2659—2672.
11. Quintanar A. I., Mechoso C. R. Quasi-stationary waves in the Southern Hemisphere. Part II: Generation mechanisms // *J. Climate.*—1995.—8, N 11.—P. 2673—2690.
12. Salby M. L. *Fundamentals of Atmospheric Physics / Eds* R. Dmowska, R. Holton. — Academic Press, 1996.—627 p.
13. Salby M. L., Callaghan P. F. Fluctuations of total ozone and their relationship to stratospheric air motions // *J. Geophys. Res.*—1993.—98, N D2.—P. 2715—2727.
14. Schoeberl M. R., Lait L. R., Newman P. A., Rosenfield J. E. The structure of the polar vortex // *J. Geophys. Res.*—1992.—97, N D8.—P. 7859—7882.
15. Steinbrecht W., Hassler B., Winkler P., et al. Comparison of observed stratospheric ozone and temperature time series with chemistry-climate model simulations. Part I: Global variations of total ozone and 50 hPa temperature // *OZONE, XX Quadrennial Ozone Symposium, 1—8 June 2004, Kos, Greece, Proceedings / Ed. C. Zerefos.* — Athens, Greece: International Ozone Commission.—2004.—Vol. 2.—P. 757—758.
16. Wirth V. Quasi-stationary planetary waves in total ozone and their correlation with lower stratospheric temperature // *J. Geophys. Res.*—1993.—98, N D5.—P. 8873—8882.

LONGITUDINAL DISTRIBUTION OF TOTAL OZONE CONTENT IN EDGE REGION OF ANTARCTIC STRATOSPHERIC VORTEX

A. V. Grytsai, A. M. Evtushevsky, G. P. Milinevsky,
Z. I. Grytsai, A. V. Agapitov

Longitudinal distribution of total ozone content (TOC) in the edge region of the Antarctic stratospheric vortex is analyzed using the TOMS satellite data (version 8) of 1979 to 2004. The five-month time interval of August–December covering the late Antarctic winter, spring, and early summer is considered. The five-month mean TOC zonal distributions at latitudes of 65° S and 70° S are obtained from the daily TOMS data. Zonal wave number 1 is dominated. It forms a zonal asymmetry with the quasi-stationary wave minimum and maximum placed in the opposite longitudinal sectors. Our results show that during the last 26 years the TOC asymmetry increased and in the last years it reaches 70–90 Dobson Units, or about 30 % relative to the zonal mean. Interannual variations of the longitude of the TOC maximum are observed near the stable position of 162° E and 172° E at latitudes of 65° S and 70° S, respectively. Besides the interannual variations, the longitude of the TOC minimum during 1979–2004 shows a systematic displacement to the east in the longitudinal sector of 45° W to 10° E. A spectral analysis shows that this tendency is caused by an interaction between the quasi-stationary components of the zonal wave number 1 and 2. In the last decades they have the opposite longitudinal drift of the phase of the maximum amplitude.

УДК 550.388; 520.16+523.31+523.9:520.86

А. М. Гоков, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Вариации концентрации электронов
в среднеширотной D-области ионосферы
во время магнитных бурь**

Надійшла до редакції 11.11.2004

Наведено результати експериментальних досліджень методом часткових відбиттів варіацій концентрації електронів у середньширотній D-області іоносфери під час одинадцяти магнітних бур. Розглянуто відгук D-області на початку та в кінці бурі. Виявлено квазіперіодичне збільшення електронної концентрації в D-області іоносфери протягом десятків хвилин більш ніж на 50—100 % з періодами $T \geq 30$ —60 хв. Оцінено зміни швидкості іонізації. За експериментальними даними обчислено енергетичні характеристики потоків заряджених часток.

ВВЕДЕНИЕ

Есть три основных вида солнечного излучения, которые влияют на процессы в атмосфере Земли и приводят к вариациям космической погоды: рентгеновское излучение, протоны с энергией 1—100 МэВ и низкоэнергичная плазма [10, 11]. Солнечные вспышки, сопровождающиеся увеличением интенсивности оптического, рентгеновского и корпускулярного излучений, и выбросы корональной массы формируют состояние космической погоды. Обычно они обуславливают геокосмические бури. Геокосмическая буря представляет собой совокупность магнитной, ионосферной, атмосферной и электрической бурь [16]. Известно, что приход солнечного ударного фронта, который сопровождают, как правило, внезапные геомагнитные начала *ssc*, вызывает в первый момент усиление выпадения магнитосферных заряженных частиц, которые после *ssc* быстро перемешиваются с вторгающейся из межпланетного пространства магнитосферной плазмой. Это солнечное плазменное облако затем является причиной второй фазы геомагнитной бури, во время которой возможно распространение аномальных явлений в ионосфере (ионосферной бури) до средних широт. В настоящее время уже не вызывает

сомнений, что во время магнитных бурь и в течение примерно 5—14 сут после них выпадающие из радиационных поясов энергичные электроны с энергией $\varepsilon \geq 40$ кэВ являются источником дополнительной ионизации среднеширотной D-области ионосферы до широт 45—60° [9—11, 21, 28]. В этот период существенную роль в качестве источника ионизации в средних широтах играют также высокоэнергичные протоны. Роль корпускулярной ионизации среднеширотной D-области ионосферы подтверждена экспериментально [1, 3—5, 7—13, 16, 18—24, 26—28]. Электроны и протоны могут играть заметную роль в ионизации нижней ионосферы на высотах 50—100 км ночью и в периоды возмущений различной природы естественного (солнечные вспышки, магнитные бури, грозы, солнечный терминатор, сильные землетрясения и т. д.) и искусственного характера (мощные взрывы, старты ракет, работа мощных нагревных стендов в радиочастотном диапазоне, излучение высоковольтных линий электропередач и т. д.).

Исследование влияния геокосмических бурь на околоземную плазму является актуальной проблемой ввиду большого научного и прикладного значения. Каждая геокосмическая буря является уникальной и сопровождается комплексом явлений в

околоземной плазме. Кроме общих закономерностей, буре присущи индивидуальные особенности. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на геокосмические бури носит сложный и неоднозначный характер. Известные результаты экспериментов пока не позволяют выявить многие особенности отклика и построить их физико-математические модели. Поэтому есть необходимость продолжения экспериментальных исследований и накопления сведений для изучения упомянутой проблемы.

Целью настоящей работы является изложение результатов экспериментальных исследований методом частичных отражений вариаций концентрации электронов $N(z)$ в среднеширотной D-области ионосферы во время одиннадцати магнитных бурь. Рассмотрен отклик D-области на начало и окончание бури.

ТЕХНИКА, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Экспериментальные исследования выполнены в 2003 г. методом частичных отражений (ЧО) [17] при помощи комплекса аппаратуры [29] вблизи г. Харькова в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Ее координаты следующие: возвышение над уровнем моря $h = 156$ м, географические широта и долгота — $49^{\circ}38' N$, $36^{\circ}20' E$, геомагнитные широта и долгота — 45.37° и 118.7° соответственно, магнитное склонение — $66^{\circ}36.8'$, магнитное склонение — $6^{\circ}19.6' (W)$, $L \approx 2.0$. Для анализа из банка экспериментальных данных университета были отобраны регистрации ЧО-сигналов, полученные в период магнитных бурь. Сведения об экспериментах приведены в табл. 1. Информация о геомагнитных данных взята на сайте по URL: www://solar.sec.noaa.gov.

Таблица 1. Сведения об экспериментах

| Дата, 2003 г. | A_p | K_p | Время измерений, UT |
|----------------------|-------|----------|----------------------------|
| 31 марта | 31 | 33346644 | 11.43—22.33 |
| 27 мая | 26 | 44334345 | 07.31—24.00 |
| 28 мая | 36 | 65554444 | 00.00—07.41 |
| 29 мая | 89 | 54436788 | 22.36—24.00 |
| 30 мая | 49 | 84434545 | 00.00—24.00 |
| 31 мая | 17 | 55313322 | 00.00—12.20 |
| 17 сентября | 61 | 55577445 | 01.52—21.00 |
| 15 октября | 42 | 34764444 | 04.14—20.40 |
| 29 октября | 189 | 43987798 | 10.51—21.50 |
| 30 октября | 162 | 87655899 | 07.38—24.00 |
| 31 октября—01 ноября | 93 | 87766544 | 00.00—13.00 (01 ноября) |

Основные параметры комплекса частичных отражений при проведении исследований были следующими: зондирующие частоты $f = 2.21$ и 2.31 МГц, длительность импульсов $\tau = 25$ мкс с частотой повторения $F = 1$ Гц, импульсная мощность $P \approx 150$ кВт, коэффициент усиления антенны $G \approx 40$. Во время эксперимента регистрировались высотно-временные зависимости амплитуд смеси ЧО-сигнала и радишума $A_{so,x}(z, t)$ (где t — время, индексы «o» и «x» соответствуют обыкновенной и необыкновенной поляризациям) с 14 или 22 высотных уровней, начиная с 45 или 60 км через 3 км. Для выделения амплитуд ЧО-сигналов $A_{o,x}(z, t)$ записывались также амплитуды радишума $A_{no,x}(t)$ (2—6 выборок в полосе частот 50 кГц) в моменты времени, предшествующие излучению зондирующего импульса. Оценки средних величин интенсивностей ЧО-сигнала $\langle A_{x,o}^2 \rangle$ и шумов $\langle A_{nx,no}^2 \rangle$ осуществлялись по 60 реализациям на интервале времени 60 с. Статистическая погрешность этих оценок не превышала 10 %. Вычислялись высотно-временные зависимости $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$ и временные зависимости $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$. По полученным $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z)$ на фиксированных высотах с шагом 3 км находилось их отношение $R(z)$, используемое далее для получения высотных профилей электронной концентрации $N(z)$ по методике дифференциального поглощения [17] с применением метода регуляризации исходного интегрального уравнения [2]. Профиль частот столкновений электронов с нейтральными молекулами задавался модельным [25]. Погрешность вычислений профилей $N(z)$ на интервалах усреднения в 10 мин не превышала 30 %. Продолжительность измерений $A_{so,x}(z, t)$ и $A_{no,x}(t)$ составляла единицы-десятки часов. Сравнение проводилось с данными, полученными на той же аппаратуре в магнитоспокойные дни (в контрольные дни).

Для оценки периодов медленных вариаций $\langle A_{x,o}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{nx,no}^2 \rangle(t)$ и $N(z, t)$ использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье.

Основные данные, характеризующие состояние космической погоды в период рассматриваемых магнитных бурь, приведены на рис. 1: усредненные за 5 мин потоки протонов 10, 50 и 100 МэВ (протон/ $m^2 \cdot c \cdot sr$), измеренные на спутнике GOES-8 (W75) и электронов с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12; кривая H_p получена усреднением за 5 мин H -составляющей геомагнитного поля по измерениям на спутнике GOES-12. Здесь же приведены значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p и временные изменения индекса D_{st} .

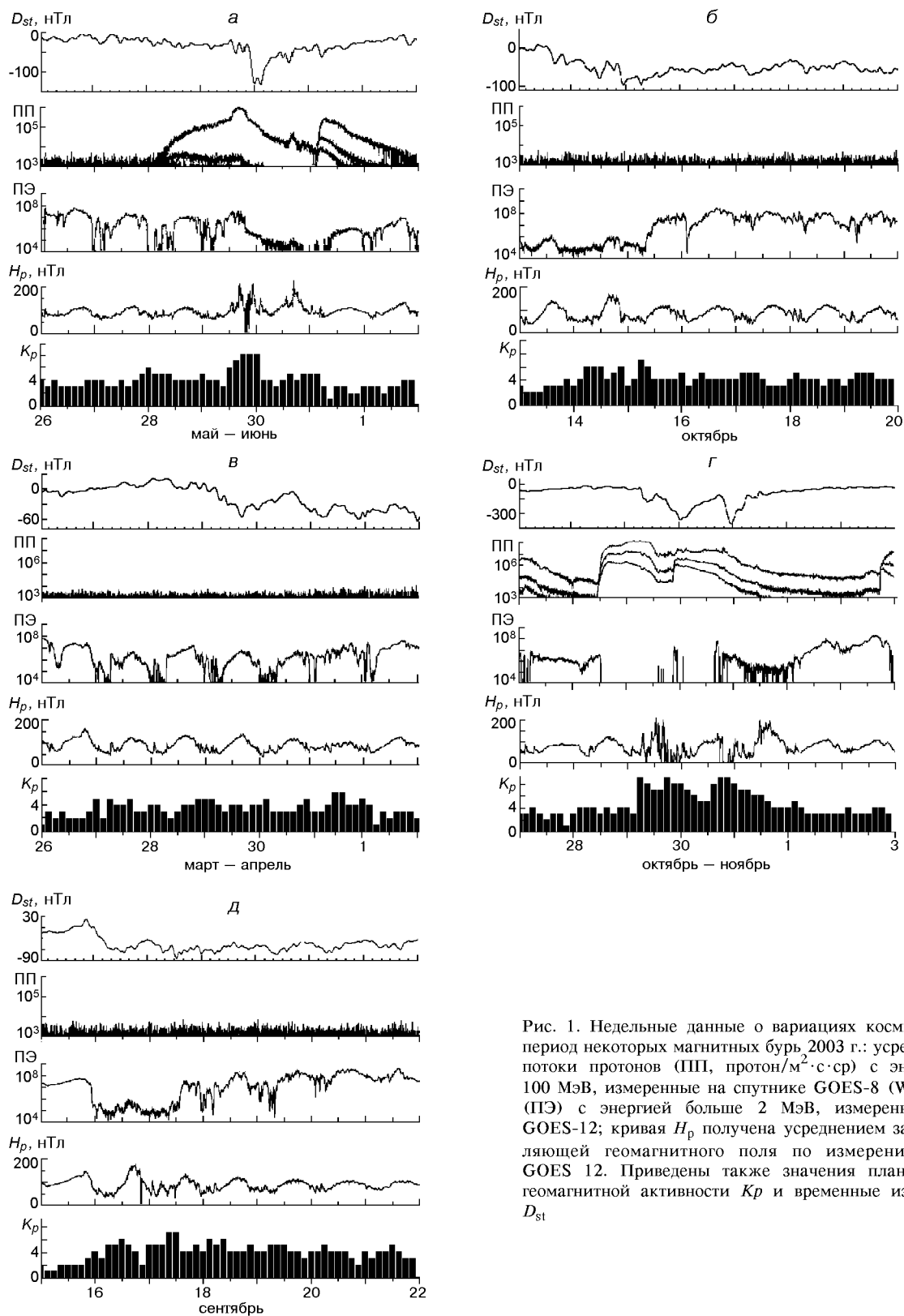


Рис. 1. Недельные данные о вариациях космической погоды в период некоторых магнитных бурь 2003 г.: усредненные за 5 мин потоки протонов (ПП, протон/м²·с·ср) с энергией 10, 50 и 100 МэВ, измеренные на спутнике GOES-8 (W75) и электронов (ПЭ) с энергией больше 2 МэВ, измеренные на спутнике GOES-12; кривая H_p получена усреднением за 5 мин H -составляющей геомагнитного поля по измерениям на спутнике GOES 12. Приведены также значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p и временные изменения индекса D_{st}

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В период 27—31 мая 2003 г. была зарегистрирована магнитная буря (см. табл. 1 и рис. 1, а). В этот период времени значения индекса Kp увеличились до 5—8. Их увеличение сопровождалось большими вариациями геомагнитного поля и уменьшением значений индекса D_{st} в интервале значений от –40 до –140 нТл (наибольшие изменения имели место 29—30 мая). Начиная с 28 мая более чем на 2-3 порядка увеличились потоки протонов, которые регистрировались на спутнике и в течение нескольких дней после магнитной бури. Потоки высыпавшихся из магнитосферы электронов носили квазипериодический характер с периодом около суток. 30—31 мая значения потоков электронов уменьшились на 1-2 порядка.

В эксперименте 27—28 мая наблюдения проведены в начале магнитной бури. Отметим основные особенности в поведении $\langle A_{0,x}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{n0,x}^2 \rangle(t)$, $R(z, t)$ и $N(z, t)$. Пример изменений $N(z, t)$ на двух высотных уровнях приведен на рис. 2, а. Увеличение индекса Kp почти синхронно сопровождалось заметным ростом интенсивности радишумов, увеличением в единицы-десятки раз интенсивностей ЧО-сигналов, регистрировавшихся с высотных уровней $z \geq 87$ км в ночное время. Отметим, что в невозмущенных условиях в такие периоды времени ЧО-сигналы, как правило, имеют очень малую интенсивность или отсутствуют вообще. Дифференциальное поглощение ЧО-сигналов увеличилось, при этом отмечены существенные квазипериодические изменения $R(z, t)$ в указанном выше высотном интервале с квазипериодом $T \geq 1$ ч. Ниже 87 км и в радишумах особенностей не обнаружено. Дисперсия величины $R(z, t)$ увеличилась в несколько раз. Электронная концентрация в этот период изменялась квазипериодически примерно с тем же периодом, вариации N составляли примерно 100—200 %.

Период основной фазы магнитной бури 29—30 мая (значения индекса Kp увеличились до 8) пришелся на ночное время в пункте наблюдений. Уровень радиопомех в этих измерениях был высоким. Значения N удалось восстановить на высотных уровнях 81 и 84 км (рис. 2, б). Характерным оказалось квазипериодическое, длительностью около 25 мин, увеличение значений N более чем на 100—150 % в интервале времени 22:55—00:05 UT. Квазипериодическое увеличение значений N на 200—500 % после 01:50 UT 30 мая совпало с уменьшением индекса геомагнитной активности и моментом прохождения солнечного терминатора в этой области высот. Поскольку солнечный термина-

тор, как и магнитная буря, может вызывать подобные изменения N на таких высотах [24], то однозначно интерпретировать полученные данные о вариациях N трудно.

Окончание магнитной бури по данным www://solar.sec.noaa.gov сопровождалось отдельным сильным возмущением геомагнитного поля 30 мая в интервале времени 15:00—18:00 UT (см. зависимость $H_p(t)$ на рис. 1, а; при этом индекс Kp увеличился от 3 до 5). В этот период и до окончания магнитной бури наблюдались интенсивные ЧО-сигналы обыкновенной поляризации с высотных уровней 81—87 км. Амплитуды этих сигналов периодически уменьшались в течение десятков минут до невозмущенных значений. Увеличение $\langle A_0^2 \rangle(z, t)$ составляло 100—1000 % и более, значения $R(z, t)$ в этот период уменьшились в несколько раз. Электронная концентрация (рис. 2, б) на этих высотах в течение часа увеличилась на 200—400 % с последующим кратковременным (около 20 мин) восстановлением к невозмущенным условиям и квазипериодическими увеличениями с периодом $T \geq 60$ мин до окончания магнитной бури (вариации N составляли примерно 100—400 %).

Важно отметить, что в эксперименте 31 мая (после магнитной бури) отмеченных выше характерных особенностей не обнаружено, изменения концентрации электронов в интервале высот 81—87 км соответствовали типичным невозмущенным условиям (рис. 2, б).

Перейдем к описанию следующего события.

Эксперимент 31 марта 2003 г. был проведен сразу после окончания главной фазы небольшой магнитной бури, которая началась 27 марта (рис. 1, б). Значения индекса Kp во время магнитной бури увеличились с 2 до 4-5; потоки протонов наблюдались на уровне фоновых значений ($2 \cdot 10^3$ протон \cdot м $^{-2}$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$); потоки электронов, значения которых были повышенными по сравнению с невозмущенными условиями, как и в предыдущем случае, имели квазипериодический характер, их период составлял около суток; значения D_{st} -индекса во время магнитной бури уменьшились примерно до 60 нТл. 31 марта имело место нарушение суточного хода $H_p(t)$ — днем значения H_p уменьшились на 50 нТл.

На рис. 2, в приведены изменения $N(z, t)$, полученные в этом эксперименте. Во время этой магнитной бури в темное время суток с высотных уровней $z \geq 72$ км эпизодически в течение 5—10 мин регистрировались ЧО-сигналы, превышающие уровень радишумов в 2—6 раз (выше было отмечено, что в невозмущенных условиях в такие

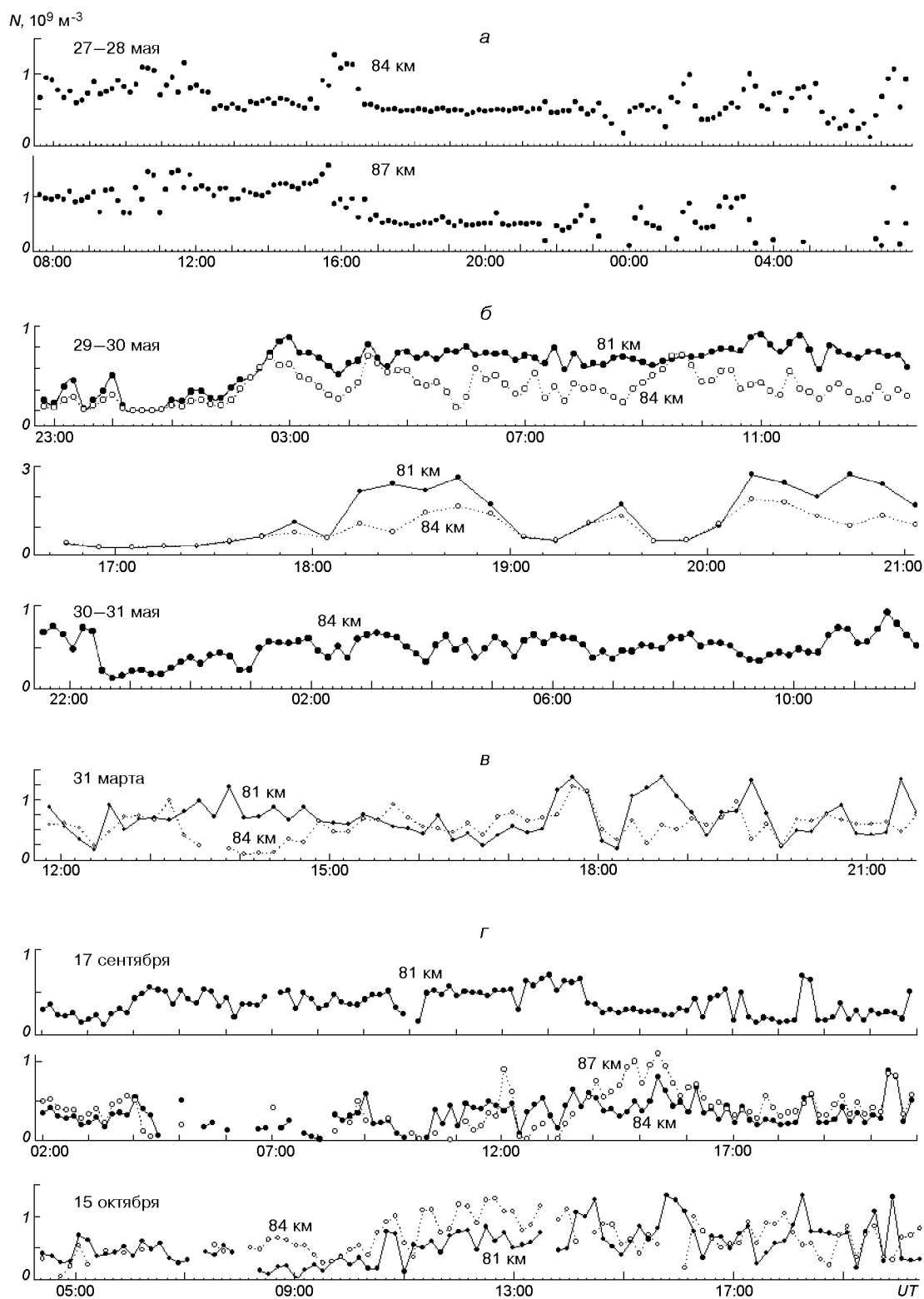


Рис. 2. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы: *a*, *б* — в начале и в конце магнитной бури 29—31 мая 2003 г., *в*, *г* — во время магнитных бурь 31 марта, 17 сентября и 15 октября 2003 г.

периоды времени ЧО-сигналы, как правило, наблюдаются очень малой интенсивности или отсутствуют вообще). Дисперсия отношения $R(z, t)$ при этом увеличилась в несколько раз. Значения N на высотах, меньших 81 км, восстановить не удалось. Оценки показали, что, возможно, имели место кратковременные (порядка 10 мин) увеличения N на 100—150 %. В конце магнитной бури, примерно после 16:30 UT, значения $R(z, t)$ в интервале высот 81—90 км изменялись квазипериодически с периодом $T \geq 60$ мин. Концентрация электронов на этих высотах в это время периодически увеличивалась более чем на 100—150 % с примерным периодом 50—60 мин.

В период магнитных бурь 17 сентября и 15 октября (рис. 1, *в, з*) отмечены отчетливые квазипериодические вариации $N(z, t)$; в области высот 78—87 км эти изменения составляли 50—150 % (рис. 2, *з*). Отметим, что во время этих магнитных бурь значения индекса K_p увеличились с 2 до 5—7; потоки протонов наблюдались на уровне фоновых значений; потоки электронов были повышенными по сравнению с невозмущенными условиями, значения D_{st} -индекса во время магнитных бурь уменьшились примерно до -80 нТл.

Рассмотрим кратко результаты, полученные в эксперименте 29—31 октября 2003 г. В этот период зарегистрирована очень сильная магнитная буря (рис. 1, *д*). Значения индекса K_p увеличились с 2-3 до 8-9, они сопровождалась большими (более 100 %) вариациями геомагнитного поля и уменьшением значений индекса D_{st} в интервале значений до -440 нТл. Начиная примерно с 12:00 UT 28 октября более чем на три порядка увеличились потоки протонов, которые регистрировались на спутнике и в течение нескольких дней после магнитной бури. Значения потоков высыпавшихся из магнитосферы электронов во время магнитной бури уменьшились на несколько порядков.

По данным визуальных наблюдений ночью (примерно с 23:20 до 00:40 LT) 29 и 30 октября периодически наблюдались отчетливые полярные сияния, поглощение радиосигналов на частоте 2.31 МГц было высоким (почти полным). Уровень радишумов был низким, ЧО-сигналы от неоднородностей нижней ионосферы почти не наблюдались из-за сильного поглощения (отношение сигнал/помеха было меньше 1). В дневное время поглощение радиоволн также было высоким. После начала магнитной бури 29 октября на высотах $z \geq 75$ км в течение нескольких часов в светлое время суток непрерывно регистрировались отчетливые ЧО-сигналы, превышающие уровень радиопомех в единицы-десятки раз. Отметим, что в

невозмущенных условиях на этой рабочей частоте ЧО-сигналы обычно наблюдаются в интервале высот 80—90 км. В темное время суток, исключая период высокого (полного) поглощения, эпизодически наблюдались ЧО-сигналы не меньшей интенсивности длительностью единицы-десятки минут. Подобное поведение ЧО-сигналов и радишумов имело место и в эксперименте 30 октября. На рис. 3 приведены примеры высотно-временных изменений концентрации электронов в этих экспериментах (отметим, что не во всем интервале наблюдений удалось восстановить значения N с требуемой точностью). На рис. 3, *б* показаны также изменения $R(z, t)$. Как 29 октября, так и 30 октября электронная концентрация во всей D-области ионосферы изменялась квазипериодически с периодом 30—60 мин. Вариации $N(z, t)$ составляли 50—550 %.

Они могли быть вызваны квазипериодическими пульсирующими высыпаниями высокоэнергичных электронов из радиационных поясов во время магнитной бури. Но более вероятной является модуляция N генерируемыми в процессе магнитной бури акустико-гравитационными волнами, о чем свидетельствует величина квазипериода.

Сходный характер поведения $\langle A_{x,0}^2 \rangle(z, t)$, $\langle A_{px,0}^2 \rangle(t)$ и $N(z, t)$ имел место и 31 октября.

Заметим, что во время всех описанных экспериментов по данным спутника GOES-8 (W75) (www://solar.sec.noaa.gov) эпизодически наблюдались высыпания электронов и протонов различных энергий.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения средних значений интенсивности шума и ее дисперсии во время рассмотренных событий можно объяснить так. Известно, что шум на частотах порядка 2-3 МГц представляет собой наложение сигналов от радиосредств, работающих в этом диапазоне. Магнитные бури, как показали экспериментальные результаты, сопровождаются увеличением концентрации электронов и поглощения радиосигналов в ионосфере высоких и средних широт. Увеличение поглощения приводит к ослаблению помех, принимаемых как основным, так и боковыми лепестками диаграммы направленности антенной системы радара ЧО, состоящей из ортогональных вертикальных ромбов. Противоположный эффект проявляется при уменьшении значений $N(z, t)$ (такой эффект, но более сильно выраженный, имеет место при прохождении вечернего терминатора).

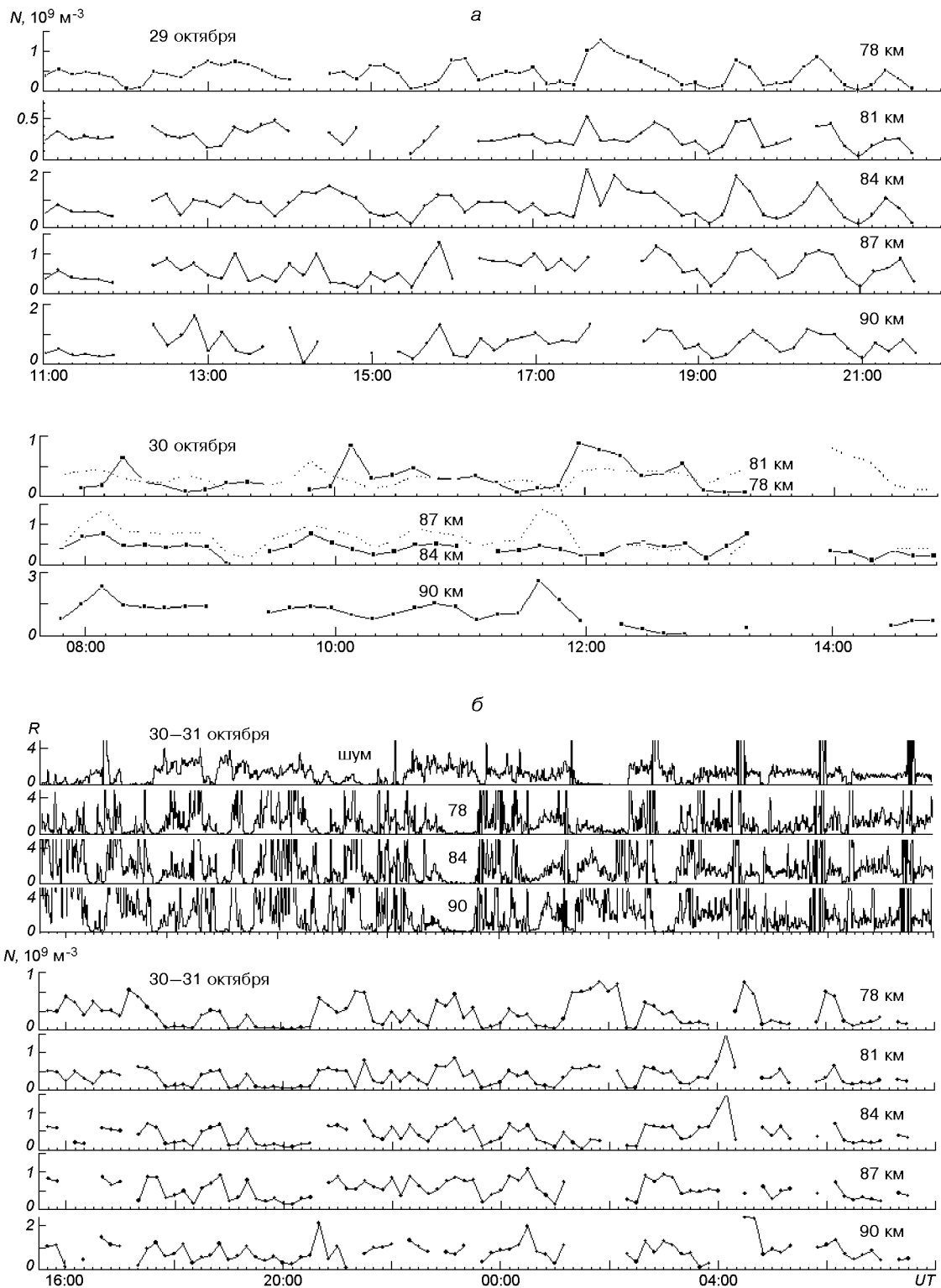


Рис. 3. Высотно-временные изменения концентрации N электронов и отношения R средних интенсивностей ЧО-сигналов в период магнитной бури 29–30 октября (а) и 30–31 октября 2003 г. (б)

Для объяснения вариаций средних значений интенсивности ЧО-сигнала и ее дисперсии учтем, что [14]

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

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

Во время рассмотренных событий происходили следующие процессы:

- 1) вариации N , а значит, и $K_{x,o}$;
- 2) значительные вариации $\langle \Delta N^2 \rangle$ (это возможно при сильной турбулизации среды, что может быть вызвано, например, потоками высыпавшихся заряженных частиц).

Эти факторы могут полностью объяснить вариации $\langle A_{x,o}^2 \rangle$, обнаруженные экспериментально. Увеличение же дисперсии интенсивностей сигнала свидетельствует о нестационарности процессов, а также о неполном «вычитании» шумов.

Наблюдаемые вариации отношения интенсивностей R и ее дисперсии σ_R^2 могут быть объяснены на основе анализа известной из теории метода ЧО зависимости для R . Поскольку на $z \approx 75...90$ км в D-области ионосферы выполняются условия $\Omega_+^2 \gg \nu^2$, $\Omega_-^2 \gg \nu^2$, то

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

При увеличении N увеличивается $K_{x,o}$, это приводит к уменьшению R . При уменьшении N (восстановлении к фоновым значениям) уменьшается $K_{x,o}$ и увеличивается R . Увеличение σ_R^2 связано с усилением нестационарности среды.

Наблюдаемое в период магнитной бури увеличение N может быть вызвано ионизацией ионосферной плазмы в D-области потоками высыпавшихся из магнитосферы энергичных электронов. Ранее такой механизм использовался для объяснения результатов экспериментальных исследований [4, 6, 9—12, 15, 21, 28].

По методике [19] на основе механизма о выпадении высокоэнергичных частиц оценим параметры их потоков. По величине электронной концентрации в невозмущенных и возмущенных условиях (N_0 и N) оценивались скорости ионизации $q_0 = \alpha_0 N_0^2$, $q = \alpha N^2$, где α_0 и α — соответствующие коэффициенты рекомбинации. Далее методика оценки параметров потока частиц сводится к вычислению величины $\Delta q = q - q_0$. Если пренебречь распределением высыпавшихся частиц по энергиям, которое при наземных наблюдениях неизвестно, то плотность потока мощности частиц равна $\Pi \approx 2\varepsilon_i \Delta z \Delta q$, где $\varepsilon_i \approx 35$ эВ — энергия, затрачиваемая на один акт ионизации, Δz — диапазон высот, где эффективно поглощается поток частиц данной энергии ε . Можно полагать, что $\Delta z \approx 10$ км. С другой стороны, параметр Π связан с потоком частиц p : $p = \Pi/\varepsilon$. Зная Π , можно оценить мощность и энергию частиц, высыпавшихся на площади S : $P = \Pi S$, $E = P \Delta T$, где ΔT — длительность выпадений.

При расчетах полагалось, что $S = 10^{14}$ м², $\Delta T = 1200—2400$ с, энергия высыпавшихся электронов $\varepsilon > 40$ кэВ. В табл. 2 приведены результаты расчетов параметров потоков заряженных частиц для отдельных характерных периодов во время рассмотренных магнитных бурь. Расчеты показали, что величина потоков электронов в рассмотренных экспериментах во время магнитных бурь составляла $p \approx 4 \cdot 10^8—5 \cdot 10^9$ м⁻²с⁻¹.

В целом результаты расчетов хорошо согласуются с известными данными о потоках электронов и протонов, полученными экспериментально или оцененными во время возмущений различной природы [4, 6, 9—12, 15, 21, 28].

Таблица 2. Параметры потоков электронов

| Дата, 2003 г. | z , км | N_0 , 10^8 м ⁻³ | N , 10^8 м ⁻³ | q_0 , 10^6 м ⁻³ с ⁻¹ | q , 10^6 м ⁻³ с ⁻¹ | Δq , 10^6 м ⁻³ с ⁻¹ | Π , 10^{-5} Дж·м ⁻² с ⁻¹ | p , 10^9 м ⁻² с ⁻¹ | ε , МэВ | P , 10^9 Вт | E , 10^{12} Дж | ΔT , с |
|---------------|----------|--------------------------------|------------------------------|--|--|---|--|--|---------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| 31 марта | 81 | 6 | 16 | 4 | 26 | 22 | 7.5 | 3.4 | 0.15 | 7.5 | 14 | 1800 |
| 30 мая | 84 | 5 | 15 | 2.5 | 23 | 20 | 7.8 | 3.5 | 0.15 | 7.8 | 19 | 2400 |
| 17 сентября | 87 | 3 | 10 | 0.9 | 10 | 9.9 | 3.4 | 2.3 | 0.1 | 3.4 | 8.2 | 2400 |
| 15 октября | 84 | 6 | 14 | 4 | 20 | 16 | 5.4 | 2.4 | 0.15 | 5.4 | 9.7 | 1800 |
| 30 октября | 87 | 5 | 15 | 2.5 | 23 | 20 | 7.8 | 5.2 | 0.1 | 7.8 | 14 | 1800 |

ВЫВОДЫ

Отклик среднеширотной D-области ионосферы на магнитные бури имеет сложный характер, поскольку магнитные бури сопровождаются целым рядом явлений (оптические и рентгеновские вспышки разной интенсивности, высыпания электронов и протонов, возмущения геомагнитного поля и др.), которые часто совпадают во времени, и вклад их в изменения в нижней части среднеширотной ионосферы трудно или невозможно разделить. Относительно небольшое число надежных экспериментов пока не позволяет выявить все (или большую часть) особенностей отклика. Среди рассмотренных нами отметим следующие.

1. Обнаружено, что увеличение индекса геомагнитной возмущенности K_p в начале магнитной бури (без внезапного начала) сопровождался характерным, отличным от невозмущенных условий, увеличением интенсивности радиозумов, увеличением в единицы-десятки раз интенсивностей ЧО-сигналов на высотах более 87 км в ночное время и квазипериодическими (период не менее 60 мин) изменениями концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы. Изменения концентрации электронов составляли десятки-сотни процентов. Дисперсия величины $R(z, t)$ увеличилась в несколько раз.

2. В течение фазы восстановления магнитных бурь обнаружены квазипериодические (период не менее 60 мин) длительностью несколько часов изменения концентрации электронов на высотах 81—90 км. Увеличение концентрации электронов при этом составляло 100—400 %. Важно, что это имело место как при заметном возмущении геомагнитного поля, так и без такого возмущения.

3. На основе гипотезы о высыпании электронов в период магнитной бури по экспериментальным данным о вариациях концентрации электронов выполнены оценки энергетических характеристик потоков заряженных частиц. Оказалось, что $p \approx 4 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Эти значения хорошо согласуются с теоретическими оценками и с известными данными о потоках электронов, полученными во время возмущений различной природы.

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

Работа выполнена при поддержке НТЦ Украины, проектное соглашение № 1772.

1. Гармаш К. П., Костров Л. С., Розуменко В. Т. и др. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты на фоне магнитной бури // Геомагнетизм и аэронаука.—1999.—39, № 1.—С. 72—78.
2. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэронаука.—1996.—36, № 2.—С. 75—81.
3. Гоков А. М. К вопросу о реакции среднеширотной D-области ионосферы на удаленные сильные землетрясения // Геомагнетизм и аэронаука.—2001.—41, № 4.—С. 532—536.
4. Гоков А. М., Гритчин А. И. Характеристики некоторых возмущений в D-области ионосферы во время магнитных бурь и солнечных вспышек // Космич. исслед.—1996.—34, № 6.—С. 585—589.
5. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Экспериментальные исследования влияния сильных гроз на параметры среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэронаука.—1998.—38, № 1.—С. 184—188.
6. Гоков А. М., Тырнов О. Ф. Отклик среднеширотной D-области ионосферы на протонные события SPE // Космічна наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 86—90.
7. Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения процессов в нижней ионосфере, сопутствующих затмению Солнца 11 августа 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 348—360.
8. Данилов А. Д. Популярная аэронаука. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989.—230 с.
9. Кнут Р., Вюрцберг И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэронаука.—1976.—16, № 4.—С. 666—673.
10. Кнут Р., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Высыпание энергичных частиц во время бухтообразного возмущения среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэронаука.—1977.—17, № 5.—С. 854—861.
11. Лаштовичка Я., Федорова Н. И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпускулярного происхождения // Геомагнетизм и аэронаука.—1976.—16, № 6.—С. 1018—1025.
12. Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука, 1983.—192 с.
13. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. — М.: Мир, 1977.—370 с.
14. Черногор Л. Ф. Возмущение неоднородной структуры в нижней ионосфере под действием мощного радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика.—1985.—28, № 12.—С. 17—26.
15. Черногор Л. Ф. Высыпание электронов из магнитосферы, стимулированное затмением Солнца // Радиофизика и радиоастрономия.—2000.—5, № 4.—С. 371—375.
16. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
17. Belrose J. S., Burke M. J. Study of the lower ionosphere using partial reflection. 1. Experimental technique and method of analysis // J. Geophys. Res.—1964.—69, N 13.—P. 2799—2818.
18. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms. A review // Space Sci. Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
19. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude

- lower ionosphere // Радиопизика и радиоастрономия.—1998.—3, № 2.—С.191—197.
20. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F. On the possibility of energetic particle precipitation from the magnetosphere into the middle latitude ionosphere // Ann. Geophys. Part III. Space and Planetary Sciences.—1998.—Supplement I.—Vol 16.—P. 839.
21. Danilov A. D., Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Int. J. Geomagnet. and Aeronomy.—1999.—1, N. 3.
22. Feldman W. C., Symbalysty E. M. D., Roussel-Dupre R. A. Hard X ray survey of energetic electrons from low-Earth orbit // J. Geophys. Res.—1996.—101.—P. 5195—5209.
23. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Experimental investigations of the middle latitude D-region ionosphere responding to events related to proton precipitations // Telecommun. and Radio Engineering.—2002.—57, N 10—11.—P. 110—122.
24. Gokov A. M., Tyrnov O. F. Some peculiarities of the lower ionosphere dynamics, caused by the morning solar terminator // J. Atmos. Electricity.—2002.—22, N 1.—P. 13—21.
25. Gurevich A. V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. — New York: Springer-Verlag, 1978.—366 p.
26. Hargreaves J. K. The Upper Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics. An introduction to the aerospace environment. — Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., 1979.—352 p.
27. Hargreaves J. K. The Solar-Terrestrial Environment. — New York: Cambridge Univ. Press, 1992.—420 p.
28. Lastovicka J. Effects of Geomagnetic Storms in the Lower Ionosphere. Middle Atmosphere and Troposphere // J. Atmos. and Terr. Phys.—1996.—58.—P. 831—843.
29. Tyrnov O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., et al. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere // Turk. J. Phys.—1994.—18.—P. 1260—1265.

ELECTRON DENSITY VARIATIONS IN THE IONOSPHERIC D REGION AT MID-LATITUDES DURING MAGNETIC STORMS

A. M. Gokov, L. F. Chernogor

Our results of electron density measurements made by the partial reflection radar in the ionospheric D region at mid-latitudes during eleven magnetic storms are presented. The response of the D region to magnetic storms at their onset and during the recovery phase is considered. Quasi-periodic increases in the D-region electron density by more than 50—100 % are revealed to last for tens of minutes with the periods $T \geq 30$ —60 min. The ionization rates are estimated, and the parameters of the energetic particle fluxes are calculated.

УДК 550.385:550.388

О. В. Лазоренко¹, С. В. Лазоренко², Л. Ф. Черногор³

¹Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

²Міжнародний Слов'янський університет, Харків

³Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків

Вейвлет-анализ в задачах физики геокосмоса

Надійшла до редакції 28.02.05.

Вейвлет-анализ та анализ Фур'є разом застосовано для розв'язання задач фізики геокосмосу. Досліджено характер часових варіацій сонячної активності, що описується числами Вольфа. Аналогічні дослідження проведено для часових варіацій D_{st} -індексу за період з 1957 до 2001 рр. та часових варіацій сигналів магнітометра-флюксометра Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (1999—2003 рр.). Вейвлет-анализ представлено неперервним вейвлет-перетворенням, а традиційний фур'є-анализ — динамічними спектрами. Оцінено параметри збурень, що виникають у навколосемному та космічному просторах. Продемонстровано високу ефективність вейвлет-анализу. Відзначено взаємну доповнюваність методів фур'є- та вейвлет-анализу.

ВВЕДЕНИЕ

Вейвлет-анализ как новый математический аппарат сформировался в 1980—1990-е гг. Наибольший вклад в его развитие внесли Малл, Морле, Добеши, Койфман, Стомберг, Лемарье и другие исследователи (см. [22, 27]). Одним из источников вейвлет-анализа, по мнению ряда специалистов, является теория атомарных функций, разработанная отечественными учеными В. Л. Рвачевым, В. А. Рвачевым, В. Ф. Кравченко и их учениками (см., например, [14, 18]). Способствовали широкому применению вейвлет-анализа также работы [1] и [7], посвященные соответственно основам непрерывного и дискретного вейвлет-преобразований. Теоретические вопросы построения базисов вейвлетов обсуждаются в работах [13, 17], а основы практического применения вейвлет-анализа, по нашему мнению, наиболее удачно изложены в книге [8].

Основная идея вейвлет-анализа состоит в разложении исследуемой функции по системе базисных функций, обладающих специальными свойствами, в частности хорошей локализацией во временной области. Первоначально вейвлет-анализ рассматривался как альтернатива традиционному анализу Фурье, однако со временем стало очевидно, что эти два метода хорошо дополняют друг друга, и их выгодно применять одновременно. В задачах физики геокосмоса вейвлет-анализ используется сравни-

тельно недавно (см., например, [2, 3, 5, 6, 9—12, 15, 16, 19—21, 23—26, 28]), и исследования в данной области по-прежнему остаются актуальными. Можно надеяться, что с использованием вейвлет-анализа удастся получать дополнительную информацию об особенностях вариаций временных рядов, описывающую эволюцию процессов в геокосмосе.

Целью работы является: разработка формата и проведение вейвлет-анализа совместно с фурье-анализом рядов чисел Вольфа, D_{st} -индекса, а также D - и H -составляющих магнитного поля Земли.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для исследований взяты следующие экспериментальные данные. Во-первых, временной ряд чисел Вольфа с 1749 по 2004 гг., которые характеризуют солнечную активность (шаг измерений $T_0 = 1$ мес). Во-вторых, временной ряд D_{st} -индекса (<http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst1/final.html>) с 1957 по 2001 гг. (шаг измерений $T_0 = 1$ ч). Его вариации описывают основные особенности геомагнитных бурь и, в первую очередь, параметры кольцевого тока [9]. В-третьих, временные зависимости D - и H -компонентов магнитного поля Земли, полученные с помощью магнитометра-флюксометра кафед-

ры космической радиофизики Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина с 1999 по 2003 г. (шаг измерений $T_0 = 0.5$ с), который подробно описан в работе [3].

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В качестве методов анализа в работе используются классические одномерное и двумерное (динамическое) преобразования Фурье, а также непрерывное вейвлет-преобразование.

Одномерное преобразование Фурье состоит в построении для временной функции сигнала $s(t)$ функции спектральной плотности $\dot{S}(\omega)$ на основе прямого преобразования Фурье [8]:

$$\dot{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{i\omega t} dt. \quad (1)$$

Для дискретного сигнала $s(t)$ интеграл (1) заменяется конечной суммой, которую удобно вычислять с помощью программ MathCad 2003 или MATLAB 6.5. Одномерное преобразование Фурье имеет тот недостаток, что полученная функция спектральной плотности $\dot{S}(\omega)$ принципиально не обеспечивает разрешения во временной области, аналогично тому, как исходный сигнал $s(t)$ не несет информации о частотном спектре.

Оконное преобразование Фурье [30], задаваемое выражением

$$\dot{S}(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)w(t - \tau)e^{-i\omega t} dt, \quad (2)$$

позволяет одновременно исследовать полученную функцию спектральной плотности $\dot{S}(\omega, \tau)$ как в частотной, так и во временной области. Однако его недостаток состоит в наличии постоянного (неадаптивного) частотно-временного окна $w(t)$, которое имеет одинаковую ширину в области как больших, так и малых ω . Оценка интеграла (2) в работе проводилась с использованием стандартных методов из состава MATLAB 6.5. Для удобства анализа в полученных $\dot{S}(\omega)$ и $\dot{S}(\omega, \tau)$ частота ω заменялась на соответствующий период $T = 2\pi/\omega$.

В основе непрерывного вейвлет-преобразования [1, 7, 8, 13, 17, 22, 27, 30] сигнала $s(t)$ лежит соотношение

$$W(a, b) = \frac{1}{a^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

где $\psi(t)$ — вейвлет-образующая функция, из которой с помощью переносов (b — параметр сдвига) и

масштабных преобразований (a — параметр масштабирования) строится базис вейвлетов, по которому и раскладывается сигнал $s(t)$.

Основными свойствами вейвлетов являются локализация, нулевое среднее и автомодельность базиса [1, 7, 30]. Вейвлет должен быть локализован как во времени, так и по частоте.

Вейвлет имеет нулевое среднее:

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^m \psi(t) dt = 0,$$

$$m = 1, 2, \dots$$

В зависимости от величины m вейвлет принято называть вейвлетом m -го порядка. При $m = 0$ получается так называемое условие осцилляций или знакопеременности.

Вейвлет должен обладать свойством ограниченности:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty.$$

Характерным признаком базиса вейвлет-преобразования является его *автомодельность*, так как все базисные функции получены с помощью масштабных преобразований и сдвигов из одного и того же исходного вейвлета.

Функция $W(a, b)$ называется вейвлет-спектром сигнала $s(t)$. Анализ $W(a, b)$ позволяет судить о частотно-временных особенностях сигнала. В отличие от динамического преобразования Фурье, вейвлет-преобразование имеет адаптивное частотно-временное окно, которое оказывается достаточно узким во времени (по параметру b) для малых a (что соответствует большим частотам ω) и широким — для больших a (что соответствует малым ω). Благодаря этому свойству вейвлет-преобразование иногда называют «математическим микроскопом» [8, 27, 30]. Между параметрами a , b и ω , τ есть простая связь: $b = \tau$, $a = kT = 2\pi k/\omega$, где $k > 0$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбранной функции $\psi(t)$. Например, для используемого в работе вейвлета Добеши четвертого порядка $k \approx 0.714$. Непрерывное вейвлет-преобразование в работе производилось с помощью пакета Wavelet Toolbox 2.2 из состава MATLAB 6.5.

Кроме анализа вейвлет-спектров $W(a, b)$, полезным оказывается рассмотрение скелетонов и скалограмм [1, 7, 8, 22, 27]. Скелетоном называется двумерная картина линий, соединяющих отдельно локальные максимумы и локальные минимумы вейвлет-спектра $W(a, b)$. Некоторые исследователи [27] считают, что в скелетоне заключена вся информация об исследуемом сигнале. Для практического анализа скелетонов полезны характерные примеры, приведенные в работах [1, 27].

Скалограммой называется интеграл вида:

$$W(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W(a, b)|^2 dt.$$

Локальные максимумы на скалограмме отвечают колебаниям, вносящим наибольший вклад в исследуемый процесс. Как правило, изучение скалограммы дополняет информацию, содержащуюся в вейвлет-спектре $W(a, b)$ [27].

Вейвлет-анализ открывает уникальные возможности при изучении фрактального поведения временных рядов. В работах [7] и [21] показано, что вычислив высшие моменты Z_q на разных масштабах a :

$$Z_q(a) = \sum_b |W(a, b)|^q, \quad (4)$$

можно определить фрактальные свойства исследуемого процесса. В соотношении (4) суммируются максимальные значения $|W(a, b)|$ при фиксированном a . Для фрактального процесса

$$Z_q(a) \sim 2^{a[\tau(q)+q/2]},$$

откуда

$$\log_2 Z_q(a) \sim a[\tau(q) + q/2]. \quad (5)$$

Необходимым условием фрактальности процесса [7, 8] является линейная зависимость $\log_2 Z_q$ от параметра масштабирования a . Если это требование выполняется, то зависимость $\tau(q)$ определяет, является ли данный процесс монофрактальным или мультифрактальным. Монофрактальные процессы характеризуются одним значением размерности, а мультифрактальные — целым их набором, а в общем случае — непрерывным спектром таких размерностей, называемых обобщенными фрактальными размерностями. В работе [29] показано, что функция $\tau(q)$ позволяет определить обобщенные фрактальные размерности d_q :

$$d_q = \frac{\tau(q)}{q-1}.$$

При $q = 0$ значение d_q совпадает со значением фрактальной размерности, называемой также емкостью. При $q = 1$ говорят об информационной размерности, при $q = 2$ — о корреляционной размерности, а при $q > 2$ — о корреляционных размерностях высших порядков. Функция $\tau(q)$ является убывающей функцией своего аргумента. Производная функции $\tau(q)$ равна локальной фрактальной размерности a :

$$\alpha(q) = \frac{d\tau}{dq}.$$

Очевидно, что для монофракталов все указанные значения размерностей совпадают ($\alpha = d_q = \text{const}$), и $\tau(q)$ имеет вид прямой, а для мультифракталов зависимость $\tau(q)$ оказывается нелинейной. Следовательно, по виду функции $\tau(q)$ можно отличить монофрактал от мультифрактала. Для мультифрактала можно указать интервал локальных размерностей $\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$, где $\alpha_{\max} = d_{-\infty}$, $\alpha_{\min} = d_{+\infty}$.

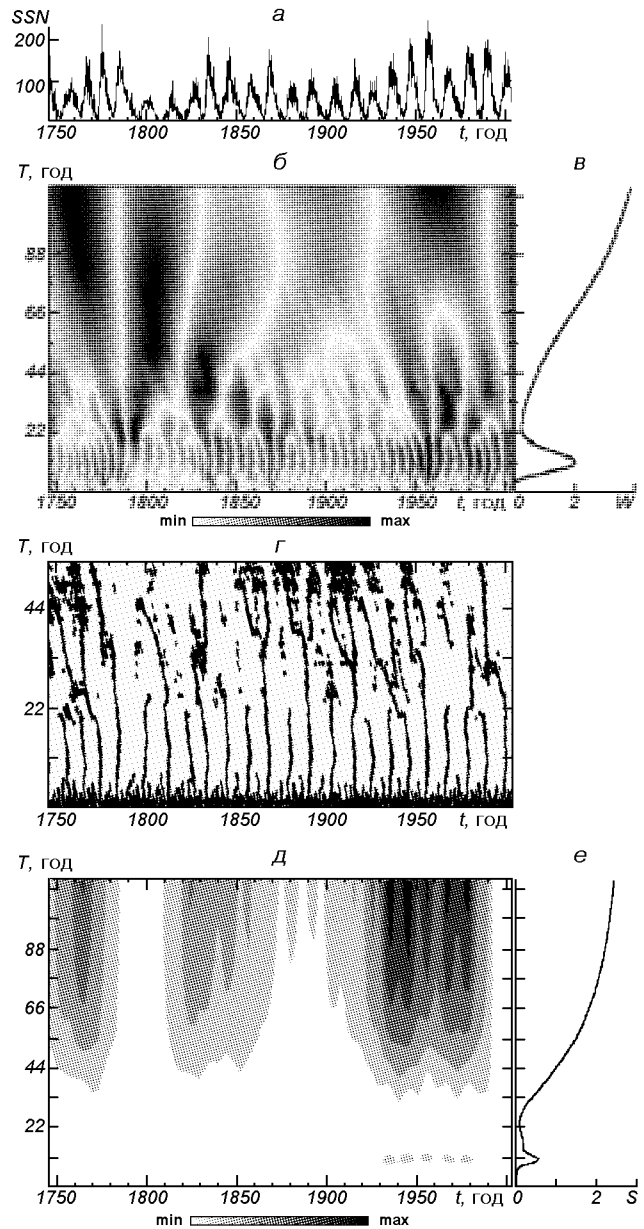


Рис. 1. Анализ чисел Вольфа (1749—2004 гг.): *a* — числа Вольфа во временной области, *b* — непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, *в* — скалограмма, *г* — скелетон, *д* — спектрограмма оконного преобразования Фурье, *е* — одномерный фурье-спектр

Таким образом, для каждого исследуемого временного ряда имеет смысл получать $S(\omega)$, $S(\omega, \tau)$, $W(a, b)$, скелетон и скалограмму. Для удобства все эти характеристики вместе с $s(t)$ целесообразно приводить на одном рисунке.

В настоящей работе для вейвлет-анализа использовался вейвлет Добеши четвертого порядка (db4). Авторы не ставили перед собой задачу выбора оптимального вейвлета. Тем не менее, использование db4 обусловлено фрактальными свойствами данного вейвлета, какими не обладают вейвлеты Морле, МНАТ и другие.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Результаты анализа временного ряда чисел Вольфа от 1749 до 2004 г. приведены на рис. 1. Как и следовало ожидать, четко проявили себя возмущения с периодами $T_1 \approx 11$ лет и, по всей видимости, $T_2 \sim 100$ лет. Особенно четко виден 11-летний цикл на скелетоне (рис. 1, в) в виде максимума $W(T)$ и на скалограмме (рис. 1, г) в виде серии вертикальных полос, середина которых приходится примерно на $T_1 \approx 11$ лет. На рис. 1, д и е также хорошо наблюдаются оба характерных периода колебаний. Однако временная локализация на рис. 1, д выражена хуже.

Временной ряд D_{st} -индекса был проанализирован на интервале от 1957 до 2001 г. (рис. 2). Скалограмма (рис. 2, в) показывает наличие процессов с периодами $T_1 \approx 11...12$ лет, $T_2 \approx 3...4$ г., а скелетон (рис. 2, г) — еще и процесса $T_3 \approx 1$ г. Первый и второй процессы заметны на рис. 2, д и е. Также следует отметить фрактальные свойства рассматриваемого временного ряда, о наличии которых свидетельствуют рис. 2, б и д. Как и в случае временного ряда чисел Вольфа, в целом ряд D_{st} -индекса не является фрактальным. Однако в отдельных диапазонах a , где зависимости $\log_2 Z_q(a)$ от a можно считать линейными, наблюдаемые процессы носят фрактальный характер. В каждом из диапазонов зависимость $\tau(q)$ не является строго линейной, а значит, и сами процессы оказываются не монофрактальными, а мультифрактальными. Локальные фрактальные размерности каждого из процессов лежат в диапазоне от α_{\min} до α_{\max} .

Таковыми диапазонами являются $a \approx 11...17$ ($T \approx 0.9...1.3$ г., $\alpha \approx 0.43...0.53$), $a \approx 20...30$ ($T \approx 1.5...2.4$ г., $\alpha \approx 0.45...0.61$), $a \approx 30...50$ ($T \approx 2.4...4.0$ г., $\alpha \approx 0.36...0.52$), $a \approx 60...100$ ($T \approx 4.8...7.9$ г., $\alpha \approx 0.50...0.51$), в среднем $\alpha_{av} \approx 0.5$.

Поскольку вариациям чисел Вольфа и D_{st} -индекса соответствует один и тот же период (около 11 лет), целесообразно также вычисление коэффициента взаимной корреляции соответствующих рядов.

На рис. 3 показаны результаты анализа чисел Вольфа на том же временном интервале, что и ряд D_{st} -индексов. На всех графиках четко проявляется

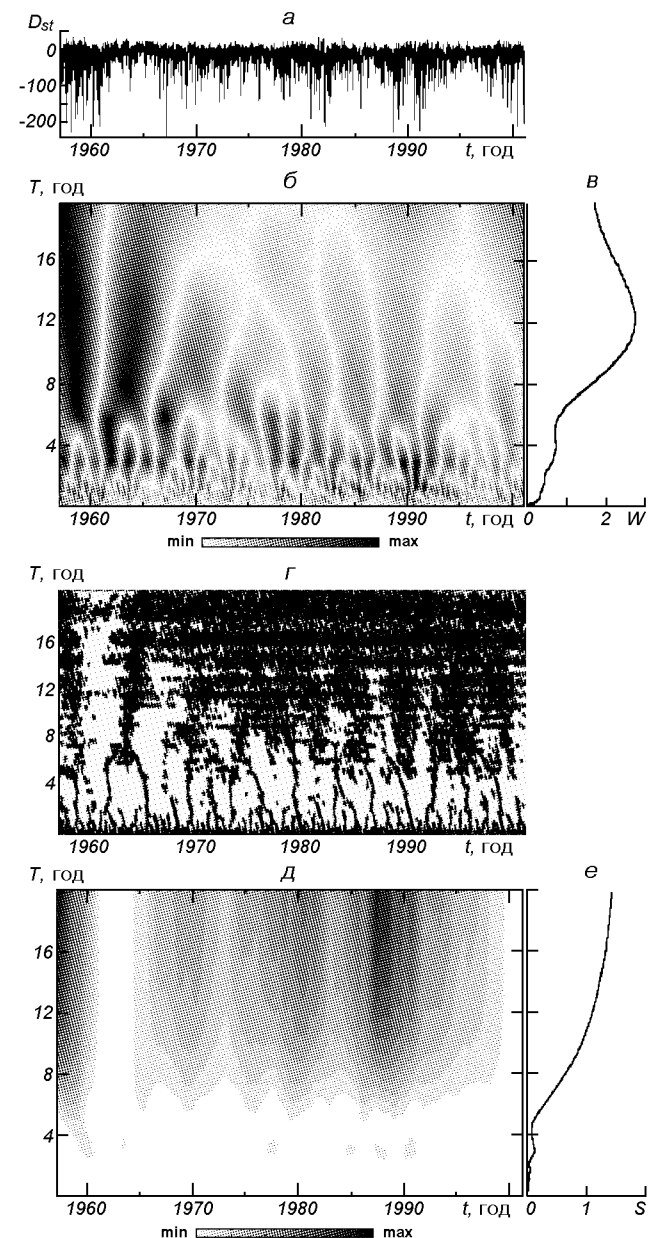


Рис. 2. Анализ D_{st} -индекса (1957—2001 гг.): а — индекс во временной области, б — непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, в — скалограмма, г — скелетон, д — спектрограмма оконного преобразования Фурье, е — одномерный фурье-спектр

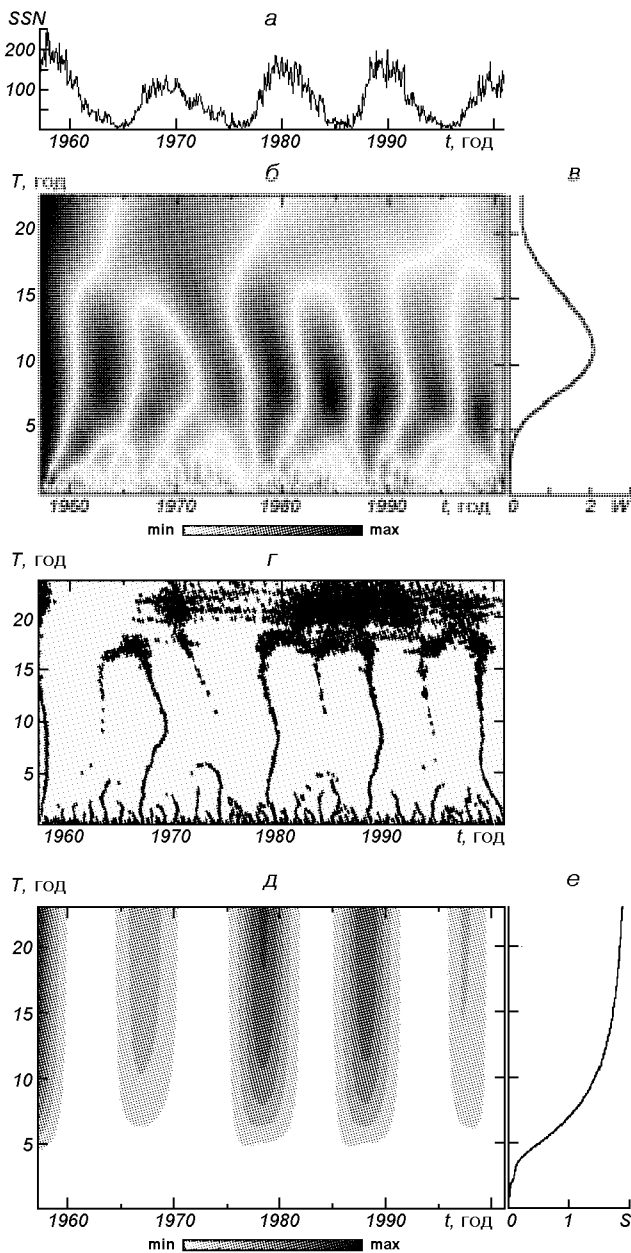


Рис. 3. Анализ чисел Вольфа (1957—2001 гг.): *a* — числа Вольфа во временной области, *б* — непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, *в* — скалограмма, *г* — скелетон, *д* — спектрограмма оконного преобразования Фурье, *е* — одномерный фурье-спектр

колебание $T_1 \approx 11$ лет, а на рис. 3, *б* и *г* хорошо видна фрактальная структура исследуемого сигнала. Установлено, что коэффициент корреляции между рядом чисел Вольфа и рядом D_{st} -индексов составляет $K \approx -0.25$. Знак при K , очевидно,

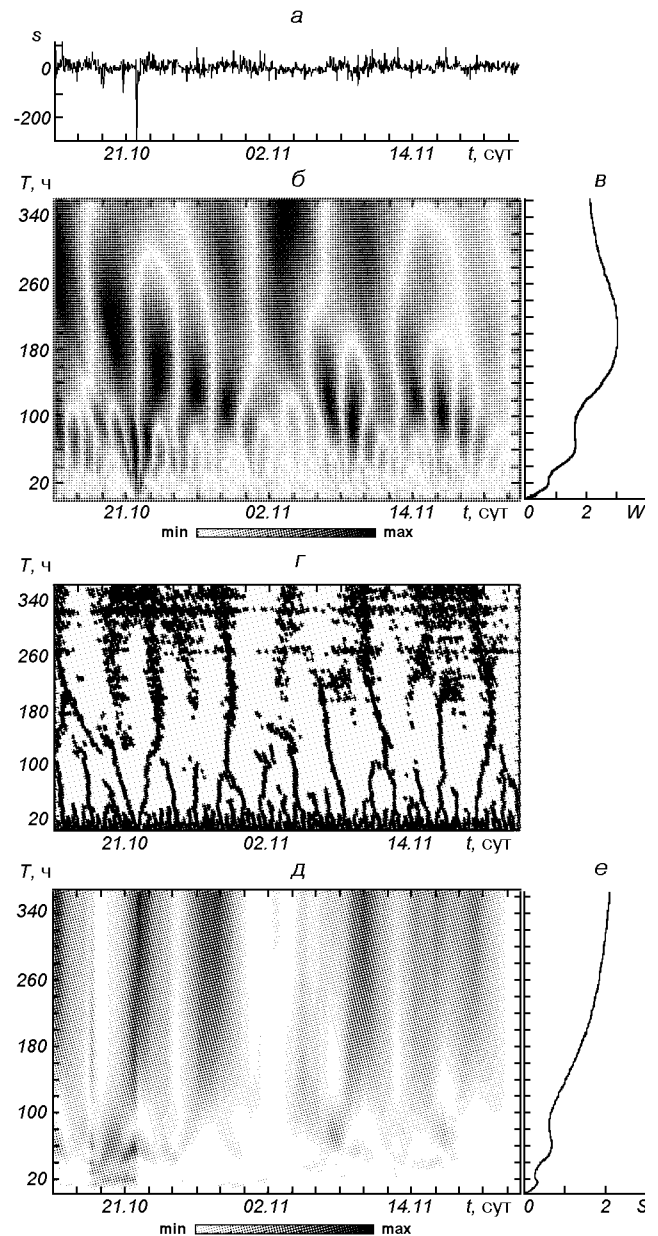


Рис. 4. Анализ D -составляющей магнитного поля (15.10.1999—22.11.1999 г.): *a* — D -составляющая магнитного поля во временной области, *б* — непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, *в* — скалограмма, *г* — скелетон, *д* — спектрограмма оконного преобразования Фурье, *е* — одномерный фурье-спектр

свидетельствует о том, что преобладают отрицательные значения D_{st} -индекса. Величина K статистически достоверна, она свидетельствует о том, что увеличению числа Вольфа примерно в 25 % случаев соответствует увеличение $|D_{st}|$. Это факт

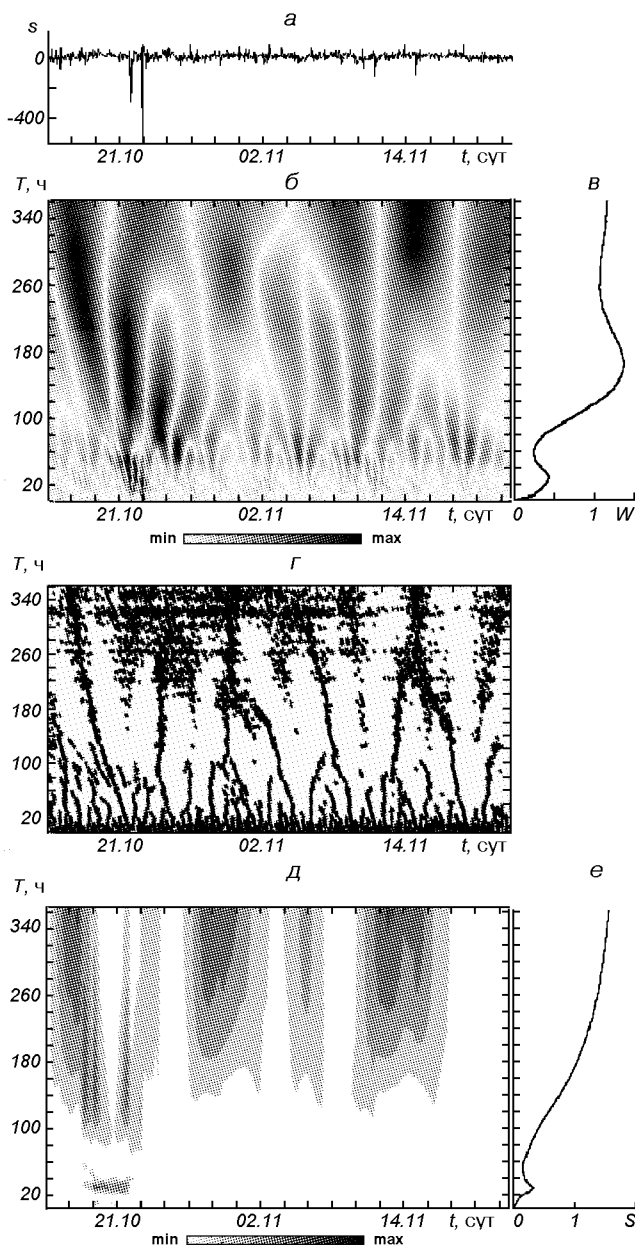


Рис. 5. Анализ H -составляющей магнитного поля (15.10.1999—22.11.1999 г.): a — H -составляющая магнитного поля во временной области, b — непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, $в$ — скалограмма, $г$ — скелетон, $д$ — спектрограмма оконного преобразования Фурье, $е$ — одномерный фурье-спектр

геофизикам известен: магнитные бури приходятся преимущественно на периоды, близкие к максимуму солнечной активности [25]. Заметим, что продолжительность этих периодов составляет около 3.5...4 г., т. е. около 25 % всего времени в одиннадцатилетнем цикле солнечной активности.

Кроме того, следует отметить, что судя по характерному ветвящемуся виду вейвлет-спектра (рис. 1, б, рис. 3, б) и скелетона (рис. 1, г, рис. 3, г), ряд чисел Вольфа может носить фрактальный характер. Временной ряд чисел Вольфа в целом не является фрактальным. Лишь в диапазоне $a \approx 20...100$ ($T \approx 1.8...8.8$ г.) процесс является мультифрактальным. Локальные фрактальные размерности этого процесса лежат в диапазоне от $\alpha_{\min} = 0.41$ до $\alpha_{\max} = 0.49$, т. е. также близки к $\alpha_{av} \approx 0.5$.

Рис. 4 и 5 посвящены анализу временных зависимостей D - и H -составляющих магнитного поля Земли с 15.10.1999 по 22.11.1999 г. Установлено, что для D -составляющей наблюдаются характерные колебания с периодами $T_1 \approx 24$ ч, $T_2 \approx 60...70$ ч, $T_3 \approx 180...220$ ч (рис. 4, в, г). Заметим, что на спектрах Фурье эти периоды колебаний практически не видны. Для H -составляющей выражены колебания с периодами $T_1 \approx 24$ ч, $T_2 \approx 150...170$ ч (рис. 5, в, г). Последний из них заметен также на рис. 5, д и е. Как и в случае чисел Вольфа и D_{st} -индексов, рассматриваемые временные ряды D - и H -составляющих магнитного поля Земли фрактальными не являются. Лишь в отдельных диапазонах имеет место фрактальность. Для D -составляющей процесс оказывается мультифрактальным при $a \approx 10...30$ ($T \approx 20...40$ ч). Локальные фрактальные размерности этого процесса лежат в диапазоне от $\alpha_{\min} = 0.48$ до $\alpha_{\max} = 0.54$. Для H -составляющей то же происходит при $a \approx 5...40$ ($T \approx 10...60$ ч) и от $\alpha_{\min} = 0.49$ до $\alpha_{\max} = 0.56$. Опять $\alpha_{av} \approx 0.5$.

Проведен также анализ вариаций D_{st} -индексов за тот же временной интервал, что и для составных магнитного поля (рис. 6). Выявлены колебания с характерными периодами $T \approx 180...200$ ч (рис. 6, в, г). Также обнаружены мультифрактальные процессы при $a \approx 170...200$ ($T \approx 235...275$ ч, $\alpha \approx 0.48...0.54$). Чаще всего α близко к 0.5.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты вейвлет- и фурье-анализов экспериментальных геофизических данных хорошо согласуются с данными работ [2, 5, 9—12, 16, 19—21, 23, 24, 28]. Так, в работе [28] также наблюдались возмущения ряда чисел Вольфа с периодами $T_1 \approx 11$ лет и $T_2 \approx 100$ лет. Первый цикл хорошо изучен, а что касается второго, то длина имеющейся реализации (порядка 250 лет) позволяет пока говорить лишь о возможности его существования.

В работе [9] во время магнитных бурь авторы обнаружили возмущения магнитного поля Земли с

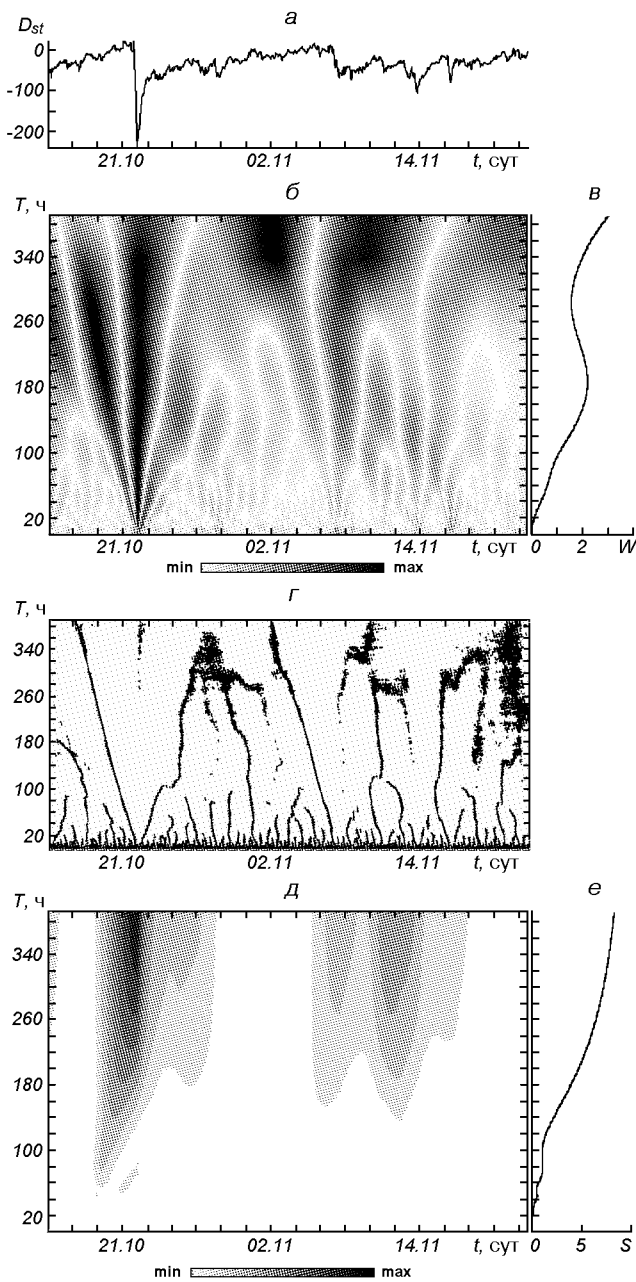


Рис. 6. Анализ D_{st} -индекса (15.10.1999—22.11.1999 г.): *a* — D_{st} -индекс во временной области, *б* — непрерывный вейвлет-спектр, полученный с использованием вейвлета db4, *в* — скалограмма, *г* — скелетон, *д* — спектрограмма оконного преобразования Фурье, *е* — одномерный фурье-спектр

периодами $T \approx 6...10$ ч и $T \approx 60$ ч. Последние были выявлены при анализе и нами для D -составляющей.

Отдельно следует обсудить результаты анализа фрактальных свойств процессов в геокосмосе, который был проведен с помощью непрерывного вейвлет-преобразования. Оказалось, что ни один из

рассмотренных рядов не является фрактальным в традиционном понимании. Однако в отдельных диапазонах масштабов a (а следовательно, и периодов возмущений T) указанные процессы обладают свойствами мультифрактальности. Подобный результат получен и в работе [20] при изучении особенностей временных рядов SV геомагнитного поля. Следовательно, большинство реальных процессов в геокосмосе обладают сложной фрактальной, точнее мультифрактальной структурой. Это свидетельствует, в частности, о сложности, многообразии и нелинейности упомянутых процессов. Поэтому наиболее адекватным средством, на наш взгляд, позволяющим изучать особенности таких процессов, является именно вейвлет-анализ. Методы, основанные на традиционном преобразовании Фурье, не могут предоставить такой возможности.

Последнее соображение может рассматриваться как возражение некоторым исследователям [31], считающим использование вейвлет-анализа в некоторых задачах геофизики, в частности, для исследования особенностей квази-двухсуточных вариаций f_0F_2 , неперспективным. Противопоставление возможностей методов вейвлет- и фурье-анализа, характерное для начала 1990-х г., в настоящее время сменилось концепцией взаимодополняемости этих методов, что, в частности, и продемонстрировано нами в данной работе.

ВЫВОДЫ

1. Продemonстрировано, что вейвлет-анализ в сочетании с фурье-анализом являются эффективными методами изучения процессов в геокосмосе. Эти методы анализа хорошо дополняют друг друга. Вейвлет- и фурье-преобразования предпочтительны при анализе соответственно быстроизменяющихся и достаточно плавных процессов.

Разработан формат представления результатов вейвлет- и фурье-анализов, который состоит из вида исследуемого сигнала во временной области, его вейвлет-спектра, скалограммы, скелетона, спектрограммы оконного преобразования Фурье и одномерного фурье-спектра. Формат рекомендуется для практического использования.

2. Показано, что большинство процессов в геофизике несут сложный динамический характер, не являясь фрактальными в традиционном понимании. В ограниченных диапазонах масштабов такие процессы обладают свойствами мультифрактальности.

3. Продemonстрированы возможности вейвлет-анализа при нахождении диапазонов мультифрактальности геофизических процессов и оценке спек-

тра их фрактальных размерностей. Знание последних важно для истолкования материалов наблюдений, для построения физико-математических моделей явлений в геокосмосе, которые часто оказываются сложнее, чем это представлялось ранее. Традиционные же методы фурье-анализа не позволяют получить информацию о фрактальных свойствах исследуемых процессов.

1. Астафьева Н. М. Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук.—1996.—166, № 11.—С. 1115—1170.
2. Безверхий В. А. Развитие метода вейвлет-преобразования для анализа геофизических данных // Изв. АН. Сер. Физика атмосферы и океана.—2001.—37, № 5.—С. 630—635.
3. Гармаш К. П., Лазоренко С. В., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Флуктуации электромагнитного поля Земли во время самой большой геокосмической бури 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 3.—С. 253—264.
4. Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 163—180.
5. Горбатенко В. П., Ипполитов И. И., Кабанов М. В. и др. Анализ структуры временных рядов повторяемости форм атмосферной циркуляции и грозовой активности // Оптика атмосферы и океана.—2002.—15, № 8.—С. 693—706.
6. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождающие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэронаука.—2003.—43, № 6.—С. 770—787.
7. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи физ. наук.—2001.—171, № 5.—С. 465—501.
8. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории — к практике. — М.: СОЛОН-Р, 2002.—448 с.
9. Иванов В. В., Ротанова Н. М. Вейвлет-анализ профиля магнитных аномалий, полученного по данным спутника МАГСАТ // Геомагнетизм и аэронаука.—2000.—40, № 2.—С. 78—83.
10. Иванов В. В., Ротанова Н. М., Ковалевская Е. В. Применение вейвлет-анализа к исследованию геомагнитных возмущений // Геомагнетизм и аэронаука.—2001.—41, № 5.—С. 610—618.
11. Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Логинов С. В. Применение вейвлет-преобразования для анализа межгодовых колебаний приземной температуры воздуха в Томске и солнечной активности // Оптика атмосферы и океана.—2001.—14, № 14.—С. 280—292.
12. Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Шотт Ж. Ж. Волновой геомагнитный отклик магнитосферы на подход к Земле межпланетного магнитного облака (14—15 июня 2000 г., «Bastille Day Event») // Геомагнетизм и аэронаука.—2003.—43, № 3.—С. 321—331.
13. Кравченко В. Ф., Рвачев В. А. «Wavelet»-системы и их применение в обработке сигналов // Зарубежная радиоэлектроника.—1996.—№ 4.—С. 3—20.
14. Кравченко В. Ф., Рвачев В. А., Рвачев В. Л. Математические методы обработки сигналов на основе атомарных функций // Радиотехника и электроника.—1995.—40, № 9.—С. 1385—1406.
15. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа к задаче обнаружения сверхширокополосных сигналов на фоне помех // Радиофизика и радиоастрономия.—2002.—7, № 1.—С. 46—63.
16. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа в задачах космической физики и космической радиофизики // Космічна наука і технологія. Додаток.—2003.—9, № 2.—С. 91—96.
17. Новиков И. Я., Стечкин С. Б. Основные конструкции всплесков // Фундаментальная и прикладная математика.—1997.—3, № 4.—С. 999—1028.
18. Рвачев В. Л., Рвачев В. А. Неклассические методы теории приближений в краевых задачах. — К.: Наук. думка, 1979.—350 с.
19. Рожной А. А., Клейменова Н. Г., Козырева О. В. и др. Ночные среднеширотные вариации параметров ДВ (40 кГц) сигналов и геомагнитные пульсации Pi3 // Геомагнетизм и аэронаука.—2003.—43, № 4.—С. 553—560.
20. Ротанова Н. М., Бондарь Т. Н., Иванов В. В. Временные изменения в вековых геомагнитных вариациях // Геомагнетизм и аэронаука.—2002.—42, № 5.—С. 708—720.
21. Ротанова Н. М., Бондарь Т. Н., Иванов В. В. Вейвлет-анализ вековых геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэронаука.—2004.—44, № 2.—С. 276—282.
22. Чуи К. Введение в вейвлеты: Пер. с англ. Я. М. Жилейкина. — М.: Мир, 2001.—412 с.
23. Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouel J.-L., Saracco G. Detection of geomagnetic jerks using wavelet analysis // J. Geophys. Res.—1995.—100.—P. 12557—12572.
24. Alperovich L., Zheludev V. Wavelet transform as a tool for detection of geomagnetic precursors of earthquakes // Phys. Chem. Earth.—1998.—23, N 9-10.—P. 965—967.
25. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms. A Review // Space Sci. Rev.—1999.—88.—P. 563—601.
26. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Lazorenko S. V. Wavelet Analysis and Ultra-Wideband signals // Radio Physics and Radio Astronomy.—2002.—7, N 4.—P. 471—474.
27. Daubechies I. Ten lectures on wavelets, CBMS-NSF conference series in applied mathematics. — SIAM Ed., 1992.—410 p.
28. Frick P., Galyagin D., Hoyt D., et al. Wavelet analysis of solar activity recorded by sunspot groups // Astron. and Astrophys.—1997.—328.—P. 670—681.
29. Holschneider A. Wavelets: an analysis tools. — Cambridge, 1995.—423 p.
30. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing: 2nd ed. — Academ. press, 1999.—671 p.
31. Mohino E., Heraiz M., Kazimirovsky E. Application of wavelet analysis to quasi-2-day oscillation occurrence in the time variations of f_0F2 // Internat. J. Geomagnetism and Aeronomy.—2003.—4, N 3.—P. 215—220.

WAVELET ANALYSIS IN PROBLEMS OF THE NEAR-TO-EARTH SPACE

O. V. Lazorenko, S. V. Lazorenko, L. F. Chernogor

Both wavelet analysis and Fourier analysis were applied to solve some problems of the near-to-Earth space physics. As an example an investigation of some properties of the solar activity time variations described by sunspot numbers was carried out with the use of these analyses. Similar investigations were performed for the time variations of the D_{st} -index from 1957 to 2001 and for the time variations of the Karazin Kharkiv National University magnetometer-fluxmeter signals from 1999 to 2003. The wavelet analysis is represented by the continuous wavelet transform and the traditional Fourier analysis is denoted by the dynamic spectra. The parameters of the disturbances appearing in the near-to-Earth space were estimated. High efficiency of the wavelet analysis was pointed out. The methods of the wavelet analysis and Fourier analysis were shown to be mutually complement.

A. Kotsarenko¹, O. Molchanov², R. Perez Enriquez¹,
J. A. Lopez Cruz-Abeyro¹, S. Koshevaya³, V. Grimalsky⁴

¹Centro de Geociencias en Juriquilla, UNAM, Apdo Postal 1-742, Centro Queretaro, Queretaro, Mexico, C. P. 76001, e-mail: kotsarenko@geociencias.unam.mx

²Institute of the Physics of the Earth, Moscow, Russia

³UAEM, Cuernavaca, Morelos, Mexico

⁴INAOE, Tonantzintla, P.O. 51&216, C.P. 72000, Puebla, Pue., Mexico

Possible seismogenic origin of changes in the ULF EM resonant structure observed at the Teoloyucan geomagnetic station, Mexico, 1999—2001

Received 26.09.04

The evolution of the ULF resonant structure observed at the Teoloyucan geomagnetic station is studied in a possible relation with seismic activity in Mexico in 1999—2001. Two resonant lines were observed in the H-component (linear polarization) in the frequency bands $f_{R2} = 10.2...11.1$ mHz and $f_{R2} = 13.6...14.5$ mHz, sometimes accompanied by satellite lines. The source of the observed resonances is possibly related with the geomagnetic location of the station (geomagnetic latitude $\lambda = 29.1^\circ$) and its proximity to the equatorial electrojet ($\lambda \approx 30^\circ$). An enhancement of the carrier frequency of both resonances in the period from one month to two weeks was found before the strongest EQs. Also, a depression of the resonant structure just a few days before and a few days after some EQs seems to be correlated with seismic activity.

INTRODUCTION

Geomagnetic monitoring of tectonically active areas has reported anomalous changes in the character of the geomagnetic field occurring before, during and after some earthquakes. In this respect, different theoretical models have been proposed about their origin, to be able to give a physical mechanism to explain the geomagnetic anomalies. Some of these studies emphasize the crustal origin of the source [8], and other argue on their ionospheric pertinence [6]. The analysis of the seismogenic geomagnetic emission depends strongly on the instrumental infrastructure available. In the case of a network of geomagnetic stations, the multi-station data set grants the possibility for analysis by means of different robust techniques, such as the location of the area of the geomagnetic disturbances [2], and for the separation of the geomagnetic field in its constituents by their statistical properties (for instance, Principal Compo-

nent Analysis [1]). In the case of only one station, the data set possibilities for the analysis are lower but some techniques like fractal analysis are still available to evaluate and recognize the anomalous character of the magnetic field that are produced by forthcoming earthquakes.

The aim of this study is to test a new methodology for analysis of the geomagnetic data collected at the Teoloyucan station in the period from 1999 to 2001, and to find out a possible correlation with strong earthquakes occurring during that period.

EXPERIMENT AND METHODOLOGY

The analyzed geomagnetic data were recorded at the Teoloyucan station (Central Mexico, geographic coordinates: $99^\circ 11' 35.735''$ W, $19^\circ 44' 45.100''$ N, 2280 m height). This station was equipped with a 3-component fluxgate magnetometer designed at UCLA,

Eight strongest earthquakes during 1999–2001 chosen for analysis

| Date | UT | Longitude | Latitude | M_s | Depth | D , km | k_s |
|-------------------|---------------------------------|-----------|----------|-------|-------|----------|--------|
| 15 June 1999 | 20 ^h 42 ^m | −97.51° | 18.18° | 7 | 69 | 262.74 | 54.736 |
| 21 June 1999 | 17 43 | −101.72 | 17.99 | 5.8 | 54 | 343.11 | 2.5107 |
| 30 September 1999 | 16 31 | −97.03 | 15.95 | 7.5 | 16 | 480.94 | 70.487 |
| 12 Mart 2000 | 03 44 | −99.29 | 20.1 | 4.1 | 5 | 41.034 | 1.2642 |
| 9 August 2000 | 11 41 | −102.66 | 17.99 | 6.5 | 16 | 427.86 | 9.8774 |
| 19 May 2001 | 23 21 | −105.72 | 18.27 | 6.5 | 20 | 736.4 | 4.0513 |
| 20 May 2001 | 04 21 | −105.12 | 18.64 | 6 | 12 | 663.35 | 1.2315 |
| 7 October 2001 | 21 39 | −100.16 | 16.98 | 6.1 | 10 | 322.53 | 5.9505 |

operating at 1 Hz sampling rate frequency, with a GPS system for data synchronization.

We analyzed the events with $M_s > 4$, concentrating on the eight earthquakes with the highest seismic indexes $k_s = 10^{0.75} \Phi_a M_s / 10D$ [4], where $\Phi_a \approx (1 + D/10^{M/2})^{-2.66}$ is an attenuation factor, M_s is the magnitude of the earthquake, D [km] is the distance from its epicenter to the station and occurred under quiet geomagnetic conditions (Table).

Recently, we performed an analysis of the continuous part of the geomagnetic spectra through two methods: a study of the spectral values $S_{H,D,Z}$ and their ratio S_Z/S_H as a part of the traditional analysis, and a study of the spectral ratio β for the fractal analysis [3]. In the line spectrum structure, we proved the existence of local geomagnetic pulsations possibly generated by a crustal source. In the present paper we extend our study of the line structure to the analysis of the resonance structure of the geomagnetic field and its possible connection with seismic activity.

The resonance structure of the geomagnetic field has been recently discovered for the data of the Teoloyucan magnetic station (paper in preparation). The ULF resonances have been observed in the H-component in the narrow frequency bands $f_{R2} = 10.2...11.1$ mHz and $f_{R2} = 13.6...14.5$ mHz (Fig. 1).

The resonance structure has a proper hourly character: it almost disappears during the period 10–18 UT (Fig. 2), and the central maximum is sometimes followed by higher and lower satellite lines (Fig. 1 and 2). The polarization of both resonances is practically linear, and no resonant line is observed either in Z- or D-components. In turn, no resonant lines were observed at the nearest to Teoloyucan (TEO) geomagnetic stations, such as Los Alamos (LAL), USA, and Jicamarca (JIC), Peru.

A very similar resonance structure was also observed at the Beijing (BJI) geomagnetic station, but it was not found at all even at the nearest to it Chinese station (situated at about 150 km from Beijing). The

frequency of the first resonant line observed at BJI was the same as that of Teoloyucan, but with an elliptical polarization. A possible explanation to this phenomenon could be that these stations, TEO and BJI, are located at about the same geomagnetic latitude $\lambda \approx 30^\circ$, which coincides with an equatorial electrojet displacement. In turn, the absence of a resonant structure at the station closest to the Beijing station suggests the presence of a channeling character of the observed phenomena. By that, it could be also a longitudinal Alfvén resonance, as the frequency $f = V_A / 2\pi R_Z$ for the values of Alfvén velocity $V_A = 400...600$ km/s, $f = 10...14$ mHz fits well with the observed values. Those resonances are expected but almost never observed because of very specific circumstances for their generation, though the transversal Alfvén resonances, or Ionospheric Alfvén Resonances (IAR) are studied quite well [5].

RESULTS AND DISCUSSION

The qualitative analysis of the temporal evolution of the resonant structure shows rather interesting tendencies.

Both resonances express a visible growth until approximately two weeks before two strongest EQs that occurred in June, 1999 (Fig. 3a). The same tendency is observed for the EQ that occurred at the end of September, with a higher degree of growth for both resonances.

Unfortunately, due to lack of data for the year 2000 (Fig. 3b), we are not able to analyze the strongest EQ of the year that occurred in August. However, we did obtain a noticeable growth at the resonant frequencies a week before the series of moderate EQs that occurred in February. Also, we notice that after the last EQ occurring in March both frequencies stabilize.

For the year 2001 we observe a growth of the second resonant frequency until about one week before the two strongest EQs occurring in May

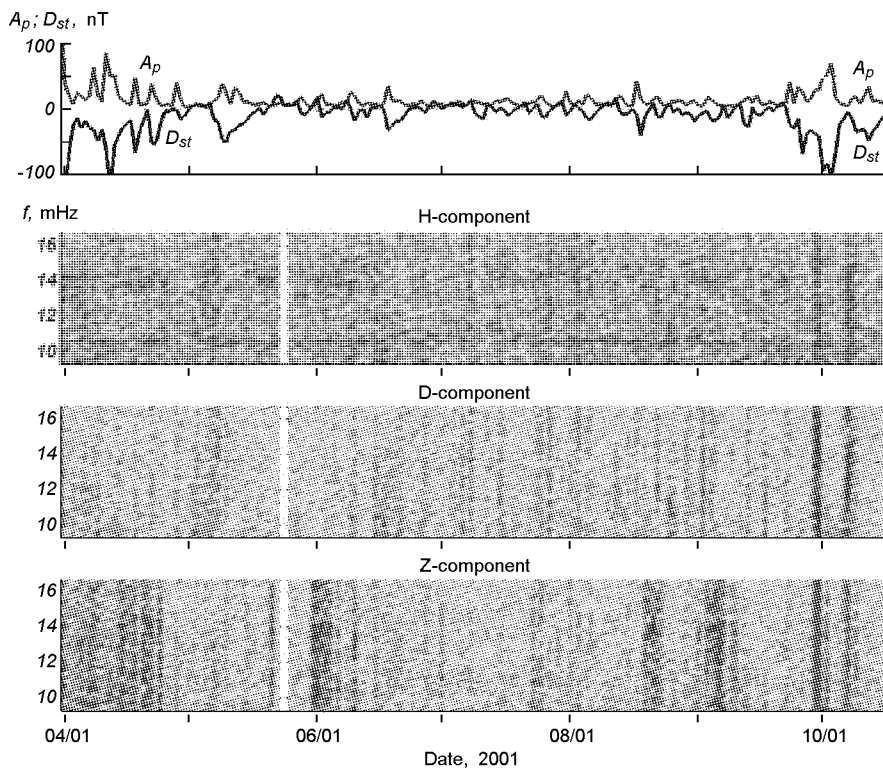


Figure 1. Observations of the ULF geomagnetic resonances structure in H-component, Teoloyucan station, 2001. Time interval 6:00—9:00 UT

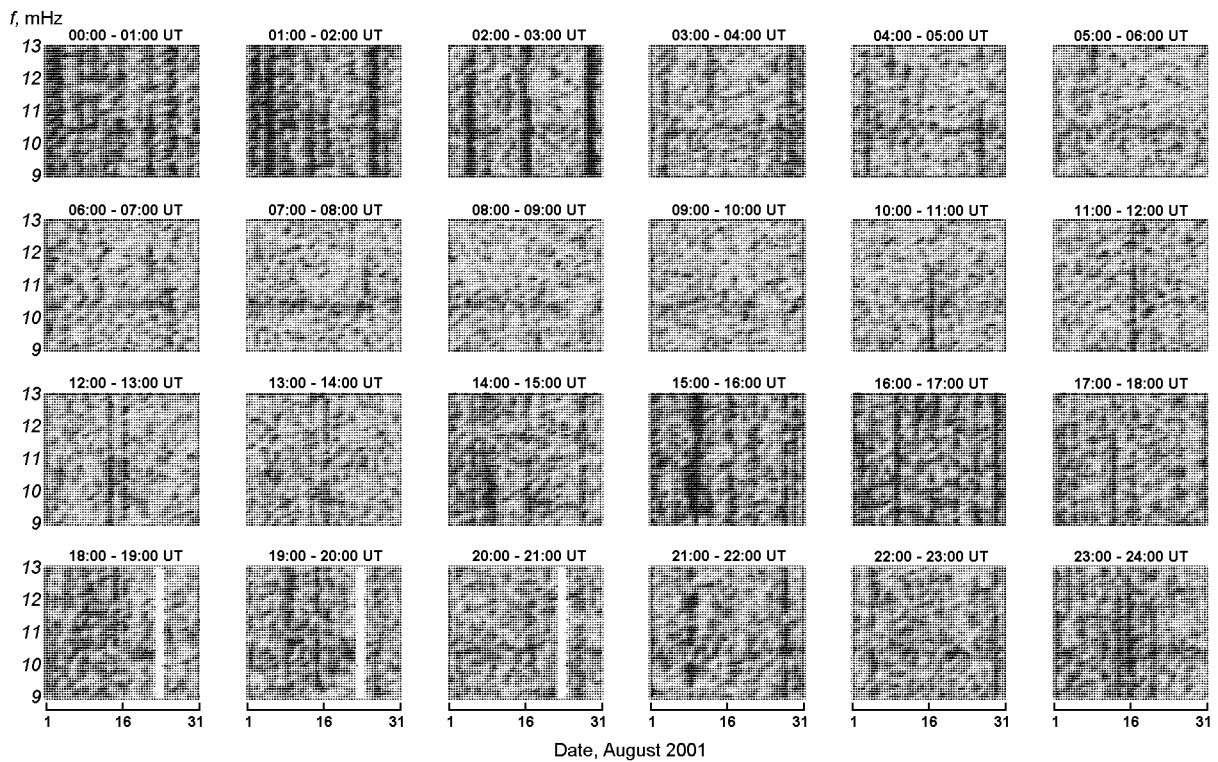


Figure 2. Appearance of the 1st resonant line in August, 2001, in the H geomagnetic component

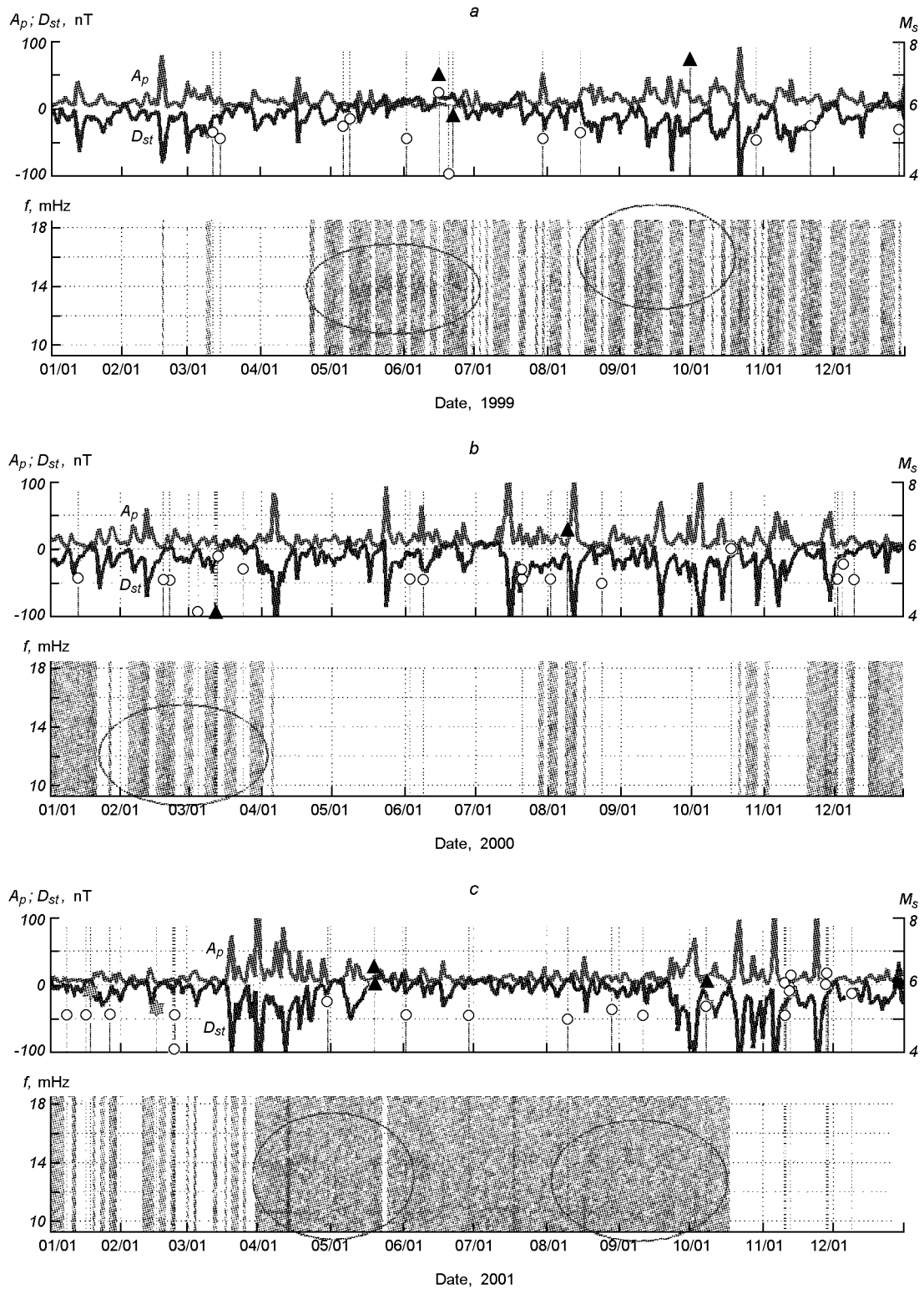


Figure 3. Values of A_p index, D_{st} index, and EQ magnitudes M_s (circles) in 1999 (a), 2000 (b), and 2001 (c). The EQs with the highest seismic indexes are marked by triangles. Lower panels: resonance structure observed in H-component

(Fig. 3c). Besides, there was a visible depression of the intensity of both resonant structures just a few days before the EQ occurring at the end of April, and some days after it. A similar depression mechanism but for geomagnetic pulsations was predicted by Sorokin et al. [7]. Another noticeable growth of the second resonant frequency was observed for the period starting about one month before the two strongest EQs occurring in October. The first resonance was not stable in this period, but its two lower satellite line frequencies increase just until the time that the first EQ occurs.

CONCLUSIONS

We studied the evolution of the ULF resonant structure observed at the Teoloyucan geomagnetic station in terms of a possible dependence with the strongest earthquakes occurring in Mexico from 1999 to 2001. The ULF resonance structure is observed in the H-component as two resonant packets (linear polarization) in the frequency bands $f_{R2} = 10.2\text{...}11.1$ mHz and $f_{R2} = 13.6\text{...}14.5$ mHz, with a certain hourly dependence. The probable reason of appearance of the resonant structure can be related to the proximity of the Teoloyucan station to the equatorial electrojet $\lambda \approx 30^\circ$. The temporal evolution of this structure shows a noticeable correlation with EQ activity: a growth of the frequency of both resonances in the period of one month to two weeks before the strongest EQs, and a depression of the resonant structure just few days before and few days after some EQs. A more detailed analysis of the observed phenomena will be done in the near future.

1. Hattori K., Serita A., Gotoh K., et al. ULF geomagnetic anomaly associated with 2000 Izu islands earthquake swarm, Japan // *Physics and Chemistry of the Earth*.—2004.—129.—P. 425—436.
2. Ismaguilov V. S., Kopytenko Yu. A., Hattori K., et al. ULF magnetic emissions connected with under sea bottom earthquakes // *Natural Hazards and Earth System Sciences*.—

2001.—1.—P. 23—31.

3. Kotsarenko A., Perez R. Enriquez, Lopez Cruz-Abeyro J. A., et al. Analysis of the ULF electromagnetic emission related to seismic activity, Teoloyucan geomagnetic station, 1998—2001 // *Natural Hazards and Earth System Sciences*.—2004.—4.—P. 679—684.
4. Molchanov O. A., Schekotov A. Yu., Fedorov E., et al. Preseismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka // *Natural Hazards and Earth System Sciences*.—2003.—3.—P. 203—209.
5. Molchanov O. A., Schekotov A. Yu., Fedorov E., Hayakawa M. Ionospheric Alfvén resonance at middle latitudes: results of observations at Kamchatka // *Physics and Chemistry of the Earth*.—2004.—29.—P. 649—655.
6. Pulinets S., Boyarchuk K. *Ionospheric precursors of Earthquakes*. — Springer, 2005.—316 p.
7. Sorokin V., Fedorov E., Schekotov A., et al. The model of seismic related depression of the ULF geomagnetic pulsations // *Geophys. Research Abstracts*.—2003.—5, 30, 1.
8. Surkov V. V., Molchanov O. A., Hayakawa M. Pre-earthquake ULF electromagnetic perturbations as a result of inductive seismomagnetic phenomena during microfracturing // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.*—2003.—65, N 1.—P. 31—46.

ІМОВІРНА СЕЙСМОГЕНІЧНА ПРИРОДА ЗМІН В УЛЬТРАНИЗЬКОЧАСТОТНІЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІЙ РЕЗОНАНСНІЙ СТРУКТУРІ, СПОСТЕРЕЖЕНІЙ НА ТЕОЛЮКАНСЬКІЙ ГЕОМАГНІТНІЙ СТАНЦІЇ В МЕКСИЦІ ПРОТЯГОМ 1999—2001 РР.

А. Коцаренко, О. Молчанов, Р. Перес Енрікес,
Х. А. Лопес Крус-Абейро, С. Кошева, В. Гримальський

Еволюцію ультранизькочастотної резонансної структури, яку спостерігали на Теолоюканській геомагнітній станції, досліджено в контексті її можливого зв'язку із сейсмічною активністю в Мексиці протягом 1999—2001 рр. Зафіксовано дві резонансні лінії в Н-компоненті (лінійна поляризація) у частотних смугах $f_{R2} = 10.2\text{—}11.1$ мГц та $f_{R2} = 13.6\text{—}14.5$ мГц, біля яких інколи є лінії-супутники. Імовірно, що джерело спостережених резонансів пов'язане з геомагнітним розміщенням станції (геомагнітна широта $\lambda = 29.1^\circ$) і з її близькістю до екваторіального електроджета ($\lambda \sim 30^\circ$). Перед найсильнішими землетрусами виявлено збільшення несучої частоти обох резонансів за період один місяць — два тижні. До того ж, депресія резонансної структури за декілька днів перед і через кілька днів після деяких землетрусів, мабуть, корелює із сейсмічною активністю.

V. Grimalsky¹, S. Koshevaya², A. Kotsarenko³,
V. Malnev⁴, D. Juarez²

¹National Institute for Astrophysics, Optics, and Electronics (INAOE), Z.P. 72000, Puebla, Mexico

²Autonomous University of Morelos (UAEM), Faculty of Chemistry, CIICAp, Z.P. 62210, Cuernavaca, Mor., Mexico

³UNAM, Center of Geoscience, Juriquilla 1-742, ZP.76230, Que., Mexico

⁴Kyiv National Shevchenko University, Ukraine

Passage of the acoustic waves caused by seismic and volcano activity through the lithosphere into the ionosphere

Received 24.03.95

During earthquakes and strong underground explosions the nonlinear passage of the acoustic waves takes place through the lithosphere into the ionosphere, which is analyzed in this paper. This nonlinear passage occurs due to nonlinear elastic modules of the lithosphere and hydrodynamic nonlinearity of the atmosphere. The waves are excited by underground sources under earthquakes. The acoustic wave propagation going almost vertically upwards causes a change of their spectrum. A wide spectrum of the acoustic waves fill the radio wave range, caused by fracturing of the rock in the surface, was observed by means of satellite measurements and radio telescope investigation of meteor bombing of the Moon. If the fracture occurs at deep depths, high frequencies due to nonlinear interaction transform into very low and extremely low frequency waves. Very low and extremely low elastic displacement waves achieve the Earth's surface and excite the response in seismograms. Acoustic waves move through the atmosphere into the ionosphere, and this causes changing their spectrum. More than 100 higher harmonics are excited. Excitation and passage of acoustic waves produce ELF and ULF waves in the atmosphere, as a result of the nonlinear transform and diffraction of waves.

1. INTRODUCTION

It is very important to investigate the mechanisms of the energy flows from the lithosphere into the atmosphere and the ionosphere caused by natural hazards (seismic and volcano activity, for example experiment MASSA [1—7]). All mechanisms possess different precursors [2] due to three basic channels of the lithosphere-ionosphere coupling, namely, electromagnetic, geochemical, and acoustic ones [3].

The acoustic channel of the lithosphere-ionosphere coupling seems to be quite effective. This takes place due to atmospheric acoustic waves excited by fluctuations of the terrestrial surface [6]. This channel manifests in different phenomena [7], like exciting the plasma waves and a periodic structure in the

ionosphere, the increasing transparency for radio waves, linear and nonlinear generation of magnetic perturbations, oscillation of E-F-layers in the ionosphere caused by acoustic and acoustic-gravity waves, nonlinear change of the spectrum of waves in the atmosphere, ionosphere, and lithosphere [7—12]. The last-named case is analyzed below.

2. MODELLING OF PASSAGE OF ACOUSTIC WAVES IN THE LITHOSPHERE

The geometry of the model is shown in Fig. 1. The cylindrical surface is around the source of underground seismic explosion (or plate deformation). After that a seismic acoustic burst-like envelope, of a finite

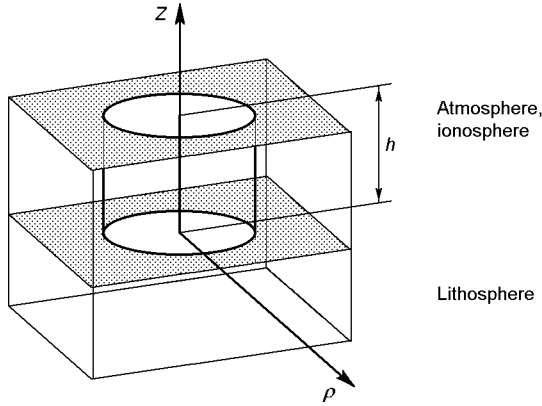


Figure 1. The geometry of the model for the nonlinear passage of acoustic waves caused by underground fracturing through the lithosphere, atmosphere, and ionosphere

transverse scale, of the generated waves begins its passing through the Earth. It is possible to use the theory of elasticity with nonlinear modules, where damping the waves and their diffraction are taken into account. The elasticity theory for the case of the Earth's crust as isotropic uniform medium results in the following equations for the mechanic displacement:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} = & \nabla \{ (S_1^2 - S_1^2) \cdot \text{div} \mathbf{U} \} + \\ & + S_1^2 \cdot \Delta \mathbf{U} + \Gamma(z) \frac{\partial}{\partial t} \Delta \mathbf{U} + B(z) \nabla \{ (\text{div} \mathbf{U})^2 \}, \end{aligned} \quad (1)$$

where $\Gamma(z)$ and $B(z)$ describe the viscosity and nonlinearity coefficient of the elastic isotropic transversely uniform medium in the cylindrical geometry for the acoustic waves with longitudinal and transverse velocities S_1 and S_1 , respectively. If it is possible to neglect the derivatives from S_1 we take into account only a dependence of diffraction coefficient $\Gamma(z)$ on the coordinate z in which the waves pass. The condition of neglecting the derivative of the sound velocity dS_1/dz in Eq. (1) is $|dS_1/dz| \approx l_n^{-1} S_1 \ll k S_1$, where $l_n \sim 1$ km is the scale of the vertical variation of S_1 , $k = \omega/S_1 \sim 200$ km⁻¹ is the wave number of the ELF acoustic wave at the frequency $\omega \sim 1000$ s⁻¹. In another words, this condition is $kl_n \gg 1$ and is here well satisfied.

Rewrite Eq. (1) by the components. The projection on the axis Z is:

$$\frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} \approx (S_1^2 - S_1^2) \left[\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 (\rho U_\rho)}{\partial z \partial \rho} \right] +$$

$$\begin{aligned} & + S_1^2 \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial U_z}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right\} + \Gamma(z) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right) + \\ & + B(z) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial U_z}{\partial z} \right)^2. \end{aligned}$$

It should be noted that the transverse profile is quite smooth. The transverse direction of the deformation is:

$$\frac{\partial^2 U_\rho}{\partial t^2} \approx (S_1^2 - S_1^2) \frac{\partial^2 U_z}{\partial \rho \partial z} + S_1^2 \frac{\partial^2 U_\rho}{\partial z^2}.$$

The variables z , ρ , and $\eta = t - \int_0^z \frac{dz'}{S_1(z')}$ are used. The method of slowly varying profile is applied so as this research is focused on the nonlinear evolution of a seismic acoustic burst-like envelope of a finite transverse scale in the cylindrical geometry.

For the ρ -component we obtain:

$$\frac{\partial^2 U_\rho}{\partial \eta^2} \left(1 - \frac{S_1^2}{S_1^2} \right) \approx - \frac{(S_1^2 - S_1^2)}{S_1} \frac{\partial^2 U_z}{\partial \rho \partial \eta}$$

or

$$\frac{\partial U_\rho}{\partial \eta} \approx -S_1 \frac{\partial U_z}{\partial \rho}.$$

Therefore, it is possible to exclude the transverse component.

For the z -component we have:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_z}{\partial z} - \frac{\Gamma(z)}{2S_1^3} \frac{\partial^2 U_z}{\partial \eta^2} + \frac{B(z)}{2S_1^4} \left(\frac{\partial U_z}{\partial \eta} \right)^2 - \\ - \frac{S_1}{2} \Delta_\rho \int_{-\infty}^{\eta} U_z(\eta') d\eta' = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

This is the equation of Khokhlov — Zabolotskaya [13]. Below we use, in non-dimensional form, the Eq. (2) with change $\Gamma(z) \rightarrow G(z)$ and $B(z) \rightarrow N(z)$ and introducing the diffraction coefficient D :

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial z} - G(z) \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} + N(z) \left(\frac{\partial U}{\partial \eta} \right)^2 - \\ - D \Delta_\rho \int_{-\infty}^{\eta} U_z(\eta') d\eta' = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

During modelling, the fast Fourier transform with respect to η in Eq. (3) was applied. In this approximation we need to subdivide the equations into the LF and ELF parts. The classification of waves is taken as following: LF corresponding to wave frequencies about < 100 kHz, ELF about < 500 Hz and ULF about < 3 Hz.

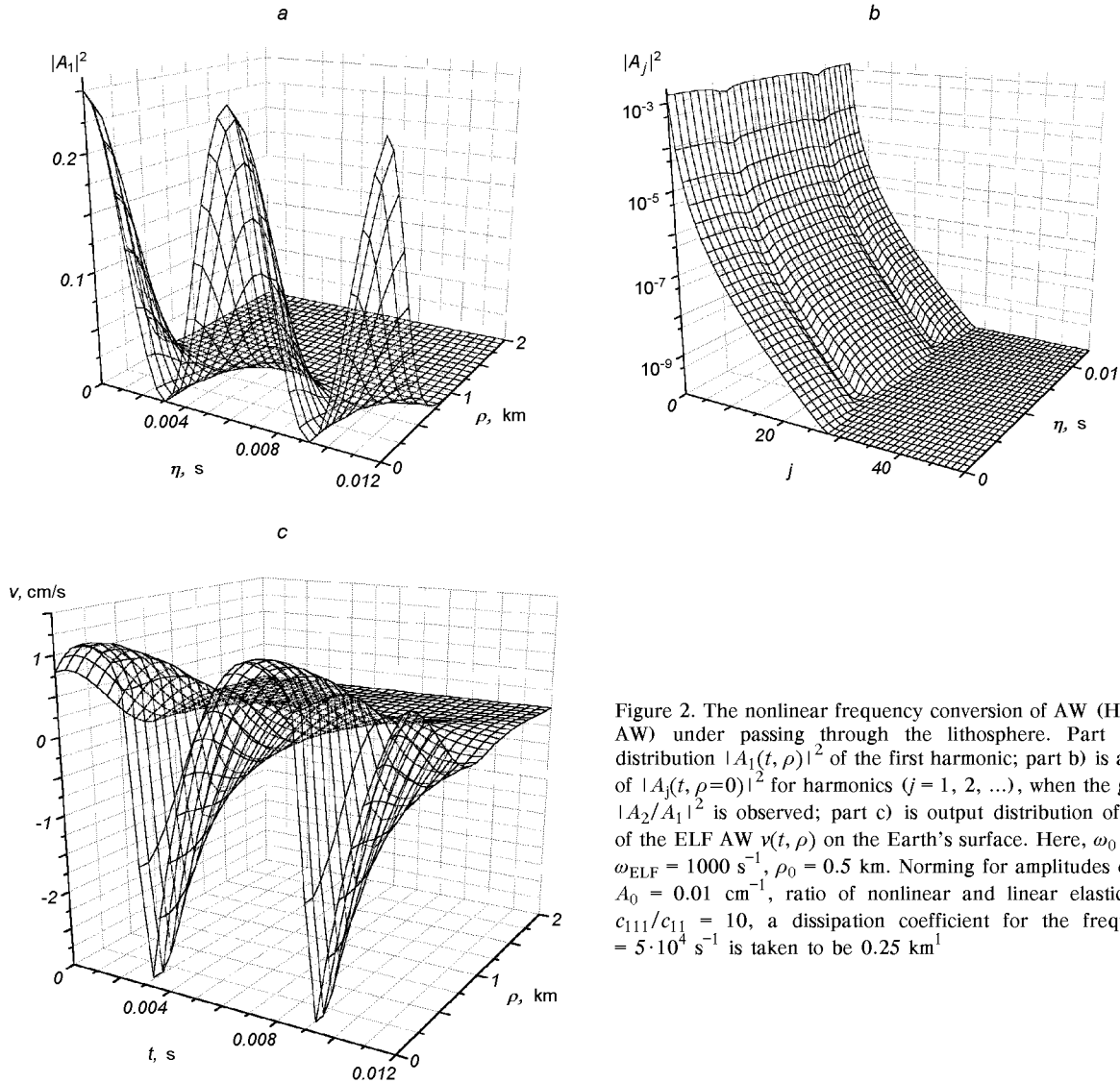


Figure 2. The nonlinear frequency conversion of AW (HF AW - ELF AW) under passing through the lithosphere. Part a) is initial distribution $|A_1(t, \rho)|^2$ of the first harmonic; part b) is a distribution of $|A_j(t, \rho=0)|^2$ for harmonics ($j = 1, 2, \dots$), when the greatest ratio $|A_2/A_1|^2$ is observed; part c) is output distribution of the velocity of the ELF AW $v(t, \rho)$ on the Earth's surface. Here, $\omega_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$, $\omega_{\text{ELF}} = 1000 \text{ s}^{-1}$, $\rho_0 = 0.5 \text{ km}$. Norming for amplitudes of HF AW is $A_0 = 0.01 \text{ cm}^{-1}$, ratio of nonlinear and linear elastic modules is $c_{111}/c_{11} = 10$, a dissipation coefficient for the frequency $\omega_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ is taken to be 0.25 km^{-1}

The equation for the LF part, i.e., a higher part of frequency spectrum, is:

$$\frac{\partial U}{\partial z} - G(z) \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} + N(z) \left(\frac{\partial U}{\partial \eta} \right)^2 = 0.$$

The equation for the ELF part is:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial z} - G(z) \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} + N(z) \left(\frac{\partial U}{\partial \eta} \right)^2 - \\ - D \Delta_p \int_{-\infty}^{\eta} U(\eta') d\eta' = 0. \end{aligned}$$

We take into account the diffraction only for the case of ELF part. The results of simulations are shown in Figs 2, 3. The source is located at a depth

of 30 km. The results are presented for the uniform Earth's crust, because the simulations with the scale of variation $l_n \sim 1 \text{ km}$ of the sound velocity S_1 and of the viscosity Γ gave qualitatively the same results on the transformation of the wave spectrum. The ratio of nonlinear and linear elastic modules is used as $c_{111}/c_{11} = 10$, a dissipation coefficient for the frequency $\omega_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ is taken as 0.25 km^{-1} (it is proportional to the square of frequency, $\propto \omega^2$).

It is possible to estimate that LF waves possess high losses G , essential value of nonlinearity coefficient N , but diffraction is small in this frequency range. In the case of ELF part, essential nonlinear source due to LF part and an influence of diffraction take place.

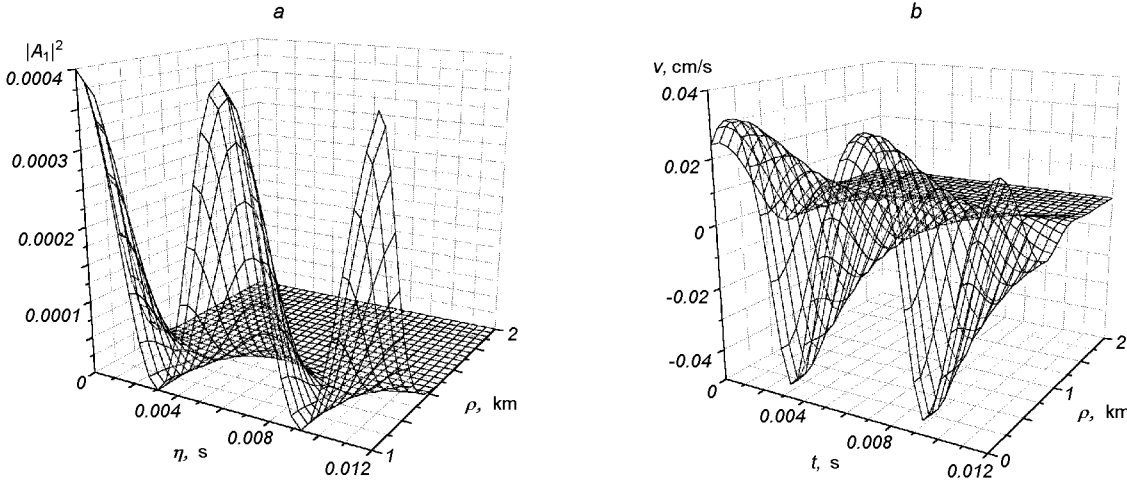


Figure 3. The nonlinear frequency conversion of AW under passing through the lithosphere. Part a) is initial distribution $|A_1(t, \rho)|^2$ of the first harmonic; part b) is output distribution of the velocity of the ELF AW $v(t, \rho)$ at the Earth's surface. Here, $\omega_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$, $\omega_{\text{ELF}} = 1000 \text{ s}^{-1}$, $\rho_0 = 0.5 \text{ km}$. 600 times decrease of input intensity, as compared with Fig. 2

Figs 2, 3 illustrate that only ELF waves reach the Earth's surface without high losses. The LF part dissipates very fast, due to excitation of higher harmonics.

MODELLING OF ACOUSTIC WAVES PASSAGE INTO THE IONOSPHERE

The theory for different effects ensured by acoustic channel of coupling is based on the elasticity and hydrodynamic theory and Maxwell's equations. We apply this theory to the nonlinear effects provided by seismic waves. The ELF atmospheric acoustic waves interact with each other in the atmosphere and ionosphere, producing ULF atmospheric acoustic waves, which reach the ionosphere altitudes, can be observed by satellites. During the earthquake the spectrum of the seismic waves is wide but only ELF, which changed due to nonlinear passing into ULF, reach the ionosphere. This process can be amplified due to the nonlinear interaction of ELF and their transformation into ULF acoustic atmospheric waves.

For the acoustic channel of the lithosphere-ionosphere coupling, the above-mentioned circumstances are very important. A propagation of nonlinear acoustic waves in the atmosphere is described by the following set of hydrodynamic equations:

$$\begin{aligned} & \rho_0 \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + v_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) + \rho' \frac{\partial V_z}{\partial t} \approx \\ & \approx - \frac{\partial p'}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_0 \nu(z) \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) - \rho' g, \end{aligned}$$

$$\rho_0 \frac{\partial V_{\perp}}{\partial t} \approx -\nabla_{\perp} p',$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_0 V_z) + \rho_0 \text{div} V_{\perp} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho' V_z) \approx 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g V_z + V_z \frac{\partial p'}{\partial z} \approx \\ & \approx -C_s^2 \left(\rho_0 \frac{V_z}{\partial z} + \rho_0 \text{div} V_{\perp} + \gamma \rho' \frac{\partial V_z}{\partial z} \right). \end{aligned}$$

Here, C_s is the sound speed in the air, $\nu(z) \approx \nu(0) \exp(z/H)$ is the kinematic viscosity of the air ($\nu(0) \approx 0.14 \text{ cm}^2/\text{s}$), $\rho = \rho_0 + \rho'$, $p = p_0 + p'$ are its total density and pressure, in which ρ_0 and p_0 are stationary values of atmospheric density and pressure ($\rho_0, p_0 \propto \exp(-z/H)$, $H = k_B T/mg$ is the effective atmosphere height, k_B is the Boltzmann's constant, m is the neutral gas mass of the ionosphere and g is gravitational acceleration), ρ' , p' are their perturbed parts, and V_x, V_y, V_z are the components of the air velocity.

We use the adiabatic equation for pressure with the adiabatic constant γ . It is assumed that nonlinearity is moderate and only quadratic nonlinear terms are preserved in Eqs (4). Note that all mechanisms of hydrodynamic nonlinearity are essential. Also we suppose that an acoustic wave moves preferentially vertically upwards, and inequalities $|V_{xy}| \ll |V_z|$ are valid. In a linear approximation, when viscosity is neglected, from Eqs (4) we readily get for the acoustic

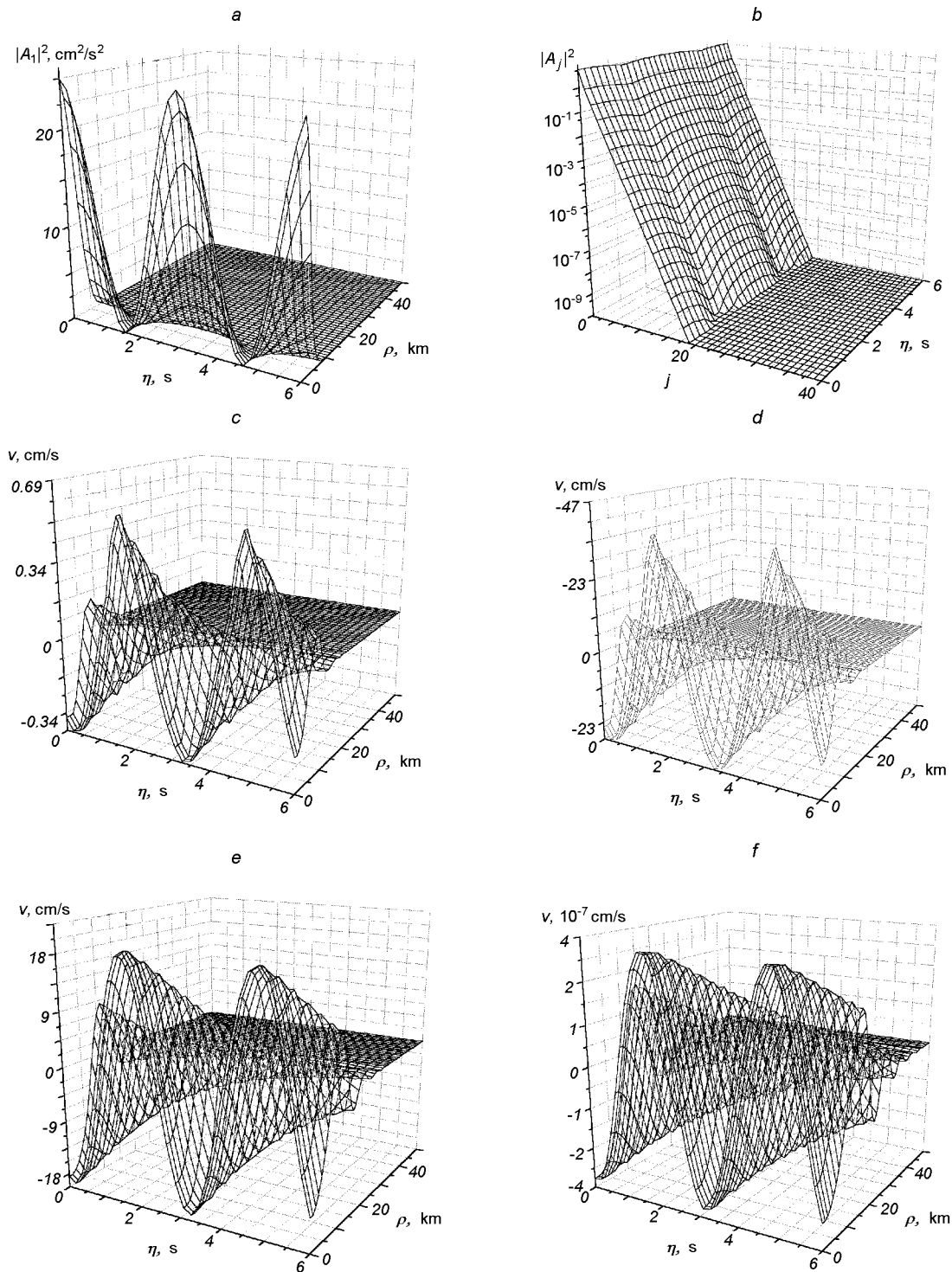


Figure 4. The nonlinear frequency conversion of AW, ELF AW into ULF AGW, under propagation through the atmosphere. Part a) is initial distribution $|A_1(t, \rho)|^2$ of the first harmonic; part b) is a distribution of $|A_j(t, \rho=0)|^2$ for harmonics ($j = 1, 2, \dots$); part c) is distribution of the velocity of the ULF AGW $v(t, \rho)$ at the altitude $z = 50$ km; part d) is distribution of the velocity of the ULF AGW $v(t, \rho)$ at the altitude $z = 100$ km; part e) is distribution of the velocity of the ULF AGW $v(t, \rho)$ at the altitude $z = 150$ km; part f) is distribution of the velocity of the ULF AGW $v(t, \rho)$ at the altitude $z = 200$ km. Here, $\omega_{\text{ELF}} = 500 \text{ s}^{-1}$, $\Omega = 2 \text{ s}^{-1}$; $\rho_0 = 5 \text{ km}$

wave the following expression $|V(z, t)| \approx \exp(z/2H) \cdot \exp(i(\Omega t - Kz))$, where K is the acoustic wave number, and the energy flux remains constant, $\rho_0(z)|V(z, t)|^2 = \text{const}$. Numerical simulation confirms this analysis. Because the wave acoustic dispersion is small ($\Omega > 0.1 \text{ s}^{-1}$), a lot of higher harmonics are excited under the nonlinear interaction.

Therefore, a slowly varying profile approach is suitable for the analysis of the nonlinear acoustic propagation in the atmosphere. It is possible to derive a single equation for the vertical component of velocity of the air V_z . The density dependence on the single transverse coordinate is assumed only.

When introducing the new dependent variable $V = V_z \exp(-z/2H)$, and $z, \eta = t - z/C_s, \rho$, the resulting equation is (below, ρ, ρ_0 are used for notations of transverse coordinate only):

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\partial V}{\partial z} - \frac{v(0)e^{z/H}}{2C_s^3} \frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} - \frac{1 + \gamma}{2} \frac{e^{z/(2H)}}{2C_s^2} \frac{\partial}{\partial \eta} (V^2) \right] = \frac{C_s}{2} \Delta_{\perp} V. \quad (5)$$

The Eq. (5) also is the Khokhlov — Zabolotskaya equation [13] for a medium with a density decreasing along z -axis. Here we consider the case when the envelope frequency is $\Omega \sim 1 \text{ s}^{-1} \gg \Omega_a, \Omega_a = C_s/(2H)$. After changing the independent variable $z, w = \exp[z/(2H)]$, it is possible to rewrite Eq. (5) to:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\partial V}{\partial w} - \frac{v(0)Hw}{C_s^3} \frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} - \frac{1 + \gamma}{2} \frac{H}{C_s^2} \frac{\partial}{\partial \eta} (V^2) \right] &= \\ &= \frac{C_s H}{w} \Delta_{\perp} V, \\ V(w = 1, t, \rho) &= \\ &= V_0 \sin(\omega_0 t) \exp(-(t/t_0)^2) \cdot \exp[-(\rho/\rho_0)^2]. \end{aligned}$$

The input ELF wave is burst-like, namely, it is the wave packet with the ELF carrier frequency ω_0 ; its envelope lies in ULF frequency region. The value of ρ_0 determines a transverse scale of the initial pulse.

After an excitation at the Earth's surface, ELF wave is subject to nonlinearity that leads to a generation of higher harmonics and also to down-conversion, namely, increasing ULF components. More than 100 harmonics are excited. The growth of higher harmonics leads to the creation of a saw-tooth like structure. This structure dissipates due to viscosity. The ULF part of the spectrum is not subject to dissipation, it increases due to this nonlinear interaction. When the transverse scale $\rho_0 \sim 1\text{--}10 \text{ km}$, diffraction is not essential for ELF wave but it can decrease the peak

amplitudes of the ULF part. The results of numerical simulations (Fig. 4) demonstrate that there is an effective nonlinear interaction of ELF and ULF atmospheric acoustic waves and a good nonlinear excitation of ULF atmosphere-ionosphere waves caused by ELF seismic acoustic bursts on the Earth's surface.

The nonlinear interaction of atmospheric acoustic waves demonstrates the importance of the acoustic channel via the example of the nonlinear mechanism of the energy flux propagation from the lithosphere into the ionosphere. The efficiency of the nonlinear acoustic transformation is quite high. For an initial ELF wave amplitude $V_z(z = 0) = V_0 = 2.5 \text{ cm/s}$, one can obtain that the corresponding ULF wave amplitude is $V_z \equiv V(0)\exp(z/(2H)) \approx 300 \text{ cm/s}$ at the altitude $z = 130 \text{ km}$.

CONCLUSIONS

The modelling of acoustic wave passages from the lithosphere into the ionosphere, excited by fracturing, is studied. The simulation of the nonlinear passage of the acoustic waves caused by underground fracturing through the lithosphere, atmosphere, and ionosphere shows that there is an effective nonlinear interaction of the burst in the lithosphere. First of all, a strong excitation of LF and ELF acoustic waves occurs. Second, a good nonlinear excitation of ULF waves ($< 3 \text{ Hz}$) takes place in the atmosphere. The diffraction decreases the value of the pulse of ULF, but losses of these waves are small. The LF waves are excited in the lithosphere, but these waves possess high losses and they are so small on the Earth's surface that they have not been detected by a seismograph. In fact, a transformation of the seismic burst after passing through lithosphere into ELF acoustic waves takes place. In the ionosphere, ELF waves excite ULF waves. The nonlinear interaction of acoustic bursts demonstrates an importance of acoustic channel using the example of the nonlinear mechanism of the energy flow from the lithosphere into the ionosphere.

1. Galperin Yu. // Phys. Solid Earth.—1985.—N 11.—P. 88—95.
2. Warwick J. W. Radio astronomical and satellite studies of the atmosphere / Ed. by J. Aarons. — Amsterdam: North-Holland, 1963.—400 p.
3. Gokhberg M., Morgounov V., Pokhotelov O. Earthquake Prediction: Seismo-Electromagnetic Phenomena — London, Gordon and Breach, 1995.—280 p.
4. Molchanov O. A. // Geomagn. and Aeronomy.—1991.—31, N 1.—P. 111—120.
5. Molchanov O. A., Hayakawa M., Rafalsky V. A. Penetration characteristics of electromagnetic emissions from an underground seismic source into the atmosphere, ionosphere, and magnetosphere // J. Geophys. Res.—1995.—100A, N 2.—

- P. 1691—1703.
6. Tarantsev A., Birfeld Ya. The brief descriptions of discoveries // CНИПИИ (USSR, Moscow), Discovery No 128.
 7. Kotsarenko N. Ya., Perez Enriquez R., Koshevaya S. V. Excitation of plasma waves in the ionosphere caused by atmospheric acoustic waves // *Astrophys. and Space Phys.*—1997.—246, N 2.—P. 211—217.
 8. Surkov V. V., Molchanov O. A., Hayakawa M. Pre-earthquake ULF electromagnetic perturbations as a result of inductive seismomagnetic phenomena during microfracturing // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.*—2003.—65, N 1.—P. 31—46.
 9. Makarets M. V., Koshevaya S. V., Gernets A. A. Electromagnetic emission caused by the fracturing of piezoelectrics in rocks // *Phys. Scripta.*—2002.—65, N 3.—P. 268—272.
 10. Khavroshkin O. B., Tsyplakov V. V., Berezhnoi A. A., et al. // *Doklady Earth Sci.*—2001.—376, N 1.— P. 90—92.
 11. Musatenko S. I., Kurochka E. V., Aslanyan A. M., et al. // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.*—1997.—13.—P. 64—68.
 12. Berezhnoy A. A., Bervalds E., Khavroshkin O. B., et. al. Radio observations of the Moon during activity periods of the Leonid and Lyrid meteor streams // *Baltic Astronomy.*—2002.—11.—P. 507—527.
 13. Rudenko O. Nonlinear sawtooth-shaped waves // *Phys. Uspekhi.*—1995.—38, N 9.—P. 965—968.

**ПРОХОДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ
ЧЕРЕЗ ЛІТОСФЕРУ В ІОНОСФЕРУ, ВИКЛИКАНИХ
СЕЙСМІЧНОЮ Й ВУЛКАНІЧНОЮ АКТИВНІСТЮ**

**В. Гримальський, С. Кошева, А. Коцаренко,
В. Мальнев, Д. Хуарес**

Під час землетрусів та потужних підземних вибухів відбувається нелінійне проходження акустичних збурень через літосферу в іоносферу, аналіз якого проведено в даній статті. Широкий спектр акустичних хвиль, що був викликаний розтріскуванням гірських порід та простирався аж до діапазону радіохвиль, спостерігався на супутниках та у радіо телескопних дослідженнях бомбардування Місяця метеорами. Нелінійне проходження хвиль від підземних джерел забезпечено еластичною нелінійністю літосфери та гідродинамічною нелінійністю атмосфери. Якщо розтріскування відбувається на великих глибинах, нелінійна взаємодія височастотних коливань збуджує над- та вкрай-низькочастотні хвилі пружності, які досягають поверхні Землі та здійснюють відгук на сейсмограмах. Переважно вертикальне поширення акустичних хвиль в атмосфері викликає послідовні зміни в їхньому спектрі, збуджуючи понад 100 гармонік. Генерація ВНЧ та УНЧ хвиль в атмосфері відбувається в наслідок нелінійної трансформації та дифракції акустичних хвиль, що поширюються та збуджуються в ній.

УДК 528.8.04:504.064.2.001.18:(502.58:550.344.4)

В. І. Лялько, Ю. В. Костюченко, М. В. Ющенко, Ю. Г. Білоус

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, Київ

Використання систем супутникового спостереження Землі для моніторингу природних катастроф: аналіз наслідків цунамі у Південно-Східній Азії

Надійшла до редакції 23.02.05

Розглядається потенціал систем супутникового спостереження Землі в задачах моніторингу природних катастроф на прикладі аналізу наслідків цунамі у Південно-Східній Азії у грудні 2004 року. За результатами вивчення матеріалів супутникової зйомки постраждалих регіонів продемонстровано роль і місце різних методів ДЗЗ для моніторингу природних катастроф. Окреслено напрями використання систем ДЗЗ при плануванні підготовчих заходів, поточному моніторингу та розробці довгострокових стратегій управління ризиками. Визначено інформаційні потреби систем управління ризиками катастрофічних цунамі та безпеки берегових зон і джерела даних з точки зору забезпеченості даними ДЗЗ. Запропоновано методологічні підходи до прогнозування катастроф такого роду, створення системи поточного моніторингу та принципи побудови системи довгострокового управління ризиками.

ВСТУП

Протягом останніх кількох років спостерігається драматична ескалація загрозливих природних феноменів. Ще не відновлено господарство після ураганів у Центральній Америці, не забуті наслідки руйнівних повеней у Західній та Центральній Європі, зокрема на Закарпатті 1998 та 2001 рр., як рівно через рік після руйнівного землетрусу у Туреччині та Ірані велетенська морська хвиля, породжена землетрусом в Андаманському морі, практично змила прибережну смугу кількох держав Південно-Східної Азії. Хвиля мала висоту близько 20 м і виникла в результаті потужного землетрусу, що стався в точці з координатами 3.32N, 95.85E 26 грудня 2004 р. о 00:58:53 UTC (07:58:53 за місцевим часом). Постраждали Індонезія, Таїланд, Бірма, Індія, Шрі-Ланка, меншою мірою — африканське узбережжя. Загальна кількість людей, що загинули та вважаються зниклими безвісті в 12 постраждалих країнах, досягла 305 тисяч. Втрати від цунамі склали більш як 14 млрд доларів.

В цьому регіоні це була найбільша катастрофа з 1900 року. Природа поставила перед людством

новий виклик. Але проблема полягає не тільки у швидкому відновленні важливого регіону, але й в розумінні необхідності інтенсивнішого розвитку систем і технологій попередження катастроф та управління їхніми ризиками в глобальному масштабі.

Саме використання сучасних наукових та технологічних розробок в галузі глобального моніторингу та глобальної безпеки стало найважливішим в контексті розробки глобальних стратегій сталого розвитку. Серед найбільш перспективних та високотехнологічних засобів, що швидко розвиваються останнім часом, можна виділити технології супутникового спостереження Землі. У поєднанні з сучасними інформаційними технологіями та науково обґрунтованими аналітичними підходами методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стали важливим джерелом інформації та інструментом прийняття рішень у різних галузях суспільного життя.

Мета цього огляду — продемонструвати потенціал технологій ДЗЗ у вирішенні задач моніторингу прибережних зон і цунамі та показати місце супутникових технологій у системах управління ризиками природних катастроф.

Рис. 1. Оглядова карта регіону, що зазнав впливу цунамі 26 грудня 2004 р. із зазначенням постраждалих територій

Рис. 2. Територія, що постраждала внаслідок катастрофічного цунамі (м. Банда Ачех, о-в Суматра, Індонезія; джерело даних: Digital Globe): *a* — берегова лінія та прибережна зона. Дані зйомки QuickBird від 23 червня 2004 р.; *b* — ураження берегової лінії та прибережної зони. Дані зйомки QuickBird від 28 грудня 2004 р.; *в* — міська агломерація і сільськогосподарські угіддя. Дані зйомки QuickBird від 23 червня 2004 р.; *г* — ураження міської території і сільськогосподарських угідь. Дані зйомки QuickBird від 28 грудня 2004 р.; *д* — південна частина околиць міста. Дані зйомки QuickBird від 23 червня 2004 р.; *е* — ураження південної частини околиць міста. Дані зйомки QuickBird від 28 грудня 2004 р.

Рис. 3. Територія, що постраждала внаслідок катастрофічного цунамі (м. Калутара, о-в Шрі-Ланка; джерело даних: Digital Globe): *a* — берегова лінія та прибережна зона. Дані зйомки QuickBird від 1 січня 2004 р.; *б* — ураження берегової лінії та прибережної зони. Дані зйомки QuickBird від 26 грудня 2004 р.

Рис. 4. Територія, що постраждала внаслідок катастрофічного цунамі (м. Мелабо, о-в Суматра, Індонезія; джерело даних: CRISP, National University of Singapore): *a* — берегова лінія та прибережна зона. Дані зйомки IKONOS від 17 серпня 2004 р.; *б* — ураження берегової лінії та прибережної зони. Дані зйомки IKONOS від 7 січня 2005 р.

Рис. 5. Територія, що постраждала внаслідок катастрофічної цунамі (острів Катчал (Нікобарські острови), Індія; джерело даних: EARSel): *a* — дані зйомки SPOT 5 від 10 липня 2004 р.; *b* — ураження берегової лінії та прибережної зони. Дані зйомки SPOT 5

Рис. 6. Модель рельєфу території північної частини острову Суматра, Індонезія за результатами обробки даних космічної зйомки SRTM; джерело даних: USGS і UNOSAT (в рамках International Charter on Space and Major Disasters)

Рис. 7. Визначення меж постраждалої території північної частини острову Суматра, Індонезія. Результат спільної інтерпретації даних космічної зйомки SRTM (роздільна здатність 90 м горизонтальна і 16 м — вертикальна) і Landsat ETM (роздільна здатність 28 м) від 12 червня 2001 і 29 грудня 2004 р.; джерело даних USGS і UNOSAT (в рамках International Charter on Space and Major Disasters)

МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАУВАЖЕННЯ

Цунамі, як і землетруси, є найнепередбачуванішими природними явищами. Позаяк проблеми прогнозування цих явищ не можна адекватно розв'язати, науково-технологічний потенціал ДЗЗ необхідно спрямувати у сферу координації підготовчих заходів та швидкого реагування на катастрофічні події, тобто у сферу управління ризиками і зменшення збитків [5, 8]. Принаймні постійна просторова локалізація потенційної загрози сприяє підвищенню ефективності використання супутникової інформації в системах моніторингу і контролю катастрофічних цунамі. Так, зони затоплення та руйнації уздовж берегової лінії можуть бути детально картовані, що надасть можливість завчасного детального визначення соціо-економічних ризиків, та мінімізації небезпеки для мешканців цих зон.

Катастрофи такого масштабу, як остання, ставлять на порядок денний світової спільноти задачу формування транс-регіональних та глобальних планів зменшення ризиків цунамі в рамках глобальної стратегії сталого розвитку. Основою такого плану можуть стати розробки відповідних національних агенцій, наприклад розпочата під егідою NOAA у 1994 р. Національна програма зменшення небезпеки цунамі [www.pmel.noaa.gov/tsunami]. Першим кроком реалізації такої діяльності має стати створення комплексу карт затоплення в рамках розповсюджених ГІС загального доступу [5]. Дані ДЗЗ, зокрема високого роздільності, мають стати базовим інструментом при розробці та вдосконаленні адекватних регіональних цифрових карт територій з високим ризиком затоплення та руйнування.

Важливим є також створення баз даних міжdisciplinarnogo характеру щодо природних та антропогенних характеристик особливо небезпечних регіонів [9]. Поєднання можливостей ДЗЗ- та ГІС-технологій дасть змогу розробити якісно нові підходи та інструменти оцінки ризиків та на їхній основі вдосконалити стратегії управління ризиками природних катастроф [4, 5, 9].

МОЖЛИВОСТІ ДЗЗ У ВИРІШЕННІ ЗАДАЧ КАТАСТРОФІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

З точки зору загального феноменологічного аналізу важливо визначити просторову локалізацію та можливі масштаби затоплень та руйнувань, що могли бути спричинені природною катастрофою. Для цього розглянемо карту регіону (рис. 1). На цій карті жовтим кольором позначені території, які за умовами рельєфу були затоплені хвилею цунамі,

і зазнали, таким чином, найбільших руйнувань і збитків.

Використовуючи дані ДЗЗ (рис. 2—5), розглянемо детальніше окремі регіони, що зазнали найбільшого впливу стихії, а саме, райони міст Банда-Ачех та Мелабо, які розташовані на північному краю острова Суматра (Індонезія), окіл міста Калутара на острові Шрі-Ланка, та острів Катчал (Нікобарські острови, Індія).

Бачимо, що берегова лінія зазнала значних втрат, зокрема практично повністю зруйнована вся інфраструктура, будинки, змито частину берега (рис. 2, а, б). Спостерігається повне затоплення полів, руйнування будинків і інфраструктури (рис. 2, в, г). Видно втрати берегової зони, пляжів, руйнування гирла річок, знищення рослинності на рівнинних територіях (рис. 2, д, е). Втрачено близько 300 м берегової зони, наявні значні пошкодження інфраструктури (рис. 3). Спостерігається значне руйнування будівель, інфраструктури, берегових споруд, відслідковується зміна гідрологічного режиму (рис. 4).

У правому верхньому куті рис. 5 наведено загальний обрис острова. Спостерігається повне руйнування територій і значне ушкодження земних покривів вздовж певної орографічної лінії, яка приблизно відповідає ізогіпси 30 м над рівнем моря.

Порівняння різночасових зображень за допомогою сучасних систем обробки даних та геоінформаційних систем дозволяє швидко оцінити масштаби катастрофічного впливу, визначити точну просторову локалізацію руйнувань, оцінити таким чином прямі збитки та оперативно визначити оптимальні транспортні шляхи в уражених регіонах. Навіть просте візуальне порівняння цих зображень дає можливість оцінити загальні масштаби катастрофи. Ми покажемо далі, як застосування простих методик інтерпретації космічних зображень сприяє вирішенню задачі оцінки збитків та мінімізації наслідків природної катастрофи.

На рис. 6 і 7 наведено приклади тематичної обробки та проблемно-орієнтованої інтерпретації супутникової інформації.

На рис. 7 жовтою лінією позначена територія з висотами менше 30 м над рівнем моря, відтінки пурпурового визначають локалізацію руйнувань. Таким чином, як можна бачити, зона ураження збігається з регіональною орографічною границею.

Вивчаючи дані космічної зйомки можна дійти висновку, що не всі втрати адекватно враховані. Зокрема не вивчено інтрузію морських вод на суходіл або зміну фізичних властивостей та хімічного режиму прибережних вод океану тощо. Відповідні соціо-екологічні ризики також не мають

належної оцінки. Однак за даними деяких дослідників [1] відкладений вплив наслідків природних катастроф може скласти в середньостроковій перспективі близько 40 % прямих втрат. Як показує відповідний досвід [6], в оцінці цих показників методи супутникового спостереження ще мають зіграти визначальну роль.

РОЛЬ СУПУТНИКОВИХ МЕТОДІВ В УПРАВЛІННІ РИЗИКАМИ ПРИРОДНИХ КАТАСТРОФ

Таким чином, на базі продемонстрованих підходів до інтерпретації космічної інформації, може бути сформована супутникова складова системи управління ризиками катастрофічних цунамі. Основною сферою діяльності тут має стати розробка сценаріїв

використання систем супутникового спостереження Землі за відповідними напрямками заходів безпеки [5, 6]. Загальна структура цих напрямів наведена на рис. 8. В таблиці наведено інформаційні потреби та зазначено місце супутникових даних [2, 7, 8, 10].

Моніторингова система такого плану буде сприяти розробці адекватної стратегії управління ризиками катастрофічних цунамі. Однак створення такого роду стратегії є проблемою, яка поки що не має адекватної постановки. Організація підготовчих заходів, діяльності під час подій та відновлювальних робіт базується як правило [5] на різнострокових моделях катастроф, що мають за основу статистичні підходи. Зокрема, цунамі можуть розглядатися як окремі незалежні випадки з просторово розподіленою ймовірністю виникнення. Таке уявлення дозволяє побудувати прикладні розрахункові



Рис. 8. Напрями використання систем ДЗЗ в контексті управління небезпекою природних катастроф

Інформаційні потреби системи управління ризиками катастрофічних цунамі та безпеки берегових зон і джерела даних

| Потрібна інформація | Джерело даних |
|--|---|
| Інфраструктура | Картографічні дані, супутникові дані IKONOS, SPOT 1/2/3/4/5, Landsat TM |
| Структура землекористування | Картографічні дані, супутникові дані IKONOS, SPOT 1/2/3/4/5, Landsat TM |
| Демографічна структура | Регіональна та державна статистика |
| Сейсмічна історія регіону та статистика цунамі | Відомча статистика |
| Неотектоніка, літологія, положення розломних зон | Картографічні дані, супутникові дані SPOT 1/2/3/4/5, Landsat TM, RADARSAT |
| Особливості рельєфу | Картографічні дані, супутникові дані ERS SAR (ASAR ENVISAT), InSAR |
| Ландшафтна структура, рослинність та гідробіота | Картографічні дані, супутникові дані SPOT 1/2/3/4/5, Landsat TM, ENVISAT |

моделі розподілу ризиків та визначити певні часові закономірності катастроф [2, 9]. Тут слід зазначити, що пряме використання супутникових зйомок для детектування цунамі не можна вважати ефективним. Звичайно, виникнення та розповсюдження гігантської хвилі можна визначити за допомогою дистанційного зондування, але періодичність відповідних зйомок і оперативність передачі інформації не є задовільними для такого роду задач. Сучасні системи отримання та передачі космічних зображень мають оперативність від 3 до 6 год, тоді як часовий масштаб руху цунамі складає від кількох десятків хвилин до двох-трьох годин. Звичайно, такі умови не дозволяють побудувати функціональну систему завчасного попередження про небезпеку цунамі за допомогою супутникових методів на сталому базисі.

Інший, загалом більш обґрунтований підхід базується на генетичному уявленні про виникнення цунамі, тобто на статистичних моделях землетрусів. Застосування статистики землетрусів та сценаріїв виникнення цунамі в розрахунках ризиків дозволяє певною мірою підвищити коректність прогнозування та уточнити просторовий розподіл небезпеки виникнення катастрофічних цунамі [10]. Методи аналізу та передбачення сейсмічної небезпеки лежать за межами цього огляду, але зазначимо, що такий підхід вимагає створення та вдосконалення розгалуженої мережі пунктів сейсмічного спостереження на базі існуючих регіональних систем та створення безперервної системи координації попереджувальних заходів. Зокрема, важливим кроком можна вважати розповсюдження на інші сейсмонезбезпечні території системи попередження, яка наразі існує в Тихоокеанському регіоні.

Однак з точки зору парадигми сталого розвитку, тобто створення системи, стійкої до зовнішніх збурень, найприйнятнішим є шлях аналізу наслідків. Найефективніше зменшення збитків катастрофічної події буде полягати у створенні стратегії довгострокового управління ризиками. Таким чином, ми переходимо до аналізу наслідків події та оперування відповідною статистикою. Це дозволяє нам проводити дослідження закономірностей розповсюдження цунамі в рамках методологічних підходів аналізу ризиків повеней [3].

ВИСНОВКИ

Як свідчать дані багаторічного моніторингу [3], небезпека затоплень територій внаслідок активізації природних процесів різного походження, як кліматичних, так і геологічних (залишаючи поза

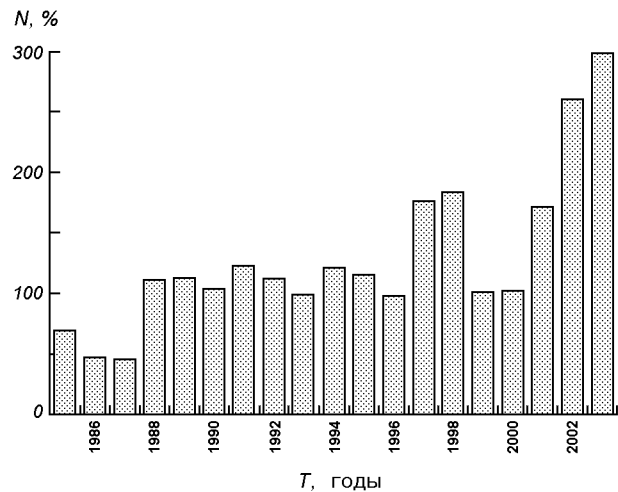


Рис. 9. Річна кількість випадків затоплення територій, включаючи наслідки цунамі, за період з 1985 до 2003 р.

увагою можливий взаємозв'язок цих феноменів, особливо цікавий в контексті дослідження глобальних змін), зростає щороку (рис. 9). Тому проблема створення масштабної системи моніторингу природних катастроф у рамках глобальної стратегії управління ризиками є вкрай актуальною. Це, зокрема, зафіксовано у міжнародній програмі GMES, спрямованій на розвиток глобальної системи моніторингу екологічної безпеки.

Крім того, потрібно визначити додаткову важливу складову. Одним із трагічних уроків цієї катастрофи стала актуальність певного перегляду існуючої системи взаємодії різних національних агенцій з контролю небезпечних природних явищ та вдосконалення глобальної системи завчасного попередження. Як показало попереднє розслідування обставин катастрофи, вчасна передача даних про наявність землетрусу, а відтак і можливість цунамі, яка могла за умов прийняття оперативних заходів врятувати більшість постраждалих, не відбулася через недосконалу координацію регіональних центрів геофізичних спостережень. З моменту зареєстрованого багатьма світовими сейсмологічними станціями першого поштовху до того, як цунамі досягло материкового узбережжя, пройшло 50—110 хв. Цього часу достатньо для часткової евакуації. Виходячи з таких міркувань, на нещодавньому саміті з питань зменшення збитків від природних катастроф прийнято рішення про створення системи завчасного попередження на базі мережі сейсмічного контролю території Індійського океану. Прототипом було обрано систему, яка функціонує в Тихому океані. Система базуватиметься на мережі датчиків на суходолі, спеціалізованих морських

бакенів, станцій збору та оперативного аналізу супутникової інформації (зокрема даних альтиметричного спостереження водної поверхні). Особливу увагу буде приділено вдосконаленню регіональної інформаційної інфраструктури.

На щастя, загроза таких катастроф, яка сталася у Південно-Східній Азії минулого року, не є актуальною для сучасної України, але, користуючись увагою світової спільноти до проблем безпеки берегових зон, наші науковці мають наголосити на необхідності концентрації зусиль на розв'язанні проблем охорони берегових смуг та розробці інтегрованих стратегій управління ризиками природних катастроф. Крім того, слід зауважити, що досвід вітчизняних фахівців у міжнародних проєктах з координації космічних науково-технологічних програм може бути корисним у контексті інтеграції нашої дослідницької інфраструктури в світову систему екологічної безпеки.

Автори щиро вдячні своїм колегам з міжнародних та національних організацій NOAA, USGS, UN Office for Outer Space Affairs, DLR, Digital Globe і Страсбурзького університету за люб'язно надані матеріали. Особлива подяка Європейській асоціації лабораторій з дистанційного зондування (EARSeL) за інформаційну підтримку.

1. Дорогунцов С. І., Ральчук О. М. Управління техногенно-екологічною безпекою у парадигмі сталого розвитку. — К.: Наук. думка, 2001.—172 с.
2. Bernard E., Milburn H. Improved satellite — based emergency alerting system // *J. Atmos. and oceanic technology.*—1991.—8 (6).—P. 879—883.
3. Brakenridge G. R., Anderson E., Caquard S. Flood Inundation Map DFO 2003-282. — Dartmouth Flood Observatory, Hanover, USA, 2003.
4. Challenges for GIS in Emergency Preparedness and Response // *ESRI White Paper*, May 2000.

5. Greene R. W. *Confronting Catastrophe. A GIS Handbook.* — Redland, California: ESRI Press, 2003.—140 p.
6. Lyalko V. I., Kostyuchenko Yu. V., Kitchka A. A. Landscape management strategy improvement based on the remote sensing: flood risk policy in the Upper Tisza basin // *Abstracts of the Second International Conf. «Interfaces Against Pollution (IAP-2002)» and NATO ARW «Role of interfaces in Environmental Protection»*, May 27–30, Miskolc-Lillafured, Hungary, 2002 — Univ. Miskolc Print, 2002.—P. 56.
7. Statement of guidance regarding how well satellite and in situ sensors capabilities meet WMO user requirements in several application areas // *WMO Tech. Doc # 1052, SAT-26*, WMO, 2001.—185 p.
8. The Use of Earth Observing satellites for Hazard Support: Assessments & Scenarios // *Report of CEOS*; publ. NOAA, 2003.—218 p.
9. Trudeau M. Weathering National Hazards with Information Technology // *Geo Info Systems.*—1998.—8 (10).—10 p.
10. Victor L., Baptista M., Simoes J. Destructive earthquakes and tsunami warning system // *Terra nova.*—1991.—3 (2).—P. 119—121.

**SATELLITE EARTH OBSERVATION SYSTEMS
APPLICATION FOR THE NATURAL CATASTROPHES
MONITORING: AN ANALYSIS OF THE SOUTHERN-EAST
TSUNAMI IMPACT**

V. I. Lyalko, Yu. V. Kostyuchenko, M. V. Yuschenko,
Yu. H. Bilous

The capabilities of Earth Observation Systems for the natural disaster monitoring are discussed as the case study of tsunami in Southern-East Asia in December 2004. On the basis of satellite information investigation, the remote sensing techniques role and place in the natural disaster monitoring are demonstrated. The directions of remote sensing data utilization in the framework of preparing actions, disaster monitoring and long-term risks strategy development are framed. The remote sensing information needs of the management systems for the tsunami risks and coastal zones security are determined. Some methodological approaches to forecasting and long-term managing of the tsunami and inundation risks are proposed.

УДК 504.064.37:528.8

В. И. Волошин¹, А. Г. Шапарь², Н. Н. Переметчик³

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

²Інститут проблем природокористування та екології Національної академії наук України, Дніпропетровськ

³Управління з екології Дніпропетровської міської ради, Дніпропетровськ

**Исследование опасных экзогенных процессов
на территории города Днепропетровска
с использованием спутниковых снимков**

Надійшла до редакції 10.03.05

Проведено лінеаментний аналіз геологічних структур зсувонебезпечних районів міста Дніпропетровська по космічних знімках. Для завірки результатів аналізу геофізичними методами на основі спостереження природного імпульсного електромагнітного поля Землі виділено зони тектонічних порушень на тестовій ділянці. Показано, що лінеаменти, виділені в результаті дешифрування космічних знімків, знайшли відображення в виділених тектонічних зонах за результатами спостереження природного імпульсного електромагнітного поля Землі. Встановлено, що найактивніші екзогенні та деформаційні процеси спостерігаються у вузлах перетину тектонічних розломів (лінеаментів). Створення космосхеми таких зон за результатами дистанційного зондування Землі дозволяє здійснювати моніторинг небезпечних екзогенних процесів, що мають природно-техногенне походження.

В последнее время во многих городах Украины отмечается увеличение активности опасных экзогенных процессов. Их оперативный контроль и прогноз проявлений с использованием эффективных экономических методов является актуальной задачей настоящего времени.

Особенности геологического строения грунтов, на которых построены крупные города Украины, нельзя не учитывать при анализе возникновения опасных экзогенных процессов, обусловленных природно-техногенным воздействием. В том числе — состояние земной коры: тектонические подвижки плит земной коры постоянны, и их последствия проявляются на локальном уровне [8, 9].

Синергетический эффект проведения исследовательских опасных геологических процессов достигается комплексированием результатов интерпретации космических снимков и данных наблюдения природного импульсного электромагнитного поля Земли (ПИЭПЗ). Подобные исследования проводились в Украине [11, 13, 15]. Эффективность комплексного исследования рассматривается на примере города Днепропетровска.

Начиная с 1983 г. ведется наблюдение за тектонической активностью территории города Днепропетровска, проявляющейся в зонах неотектонических нарушений, количество которых в Днепропетровске достигает 77 [1]. Активные зоны неотектонических разломов являются дополнительным фактором, провоцирующим возникновение оползней, деформации и разрушений зданий в условиях природно-техногенной нагрузки на окружающую природную среду.

Обследована в качестве тестового объекта Рыбальская балка общей площадью 45.5 га, расположенная в центре правобережной части города. Склоны балки застроены жилыми и административными зданиями, находящимися частично в аварийном состоянии, здесь расположен стадион «Метеор», по дну балки проложен коллектор промышленных сточных вод ГП «ПО ЮМЗ им. А. М. Макарова» диаметром 1200 мм.

Глубина расчлененности рельефа в балке составляет 60 м (от 168 м по расположенной выше улице до 105 м по тальвегу, система высот Балтийская). В верхней части геологического разреза залегают



Рис. 1. Территория города Днепропетровска с нанесенными на правобережье зонами неотектонических разломов

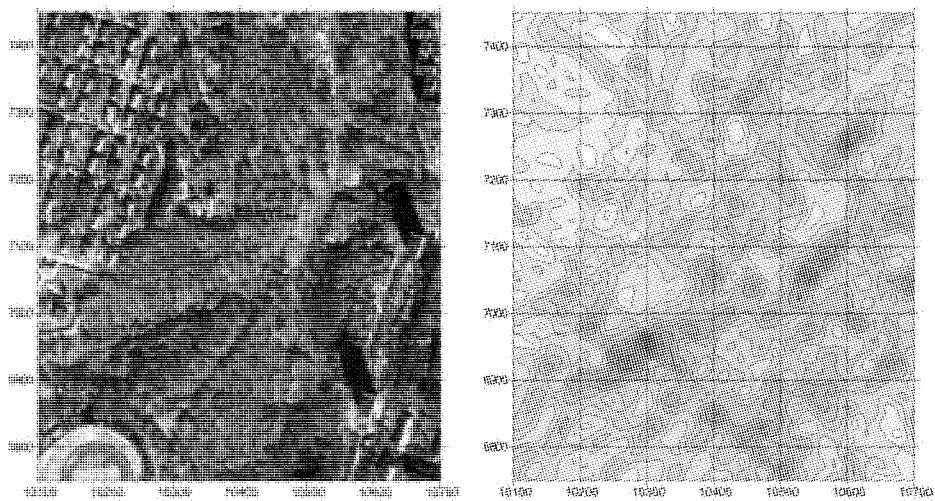


Рис. 2. Линеаментный анализ балки Рыбальская. На космическом снимке (слева) в нижнем левом углу — фрагмент стадиона «Метеор».

лессовые супески и суглинки, которые характеризуются подъемом уровня грунтовых вод из-за утечек в водонесущих коммуникациях.

В качестве исходных материалов использовались предварительно обработанные космические снимки с разрешением 1 м (КА Ikonos, США) и 5 м (КА IRS, Индия). Применено программное обеспечение обработки и преобразования (ПИ «Радуга»), разработанное ГП «Днепрокосмос». Программное обеспечение представляет собой полнофункциональную версию программного продукта ENVI (Environment for Visualizing Images) — лицензионной программной среды визуализации изображений. Программный продукт настроен на пользовательский русифицированный интерфейс команд верхнего уровня и расширен программными модулями, разработанными на языке программирования IDL, которые интегрированы в интерфейсную среду ENVI.

На основе анализа снимка с разрешением 5 м выполнен линеаментный анализ правобережной части города Днепропетровска (рис. 1). Снимок с разрешением 1 м использовался для линеаментного анализа района балки Рыбальская (рис. 2).

Построение схемы осевых линий вероятных тектонических нарушений правобережной части города Днепропетровска осуществлено с использованием линеаментного анализа. Основным прием — логическая интерпретация, которая базируется на анализе соотношений разнообразных свойств объектов, которые отображаются в их изображении на космических снимках [14]. На первом этапе применялась визуальная дешифровка с последующим применением специальной математической обработки.

При дешифровке использовались главным образом не прямые, а косвенные признаки, которые передают геологические свойства объекта через проявление других явлений [7]. Такой подход обусловлен главным образом тем, что территория исследований находится в границах города с интенсивно развитыми коммуникациями, зданиями и т. п. Кроме этого, поверхность перекрыта осадочным чехлом.

Рельеф, который хорошо фиксируется на снимках, выполненных в летний период, обусловлен структурными свойствами, литологическим составом, физическими свойствами или генетическими условиями формирования разных горных пород. Все эти факторы в связи с разным проявлением выветривания и денудации, определенной выборочной эрозии и аккумуляции рыхлого материала отражаются на поверхности в виде характерных форм мезо- и микрорельефа, в развитии гидрографической сети.

При изучении формы и размеров элементов рельефа главным образом обращалось внимание на направление и длину осей овражно-балочной и гидрографической сетей, отражающих свойства горных пород и условий их залегания.

Тщательное изучение рельефа и особенностей геоморфологического строения по результатам интерпретации космических снимков позволило прогнозировать наличие тектонических нарушений. Прогноз базируется на том, что в формировании макро- и микроформ рельефа большое значение имеет нарушенность пород трещинами и разрывами со смещением, их прочность и стойкость к процессам выветривания, которое определяет рисунок и ориентацию речных и овражных долин. Общим дешифровочным признаком таких смещений является подчеркнутая линейность, выраженная разнообразными элементами рельефа. Причиной появления отрицательных форм рельефа в местах выхода смещенных разрывов на поверхность также могут быть контакты пород с разными физическими свойствами. Последние определяют образование путей стока и подпирания поверхностных вод.

Линейные формы рельефа являются косвенными признаками тектонических нарушений [10, 14]. С целью восстановления вероятной сетки разрывных нарушений, которое определило формирования современных форм рельефа, по линеаментам рассчитана функция линейности.

Эта трансформанта впервые предложена на кафедре геофизических методов Национального горного университета [12] с целью выделения признаков разломов фундамента, перекрытого мощным осадочным чехлом. Процесс выделения разломов по исходным индикаторам очень субъективный. Функция линейности разрешает более однозначно выделять осевые линии зон разломов.

Функция линейности имеет геолого-математический смысл. При расчете используются модельные представления о том, что зоны разломов — это прямолинейные, линейно-извлеченные элементы фундамента. Зоны разломов выделялись как максимумы функции линейности. На рис. 1 приведена схема осевых линий вероятных тектонических нарушений правобережной части Днепропетровска.

Азимутальный анализ линейных элементов позволяет сделать вывод: на территории правобережной части города Днепропетровска преобладают линеаменты направлений, которые совпадают с системами разломов Украинского кристаллического щита [16], согласно которым преобладают шесть систем взаимно ортогональных разломов 0—270°, 17—287°, 35—305°, 45—315°, 62—332°, 77—347°.

При построении схемы плотности линеаментов по балке Рыбальская выполнена предшествующая обработка поля яркости, которая состояла в усреднении по методу сменного окна. Эта процедура разрешила в значительной мере исключить те особенности снимка, которые имеют случайный характер, и в то же время подчеркнуть повторяющиеся особенности.

Локальные поля в границах анализируемого изображения характеризуются специфическими свойствами, отражающими особенности геосистем разных масштабов или их подсистем. Эти особенности могут проявляться в вариантах тона и структуры изображения. Для выделения линеаментов по снимку балки Рыбальская применены процедуры дифференцирования: во-первых, они проще и оперативнее; во-вторых, для использования структурных характеристик размер поля (в пикселах) недостаточен большой.

Снимок содержит большое количество линейных элементов искусственного происхождения — дороги, улицы, тропы, линии электропередач, здания и сооружения, и т. п. Такие линеаменты были отфильтрованы.

Довольно часто для удобства интерпретации и возможности сравнения с аналогичными схемами по другим районам вместо схем плотности линеаментов используют схемы густоты линеаментов [13].

В ходе выполнения работ составлена схема густоты линеаментов по балке Рыбальская. Для этого использованы результаты наблюдений с помощью дистанционного электромагнитного определителя напряжений. Контрольные замеры в 53 точках сети наблюдений проведены радиоволновым индикатором упруго-деформационного состояния Днепропетровским отделением Украинского геологоразведочного института [2—6].

Метод основан на изучении естественных электромагнитных полей, создаваемых природными электропроводящими структурами с различными электропроводимостями вследствие диффузионных, сорбционных и других происходящих в земле процессов. Последние в значительной мере зависят от изменений напряженности в горных породах. По результатам совместного анализа наблюдений и материалов обследования были получены данные:

- выделено 16 зон тектонических нарушений, которые в пространственной ориентации могут быть объединены в четыре группы: 5—7°, 320—330°, 70—80°, 285—300°;
- зоны тектонических нарушений совпадают с данными по деформации строений в этих зонах;

- имеющиеся фотодокументы аварийных зданий в этих зонах подтверждают полученные результаты.

Наиболее активные деформационные процессы наблюдаются в узлах пересечений неотектонических разломов. Здесь могут формироваться тела оползней, оползневые ступени и поверхностные смещения, что подтверждается аварийным состоянием расположенных в этих зонах зданий.

В результате анализа составлена схема осевых линий вероятных тектонических нарушений правобережной части города Днепропетровска (рис. 3) и схема густоты слабоконтрастных линеаментов района балки Рыбальская.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Линеаменты, выделенные по космическим снимкам, имеют преимущественные направления, которые совпадают с азимутами основных систем разломов Украинского щита (рис. 4).
2. Зоны определенных тектонических нарушений, в особенности в узлах их пересечения, явля-

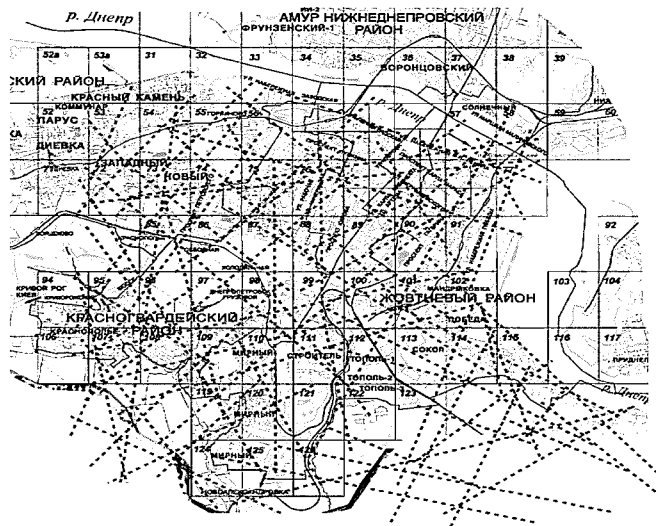


Рис. 3. Схема осевых линий предполагаемых тектонических нарушений правобережной части города Днепропетровска по результатам интерпретации космических снимков

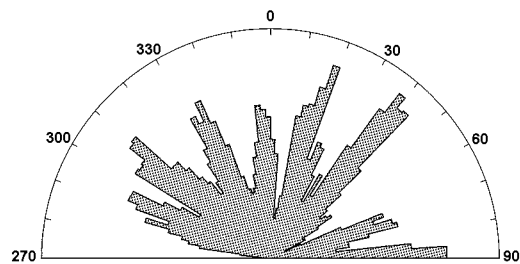


Рис. 4. Диаграмма распределения линеаментов по азимутам

ются потенциально опасными с точки зрения проявления экзогенных процессов.

По результатам исследований с целью повышения устойчивости склона тестового участка Рыбальской балки в г. Днепропетровске рекомендован комплекс мероприятий.

Для дальнейшего уточнения и подтверждения результатов интерпретации космической информации есть необходимость продолжения детальных наземных геолого-геофизических исследований потенциально опасных зон на территории города, что станет основой внедрения экологического мониторинга экзогенных процессов природно-техногенного происхождения по данным дистанционного зондирования Земли. Это позволит заверить данные снимков в инфракрасном диапазоне спектра, совмещенных с космокартой местности.

1. Антонов Ю. Р., Левенко А. С. Опасные геологические процессы в Днепропетровске // Экополис.—2003.— № 1(11)—1(12).—С. 33—37.
2. А. с. 1382221 СССР. МКИ Способ прогноза тектонической нарушенности / А. Б. Посудиевский, В. Н. Саломатин, А. К. Михалев, Г. М. Стывас. — Заявл. 17.03.87; Опубл. 00.00.88, Бюл. № 10.
3. А. с. 1766182 СССР. МКМ Способ прогноза геодинамических зон в массиве горных пород / А. Б. Посудиевский, И. С. Белый, Г. М. Стывас. — Заявл. 20.04.90; Опубл. 00.00.91, Бюл. № 22.
4. Деклараци́нный патент на винахід № 64221 А, Україна. Спосіб виділення на площі ділянок неоднорідної будови ґрунтового масиву / І. С. Білий, М. М. Довбні, Г. П. Кузіна, Г. М. Стывас. — 2004.
5. Деклараци́нный патент на винахід № 64222 А, Україна. Спосіб виявлення ділянок замочування покрівлі підземної споруди / І. С. Білий, М. М. Довбні, Г. П. Кузіна, Г. М. Стывас. — 2004.
6. Держпатент України № 8085. Способ выявления геодинамических зон в массиве горных пород / И. С. Белый, В. Я. Кириченко, Г. М. Стывас, А. В. Шмиголь. — Заявл. 20.11.95.
7. Довбнич М. М., Солдатенко В. П. Технология геологического картирования на основе системно-блоковой модели земной коры // Геофизика и математика: Матер. II Всерос. конф. — Пермь, 2001.—С. 350—355.
8. Космическая информация в геологии. — М.: Наука,

1983.—536 с.

9. Кравцова В. И. Космические методы картографирования. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995.—240 с.
10. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Пер. с нем. — М.: Мир, 1988.—343 с.
11. Мичак А. Г., Ліщенко Л. П., Терещенко О. М. и др. Вивчення екологічного стану урбанізованих та промислових територій України за багатозональними космічними знімками // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 129—132.
12. Михайлов А. Е., Корчуганова Н. И., Баранов Ю. Б. Дистанционные методы в геологии. — М.: Недра, 1993.—224 с.
13. Николаенко Б. О., Янцевич О. О. Лінеamentний аналіз на основі дешифрування МАКС для вирішення задач екологічного картування і прогнозування // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві: Метод. посібник з тематичної інтерпретації матер. аерокосмічних зйомок. — Київ: ЦАКДЗ ІГН НАНУ, 1999.—С. 129—132.
14. Рябухин А. Г., Макарова Н. В., Макаров В. И. Космические методы в геологии. — М.: Изд-во МГУ, 1988.—146 с.
15. Терещенко О. М., Лялько В. І., Федоровський О. Д., Рябоконе́нко О. Д. Екологічна інтерпретація космічних зйомок міських агломерацій // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 156—162.
16. Тяпкин К. Ф., Гонтаренко В. Н. Системы разломов Украинского щита. — Киев: Наук. думка, 1996.—184 с.

STUDY OF DANGEROUS EXOGENOUS PROCESSES LOCATED ON DNEPROPETROVSK CITY TERRITORY USING SATELLITE IMAGES

V. I. Voloshin, A. G. Shapar, N. N. Peremetchik

A lineament analysis of Dnepropetrovsk city landslip-prone areas geological structures is carried out using space images. Tectonic breakings zones are marked on the test area with the purpose of analysis results certification through geophysical methods on basis of natural pulsed Earth electromagnetic field (NPEEMF) observation. The results of NPEEMF observation show that lineaments marked as a result of space images decoding correspond to marked tectonic zones. It is determined that the most active exogenous and deformation processes are observed in nodes of tectonic breaks crossing (lineaments). Creation of space scheme for such zones using results of remote sensing of the Earth allows one to realize monitoring of dangerous exogenous processes that have natural and man-caused origin.

УДК 528.2:629.78+528.16

М. О. Литвин

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

**Порівняння результатів обробки даних
української перманентної GPS-мережі
програмним комплексом GAMIT/GLOBK
з результатами Локального центру аналізу
GPS-даних ГАО НАН України**

Надійшла до редакції 17.02.05

Оброблено місячний ряд GPS-спостережень за допомогою програмного забезпечення GAMIT/GLOBK ver. 10.1 з метою з'ясування можливості роботи за стандартами, які використовуються при обробці GPS-спостережень локальними центрами аналізу EPN. Отримані чотири тижневі розв'язки порівнюються з аналогічними розв'язками, отриманими Локальним центром аналізу в ГАО НАН України за допомогою «Bernese GPS Software ver. 4.2». Аналіз показує узгодженість двох серій розв'язків на рівні похибки, а також дає підстави використовувати отриманий з них комбінований розв'язок як продукт Центру.

ВСТУП

З грудня 2003 р. в Головній астрономічній обсерваторії НАН України (ГАО НАН України) діє локальний центр обробки GPS-спостережень. На цей час у центрі оброблено більш ніж річний ряд спостережень. Основним інструментом обробки є програмне забезпечення «Bernese GPS Software ver. 4.2» [1], розроблене в Астрономічному інституті Бернського університету (AIUB Швейцарія). Цей комплекс дозволяє обробляти як кодові, так і фазові спостереження сигналів GPS-супутників. Завдяки цьому можна отримати з високою точністю координати і швидкості GPS-станцій, параметри орбіт GPS-супутників, поправки до годинників на супутниках та приймачах, а також з обробки глобальної мережі отримувати параметри обертання Землі.

Вказане програмне забезпечення (ПЗ) стало фактично стандартом при обробці даних європейської перманентної GPS-мережі (EPN): 14 з 16 центрів обробки EPN використовують «Bernese GPS Software» або його покращені версії (два центри використовують ПЗ «MicroCosm software» та GIPSY/OASIS). Саме цей факт зумовив використання «Bernese GPS Software» в Локальному

центрі обробки GPS-спостережень. Виникає питання: наскільки залежать результати обробки GPS-спостережень від типу використаного ПЗ?

Зважимо на те, що ГАО НАН України має дозвіл на використання в наукових цілях ПЗ GAMIT/GLOBK ver. 10.1, розроблене в Масачусетському інституті технологій (MIT) та Каліфорнійському інституті океанографії в Сан-Дієго (SIO). З його допомогою можна отримувати ті ж параметри, що і «Bernese GPS Software». Проте між цими програмними продуктами є ідеологічні відмінності. GAMIT ver. 10.1 [3] і GLOBK ver. 10.1 [http://rses.anu.edu.au/geodynamics/gps/papers/gamit/globk_ps.pdf] — це самостійні ПЗ, які можна використовувати окремо. GAMIT — це набір програм для обробки GPS-спостережень, GLOBK — програмна реалізація фільтра Кальмана, яка дає можливість об'єднувати результати обробки сесій GPS-спостережень, а також отримувати спільний розв'язок для даних різних методів космічної геодинаміки.

Метою даної роботи було отримати тижневі розв'язки обробки Української перманентної GPS-мережі (UPN) і перевірити їхню узгодженість з результатами, отриманими Локальним центром ГАО НАН України.

ВИХІДНІ ДАНІ

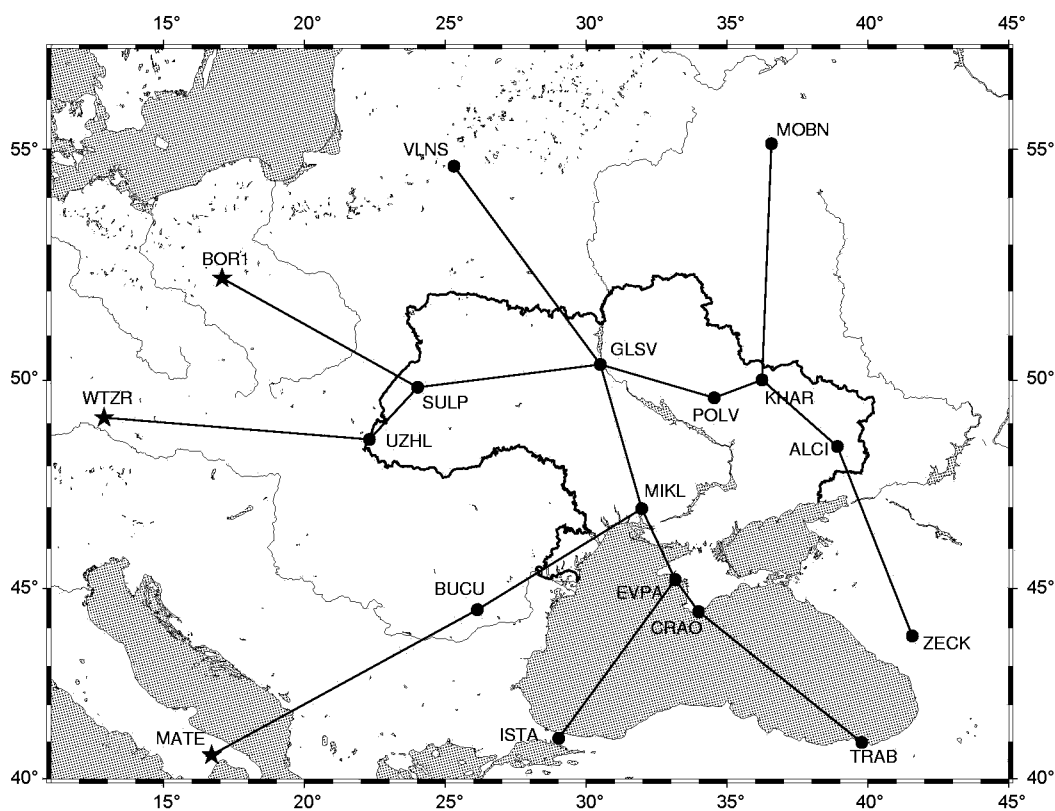
Для обробки було вибрано місячний ряд спостережень, а саме 1259—1262 GPS-тижні (22 лютого — 20 березня 2004 р., дні року 053—080). Крім станцій, розміщених на території України, включено сім станцій мережі Міжнародної GPS-служби

(IGS), розташованих навколо території України. Необхідна інформація про всі станції наведена в табл. 1, а їхнє взаємне розташування показано на рисунку.

Координати опорних IGS-станцій, які задавали систему координат розв'язку (BOR1, MATE, WTZR) взято з каталогу ITRF2000 [ftp://lareg.

Таблиця 1. Інформація про використані станції

| Станція | Ідентифікатор | Номер DOMES | Країна | Приймач | Антена | Висота антени, м |
|---------------|---------------|-------------|-----------|-----------------|--------------|------------------|
| Алчевськ | ALCI | — | Україна | TRIMBLE 5700 | TRM41249.00 | 0.0000 |
| Боровець | BOR1 | 12205M002 | Польща | ROGUE SNR-8000 | AOD/M_T | 0.0624 |
| Бухарест | BUCU | 11401M001 | Румунія | ASHTECH Z-XII3 | ASH700936D_M | 0.0810 |
| Сімеїз | CRAO | 12337M002 | Україна | ROGUE SNR-8000 | AOD/M_T | 0.0800 |
| Євпаторія | EVPA | 12344M001 | Україна | TRIMBLE 4000SSI | TRM29659.00 | 0.0000 |
| Київ/Голосіїв | GLSV | 12356M001 | Україна | TRIMBLE 4000SSI | TRM29659.00 | 0.0000 |
| Стамбул | ISTA | 20807M001 | Туреччина | ASHTECH Z-XII3 | ASH700936D_M | 0.0610 |
| Харків | KHAR | 12314M001 | Україна | TRIMBLE 4000SSI | TRM29659.00 | 0.0000 |
| Матера | MATE | 12734M008 | Італія | TRIMBLE 4000SSI | TRM29659.00 | 0.1010 |
| Миколаїв | MIKL | 12335M001 | Україна | TRIMBLE 4700 | TRM41249.0 | 0.0237 |
| Обнінськ | MOBN | 12365M001 | Росія | ASHTECH Z-XII3 | ASH701945C_M | 0.0000 |
| Полтава | POLV | 12336M001 | Україна | TRIMBLE 4700 | TRM29659.00 | 0.0000 |
| Львів | SULP | 12366M001 | Україна | TRIMBLE 5700 | TRM41249.0 | 4.7295 |
| Трабзон | TRAB | 20808M001 | Туреччина | ASHTECH Z-XII3 | ASH700936D_M | 0.0610 |
| Ужгород | UZHL | 12301M001 | Україна | TRIMBLE 4000SSI | TRM29659.0 | 0.0000 |
| Вільнюс | VLNS | 14201M010 | Литва | ASHTECH Z-XII3 | ASH700936D_M | 0.0730 |
| Веттцель | WTZR | 14201M010 | Німеччина | AOA SNR-8000 | AOD/M_T | 0.0710 |
| Зеленчуцька | ZECK | 12351M001 | Росія | AOA SNR-8000 | AOD/M_T | 0.0450 |



Мережа GPS-станцій

Таблиця 2. Різниці між координатами станцій (MAO—GAO) в мм для GPS-тижнів 1259—1262

| Станція | 1259 | | | 1260 | | | 1261 | | | 1262 | | |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | ΔX | ΔY | ΔZ | ΔX | ΔY | ΔZ | ΔX | ΔY | ΔZ | ΔX | ΔY | ΔZ |
| ALCI | -1.1 | -3.4 | -3.4 | -5.4 | -4.9 | -6.2 | -3.1 | -2.9 | -4.2 | -1.9 | -4.5 | -2.9 |
| ZECK | 1.2 | 1.7 | 2.1 | -1.9 | 0.2 | -6.2 | -1.2 | 0.3 | 1.8 | 0.6 | 0.0 | 3.3 |
| BOR1 | 0.4 | -0.4 | -1.0 | -0.1 | 0.2 | -0.9 | 0.1 | -0.2 | -1.7 | -0.1 | -0.4 | -1.4 |
| SULP | 2.9 | -0.3 | 2.1 | 0.9 | -0.2 | 0.9 | 1.3 | 0.7 | -1.2 | -0.5 | -1.5 | -1.2 |
| BUCU | -2.8 | -0.2 | -1.7 | -4.5 | -0.8 | -2.9 | -4.6 | 0.4 | -2.2 | -4.3 | -1.2 | -1.9 |
| MIKL | 0.1 | -2.8 | -1.9 | -2.6 | -3.7 | -3.8 | -1.3 | -1.7 | -2.3 | -1.2 | -4.2 | -3.0 |
| CRAO | -2.1 | -0.8 | -2.2 | -3.8 | -1.4 | -3.0 | -3.2 | -1.0 | -2.7 | -2.3 | -2.4 | -2.1 |
| TRAB | -5.8 | -4.6 | -5.9 | -10.8 | -7.9 | -10.4 | -8.5 | -6.5 | -5.9 | -6.1 | -7.1 | -3.3 |
| EVPA | -2.1 | -1.8 | -2.5 | -5.0 | -3.1 | -4.5 | -3.6 | -1.7 | -2.9 | -3.9 | -3.5 | -3.0 |
| ISTA | -4.6 | -2.3 | -3.9 | -7.3 | -4.8 | -6.0 | -7.1 | -2.7 | -4.7 | -4.6 | -1.8 | -2.1 |
| GLSV | 0.4 | -0.8 | -0.4 | -2.1 | -2.4 | -2.7 | -1.5 | -0.5 | -2.0 | -0.6 | -2.0 | -1.4 |
| POLV | -0.3 | -1.0 | -0.8 | -3.3 | -1.6 | -2.4 | -3.5 | -1.8 | -4.0 | -2.7 | -4.2 | -4.6 |
| VLNS | 3.0 | -1.7 | 1.7 | -0.6 | -2.4 | -2.7 | 0.2 | -0.9 | -1.2 | -1.1 | -0.6 | -1.7 |
| KNAR | 0.2 | -0.7 | -0.8 | -3.0 | -3.8 | -3.8 | -2.7 | -1.8 | -3.5 | -0.5 | -4.6 | -2.1 |
| MOBN | 0.1 | -4.7 | -5.7 | -2.3 | -4.0 | -6.0 | -0.9 | -2.6 | -4.4 | -0.2 | -3.2 | -4.1 |
| MATE | -0.7 | 0.4 | 0.7 | -1.0 | 1.3 | 0.9 | -1.8 | 1.7 | 1.8 | -1.0 | 1.1 | 1.4 |
| UZHL | -0.4 | -0.3 | -0.6 | -1.9 | -0.4 | -2.2 | -1.4 | 0.7 | -0.8 | -1.2 | -0.7 | -1.2 |
| WTZR | 0.0 | 0.0 | -0.3 | -0.5 | 0.0 | 0.1 | -0.4 | 0.5 | 0.4 | -0.1 | 0.2 | 0.0 |

ensg.ign.fr/pub/itrf/itrf2000/ITRF2000_EUR_GPS_PERM.SNX.gz]. Координати були зведені до середніх епох спостережень для кожного тижня. Априорні координати для інших станцій взято з розв'язків центру обробки GPS-даних ГАО НАН України. Априорні значення координат для кожного тижня наведено в табл. 2. Для обробки використано комбіновані точні ефемериди GPS-супутників, обчислені IGS [ftp://igs.ifag.de/ORBITS/]. Варіації фазового центру GPS-антен взяті зі стандартного файлу IGS у новому форматі ANTEX [ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/igs_01.atx], який рекомендує використовувати IGS. При врахуванні поправок до показів годинників GPS-супутників було використано комбіновані файли навігаційного повідомлення (brdc-файли), які є продуктом IGS [ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/gpsdata/brdc/2004/]. Для врахування океанічних навантажень використано коефіцієнти, обчислені в AIUB [http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2001/msg00366.html]. Для врахування руху полюса використано таблиці IGS [ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/data/formats/erp.txt], конвертовані у внутрішній формат GAMIT (це ПЗ використовує таблиці, які є продуктом USNO).

СТРАТЕГІЯ ОБРОБКИ

Спостереження було оброблено програмним забезпеченням GAMIT/GLOBK ver. 10.1. При обробці, наскільки це було можливо, дотримувалися рекомендацій стосовно процедури обробки EPN (саме

цих норм дотримуються при обробці в Локальному центрі обробки GPS-спостережень ГАО НАН України). Використано спостереження GPS-супутників з кутом місця не менше 10° . Період вибірки складав 30 с, тобто використовувалися всі наявні вимірювання. Було запроваджено зважування спостережень в залежності від висоти спостережуваного супутника. На параметри іоносфери накладено слабкі обмеження ($8 \cdot 10^{-6}$ м), зважаючи на те, що оброблені спостереження припадають на період, близький до максимуму циклу сонячної активності. Крім цього, при обробці ПЗ «Bernese GPS Software» з використанням рекомендованої методики QIF [7], відсоток фіксування фазових невизначеностей складав менше 10 %, тому обробку спостережень цього періоду було виконано без розв'язування фазових невизначеностей [10].

На зенітну затримку сигналу накладалися обмеження 0.5 м, вона оцінювалася кожні дві години. На координати станцій, які задавали систему координат, було накладено жорсткі обмеження (10^{-4} м). На координати всіх інших станцій накладено дуже слабкі обмеження (10 м) [2].

ОСНОВНІ ВІДМІННОСТІ МІЖ «BERNESE SOFTWARE VER. 4.2» ТА GAMIT/GLOBK VER. 10.1

Серед найсуттєвіших відмінностей вказаних ПЗ слід відмітити такі.

1. «Bernese GPS Software» може використовувати навігаційну інформацію з комбінованих файлів, які формуються IGS (sp3-файли). GAMIT використо-

вує sr3-файли лише як файли ефемерид, а поправки до показів годинників GPS-супутників бере з файлів навігаційного повідомлення, записаних приймачами на станціях або з комбінованих IGS-файлів навігаційного повідомлення. Це пояснюється тим, що комбіновані в IGS-файли навігаційного повідомлення генеруються значно швидше, тому низькоточну обробку можна проводити, не чекаючи файлів орбіт.

2. При зважуванні спостережень для «Bernese GPS Software» рекомендовано обчислювати вагові коефіцієнти для спостережень супутників між кутами місця 10° та 15° за формулою

$$w(E) = \frac{1}{(\cos E)^2},$$

де E — висота супутника над горизонтом. При обробці спостережень ПЗ GAMIT/GLOBK також можна зважувати спостереження відповідно до кута місця, проте тут користувачем задається не функція обчислення вагового множника, а функція оцінки помилки спостережень, яка має вигляд

$$\varepsilon(E) = a^2 + \frac{b^2}{(\sin E)^2},$$

де a , b — задані користувачем коефіцієнти. При обробці вибрано рекомендовані розробниками значення $a = 4.3$ мм, $b = 7$ мм. При такому виборі спостереження на середній висоті 40° (для станцій в середніх широтах) мають оцінювану похибку 10 мм, а на висоті 20° ваговий множник складатиме 0.5. Крім того, в GAMIT оцінюються спостереження для всіх кутів місця (в діапазоні $10..90^\circ$).

3. Програмний комплекс «Bernese GPS Software» має кілька варіантів формування баз. Один з них дозволяє користувачу явно задати бази. В GAMIT є лише один спосіб формування баз — за принципом утворення найменших подвійних різниць [2]. Розробники GAMIT не планують додавати можливість задавати бази «вручну», а працюють над удосконаленням існуючого алгоритму (на цей момент створено бета-версію GAMIT 10.2). На рисунку зображено конфігурацію мережі, явно задану при обробці комплексом «Bernese GPS Software».

4. У ПЗ GAMIT ver. 10.1 передбачено можливість використання нового формату (ANTEX) файлів варіації фазового центру антен (розробники рекомендують використовувати антени, розроблені в Національній адміністрації з вивчення океану і атмосфери США (NOAA) [<http://www.grdl.noaa.gov/GRD/GPS/>]). «Bernese GPS Software ver. 4.2» використовує файли IGS-формату pcv («Bernese GPS Software ver 5.0» буде використовувати ANTEX).

ОБРОБКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Попередню обробку виконано в такій послідовності.

1. Файли спостережень переведено у внутрішні формати даних, сформовано файли початкових умов і негравітаційних силових параметрів для GPS-супутників.

2. За даними файлів навігаційних повідомлень складено файли поправок до показів годинників GPS-супутників.

3. З використанням початкових умов, складено таблицю положень GPS-супутників з кроком 15 хв (модуль ARC).

4. За кодovими спостереженнями обчислено поправки до годинників GPS-приймачів усіх станцій.

5. Обчислено теоретичні значення спостережуваних величин і частинні похідні цих величин за шуканими параметрами (модуль MODEL).

6. Виконано маркування спостережень супутників з кутами місця, меншими за 10° , виявлено та замарковано моменти стрибків фаз та «викиди» у файлах перших різниць (модуль AUTCLN).

7. Отримано розв'язки на безіоносферній комбінації L_3 для очищених спостережень. Для моделювання зенітної затримки використовувалася модель Саастамойнена [9]. Для обчислення затримки на інших висотах використовувалася функція схилання pmfh2.0 [8]. Використовувалося зважування фазових спостережень залежно від висоти спостережуваного GPS-супутника. На координати станцій MATE, BUCU, WTZR накладалися жорсткі обмеження (10^{-4} м), на координати всіх інших станцій накладено слабкі обмеження (10 м).

8. Оцінено координати станцій з розв'язку системи нормальних рівнянь (модуль SOLVE).

9. Використовуючи уточнені координати станцій, повторно виконано виявлення і маркування стрибків фаз за допомогою файлів подвійних різниць [2] (модуль AUTCLN).

10. Складено систему нормальних рівнянь при використанні оновлених даних (модуль MODEL).

11. Виконано розв'язок системи нормальних рівнянь і отримано шукані координати станцій (модуль SOLVE).

Розв'язки, отримані для кожної сесії спостережень (одна доба) об'єднувалися в тижневий розв'язок за допомогою ПЗ GLOBK ver 10.1.

Розв'язок, отриманий центром ГАО НАН України, позначено як MAO (розв'язок у системі координат ITRF2000). Результат, отриманий ПЗ GAMIT/GLOBK, позначено GAO. Аббревіатура UKR служить для позначення комбінації розв'язків GAO та MAO.

Таблиця 3. Об'єднаний розв'язок (UKR) для GPS-тижнів 1259—1262

| Станція | 1259 | 1260 | 1261 | 1262 |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | X, м Y, м Z, м | X, м Y, м Z, м | X, м Y, м Z, м | X, м Y, м Z, м |
| ZECK | 3451174.7286 | 3451174.7292 | 3451174.7261 | 3451174.7256 |
| | 3060335.4173 | 3060335.4179 | 3060335.4146 | 3060335.4147 |
| | 4391955.6293 | 4391955.6303 | 4391955.6287 | 4391955.6296 |
| TRAB | 3705250.3843 | 3705250.3842 | 3705250.3800 | 3705250.3792 |
| | 3084421.6707 | 3084421.6708 | 3084421.6671 | 3084421.6656 |
| | 4162044.7431 | 4162044.7446 | 4162044.7420 | 4162044.7436 |
| ALCI | 3297847.9597 | 3297847.9594 | 3297847.9591 | 3297847.9580 |
| | 2661607.3926 | 2661607.3928 | 2661607.3942 | 2661607.3925 |
| | 4750829.8000 | 4750829.8003 | 4750829.7990 | 4750829.7995 |
| MOBN | 2936432.0748 | 2936432.0766 | 2936432.0738 | 2936432.0736 |
| | 2178364.5339 | 2178364.5324 | 2178364.5323 | 2178364.5306 |
| | 5208858.2175 | 5208858.2171 | 5208858.2111 | 5208858.2123 |
| KHAR | 3312984.3456 | 3312984.3463 | 3312984.3459 | 3312984.3458 |
| | 2428203.4167 | 2428203.4156 | 2428203.4173 | 2428203.4145 |
| | 4863307.8030 | 4863307.8048 | 4863307.8029 | 4863307.8047 |
| POLV | 3411557.3722 | 3411557.3709 | 3411557.3713 | 3411557.3688 |
| | 2348463.9725 | 2348463.9717 | 2348463.9720 | 2348463.9701 |
| | 4834396.8672 | 4834396.8670 | 4834396.8654 | 4834396.8638 |
| CRAO | 3783897.1250 | 3783897.1242 | 3783897.1238 | 3783897.1210 |
| | 2551404.4028 | 2551404.4011 | 2551404.4031 | 2551404.4005 |
| | 4441264.2654 | 4441264.2656 | 4441264.2642 | 4441264.2628 |
| EVPA | 3767253.5081 | 3767253.5078 | 3767253.5075 | 3767253.5052 |
| | 2461876.3272 | 2461876.3261 | 2461876.3281 | 2461876.3253 |
| | 4504591.7762 | 4504591.7766 | 4504591.7760 | 4504591.7747 |
| MIKL | 3698554.0109 | 4639769.4722 | 3698554.0101 | 3698554.0078 |
| | 2308675.9878 | 2308675.9875 | 2308675.9888 | 2308675.9866 |
| | 3698554.0105 | 4639769.4724 | 4639769.4717 | 4639769.4703 |
| GLSV | 3512888.9789 | 3512888.9789 | 3512888.9786 | 3512888.9770 |
| | 2068979.8610 | 2068979.8609 | 2068979.8631 | 2068979.8615 |
| | 4888903.1862 | 4888903.1858 | 4888903.1851 | 4888903.1853 |
| ISTA | 4208830.3132 | 4208830.3139 | 4208830.3101 | 4208830.3100 |
| | 2334850.2770 | 2334850.2756 | 2334850.2768 | 2334850.2765 |
| | 4171267.2215 | 4171267.2222 | 4171267.2210 | 4171267.2215 |
| BUCU | 4093760.8761 | 4093760.8749 | 4093760.8742 | 4093760.8722 |
| | 2007793.7841 | 2007793.7841 | 2007793.7867 | 2007793.7837 |
| | 4445129.9427 | 4445129.9426 | 4445129.9423 | 4445129.9417 |
| VLNS | 3343600.6394 | 3343600.6379 | 3343600.6418 | 3343600.6373 |
| | 1580417.7206 | 1580417.7202 | 1580417.7247 | 1580417.7221 |
| | 5179337.2729 | 5179337.2694 | 5179337.2730 | 5179337.2711 |
| SULP | 3765297.0203 | 3765297.0199 | 3765297.0195 | 3765297.0164 |
| | 1677559.1895 | 1677559.1911 | 1677559.1928 | 1677559.1911 |
| | 4851297.3927 | 4851297.3919 | 4851297.3916 | 4851297.3902 |
| UZHL | 3907587.4755 | 3907587.4757 | 3907587.4762 | 3907587.4745 |
| | 1602428.6760 | 1602428.6773 | 1602428.6799 | 1602428.6782 |
| | 4763783.7398 | 4763783.7391 | 4763783.7410 | 4763783.7389 |
| BOR1 | 3738358.4770 | 3738358.4779 | 3738358.4779 | 3738358.4765 |
| | 1148173.6955 | 1148173.6963 | 1148173.6982 | 1148173.6969 |
| | 5021815.7570 | 5021815.7563 | 5021815.7558 | 5021815.7563 |
| MATE | 4641949.5723 | 4641949.5730 | 4641949.5723 | 4641949.5726 |
| | 1393045.4078 | 1393045.4104 | 1393045.4125 | 1393045.4109 |
| | 4133287.4383 | 4133287.4384 | 4133287.4409 | 4133287.4405 |
| WTZR | 4075580.5727 | 4075580.5733 | 4075580.5746 | 4075580.5735 |
| | 931853.7816 | 931853.7824 | 931853.7851 | 931853.7835 |
| | 4801568.1159 | 4801568.1159 | 4801568.1182 | 4801568.1170 |

Таблиця 4. Коефіцієнти переходу між розв'язками MAO та GAO для GPS-тижнів 1259—1262

| Номер тижня | Зсув по осі X, мм | Зсув по осі Y, мм | Зсув по осі Z, мм | Поворот навколо осі X, мс | Поворот навколо осі Y, мс | Поворот навколо осі Z, мс | Масштабний множник, мкм/км | СКВ, мм |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------|
| 1259 | 0.0±0.4 | -0.8±0.4 | -1.8±0.4 | 0.4±0.2 | 0.4±0.2 | 0.2±0.1 | -0.9±0.6 | 1.9 |
| 1260 | 0.6±0.5 | -0.4±0.5 | -4.9±0.5 | 0.9±0.2 | 0.5±0.2 | 0.2±0.1 | -1.1±0.6 | 2.0 |
| 1261 | 0.6±0.4 | 0.2±0.4 | -3.3±0.4 | 0.6±0.1 | 0.4±0.2 | 0.2±0.1 | -1.5±0.5 | 1.7 |
| 1262 | 0.8±0.4 | -1.1±0.4 | -3.1±0.4 | 0.4±0.1 | 0.1±0.2 | 0.2±0.1 | -2.0±0.5 | 1.6 |

Таблиця 5. Залишки після перетворення Гельмерта між розв'язками GAO та MAO, в мм, для GPS-тижнів 1259—1262

| Станція | 1259 | | | 1260 | | | 1261 | | | 1262 | | |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | ΔX | ΔY | ΔZ | ΔX | ΔY | ΔZ | ΔX | ΔY | ΔZ | ΔX | ΔY | ΔZ |
| ALCI | -0.7 | -0.9 | -1.5 | 0.0 | -0.4 | -1.9 | -0.7 | -0.1 | -0.8 | -0.2 | -0.4 | -0.4 |
| ZECK | -1.1 | 2.3 | 7.1 | -1.4 | 2.4 | 8.0 | -0.1 | 1.8 | 7.5 | -0.5 | 2.5 | 7.8 |
| BOR1 | 0.3 | 0.0 | -1.5 | 0.0 | -0.2 | -0.8 | -0.1 | -1.0 | -1.6 | 0.3 | -0.4 | -0.1 |
| SULP | 0.2 | -1.1 | 3.8 | 0.1 | -0.5 | 3.8 | -0.1 | -0.7 | 3.6 | 0.1 | -0.6 | 0.6 |
| BUCU | 0.7 | 1.5 | -0.8 | 0.5 | 1.2 | -0.4 | 0.5 | 1.6 | -0.9 | 0.1 | -0.6 | 0.6 |
| MIKL | -0.4 | -1.6 | 0.1 | -0.3 | -1.6 | 0.4 | -0.9 | -1.0 | 1.1 | -0.8 | -1.8 | -0.8 |
| CRAO | -0.3 | 1.1 | 0.1 | -0.3 | 1.0 | 2.4 | -0.7 | 0.6 | 0.9 | -0.9 | 0.5 | 0.3 |
| TRAB | 0.1 | 0.0 | -4.5 | 0.6 | -0.6 | -6.6 | 1.5 | -0.8 | -4.5 | 1.4 | -0.9 | -3.5 |
| EVPA | 0.0 | 0.3 | -0.7 | 0.2 | 0.1 | -0.5 | -0.2 | 0.2 | -0.1 | 0.2 | 0.2 | -1.9 |
| ISTA | 0.6 | 0.5 | -3.0 | 0.5 | -0.8 | -4.4 | 0.8 | 0.2 | -3.9 | 0.0 | 1.1 | -1.5 |
| GLSV | 0.1 | 0.1 | 1.0 | 0.1 | -0.5 | 0.5 | -0.3 | 0.3 | 0.5 | -0.1 | -0.1 | 1.1 |
| POLV | 0.0 | 0.5 | 0.9 | 0.5 | 1.1 | 1.7 | -0.3 | 0.5 | -1.6 | -0.5 | -0.4 | -2.7 |
| VLNS | 0.7 | -1.8 | 2.1 | -0.1 | -1.0 | -1.2 | 0.2 | -0.9 | 0.0 | 0.7 | 1.2 | 0.1 |
| KHAR | -0.5 | 0.7 | 1.4 | 0.1 | -0.7 | 0.4 | -0.5 | 0.4 | -0.5 | -0.1 | -1.5 | 0.5 |
| MOBN | -1.8 | -2.3 | -4.9 | -1.3 | -0.6 | -2.5 | -1.2 | -0.6 | -1.6 | -1.0 | 0.0 | -0.7 |
| MATE | 0.8 | 0.2 | 1.6 | 0.1 | 0.6 | 2.5 | 0.9 | 0.2 | 2.2 | -0.2 | 0.0 | 2.0 |
| UZHL | 0.5 | 0.3 | -0.1 | -0.1 | 0.4 | -0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 0.2 |
| WTZR | 0.8 | 0.1 | -1.2 | 0.9 | -0.1 | -1.1 | 1.0 | -0.9 | -0.6 | 0.7 | -0.7 | 0.6 |
| СКВ, мм | | 1.9 | | | 2.0 | | | 1.7 | | | 1.6 | |

Таблиця 6. Коефіцієнти перетворення Гельмерта між розв'язками для GPS-тижнів 1259—1262

| Номер тижня | Зсув по осі X, мм | Зсув по осі Y, мм | Зсув по осі Z, мм | Поворот навколо осі X, мс | Поворот навколо осі Y, мс | Поворот навколо осі Z, мс | Масштабний множник, мкм/км | СКВ, мм |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------|
| GAO – UKR | | | | | | | | |
| 1259 | -0.4±0.4 | 2.2±0.4 | 1.6±0.4 | 0.0±0.1 | 0.2±0.2 | 0.1±0.1 | 1.2±0.5 | 1.6 |
| 1260 | 0.3±0.4 | 1.0±0.4 | 2.9±0.4 | 0.5±0.1 | 0.4±0.2 | 0.2±0.1 | 1.1±0.6 | 1.9 |
| 1261 | 0.7±0.5 | -1.4±0.5 | -3.1±0.5 | 0.0±0.2 | 0.4±0.2 | 0.2±0.1 | 1.0±0.6 | 2.1 |
| 1262 | -0.2±0.5 | 1.4±0.5 | -0.3±0.5 | 0.0±0.2 | 0.1±0.2 | 0.2±0.1 | 1.7±0.1 | 2.1 |
| MAO – UKR | | | | | | | | |
| 1259 | -0.4±0.3 | 1.3±0.3 | -0.2±0.3 | 0.3±0.1 | 0.2±0.1 | 0.0±0.1 | 0.3±0.4 | 1.2 |
| 1260 | 1.0±0.3 | 0.6±0.3 | -2.0±0.3 | 0.3±0.1 | 0.1±0.1 | 0.0±0.1 | 0.0±0.4 | 1.2 |
| 1261 | 1.2±0.2 | -1.1±0.2 | -6.4±0.2 | 0.6±0.1 | 0.0±0.1 | 0.0±0.1 | -0.5±0.3 | 0.9 |
| 1262 | 0.6±0.3 | 0.4±0.3 | -3.4±0.3 | 0.4±0.1 | 0.2±0.1 | 0.0±0.1 | -0.3±0.4 | 1.2 |

Оскільки нас цікавить узгодженість результатів роботи двох програмних продуктів, ми не наводимо абсолютних значень координат GPS-станцій для MAO і GAO. Табл. 2 містить різниці координат станцій у розв'язках MAO та GAO. GAO отримано в системі координат ITRF2000 завдяки накладанню жорстких обмежень на опорні станції, координати яких взято з каталога ITRF2000. Вказані обмеження використовуються для отримання тижневих розв'язків EPN.

КОМБІНАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ, ОТРИМАНИХ ПРОГРАМНИМИ КОМПЛЕКСАМИ GAMIT/GLOBK ТА «BERNESE GPS SOFTWARE»

Результати обробки було конвертовано з внутрішнього формату GAMIT (h-файли) у формат SINEX ver. 1.00. За допомогою «Bernese Software» було виконано комбінацію даних у SINEX-форматах для вказаного вище ряду спостережень, у результаті чого отримано об'єднані розв'язки UKR для GPS-тижнів 1259—1262. Результати наведено в табл. 3.

Порівняння результатів, отриманих різними програмами. Для порівняння розв'язку, отриманого ПЗ GAMIT/GLOBK, та розв'язку Локального центру обробки GPS-спостережень ГАО НАН України було обчислено параметри перетворення Гельмерта, наведені в табл. 4.

Як видно, параметри переходу між системами координат, які задають розв'язки, малі за абсолютною величиною. Найбільше значення складають зсуви по осі Z, що пояснюється найбільшою похибкою визначення вертикальної складової у порівнянні з горизонтальними. Було обчислено також залишки після перетворення Гельмерта, які подано в табл. 5. Залишки після перетворення складають в середньому 2 мм, максимального значення вони досягають для крайніх станцій — до 8 мм.

Аналіз отриманих результатів показує, що різниці між розв'язками лежать у межах похибки, яку оцінює IGS [11]. Це свідчить про можливість усунення внутрішніх похибок «Bernese Software» за допомогою комбінування розв'язку, отриманого цим ПЗ, з розв'язком ПЗ GAMIT/GLOBK.

Табл. 6 показує коефіцієнти переходу між системами координат, які задають розв'язки GAO, MAO та комбінованим розв'язком UKR. Більші значення параметрів переходу UKR — GAO та середнього квадратичного відхилення (СКВ) для цього переходу зумовлені особливістю обчислення UKR. Його отримано за допомогою модулів «Bernese GPS Software» з SINEX-файлів. Така процедура передбачає

відновлення твірної матриці нормальних рівнянь з матриці коваріацій за допомогою зняття накладених обмежень, а також обчислення ваг нормальних рівнянь. При комбінації розв'язків ми вважали, що MAO і GAO мають однакову вагу, не проводячи досліджень достовірності матриць коваріацій розв'язків, отриманих різними ПЗ. Проте у повідомленні IGS [<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/mail/igsreport/2004/msg00152.html>] та у роботі [6] повідомлялося, що ПЗ «Bernese GPS Software» та GAMIT переоцінюють формальну похибку обробки у 3—30 та 1—10 разів відповідно через особливості цих ПЗ (нехтування кореляцією параметрів між епохами, систематичні похибки, неточність моделювання стохастичних параметрів, довільність у приписуванні апріорної похибки спотереженням тощо). Один із варіантів обчислення масштабних множників формальних похибок для різних ПЗ подано у роботі [5].

ВИСНОВКИ

Аналіз розв'язків програмних комплексів «Bernese GPS Software ver. 4.2» та GAMIT/GLOBK ver. 10.1 (MAO та GAO) показує їхню узгодженість на рівні похибки визначення координат станцій перманентної GPS-мережі. Виняток складають крайні станції вибраної мережі (ISTA, TRAB, ZECK, MOBN, VLNS), для яких точність визначення координат є найменшою. Вищезазначене підтверджує можливість працювати з ПЗ GAMIT/GLOBK за стандартами EPN. Отримано комбінований розв'язок UKR. Розв'язки UKR в майбутньому, за умови обчислення вагових множників розв'язків GAO та MAO, рекомендуємо використовувати як продукт Локального центру обробки GPS-спостережень ГАО НАН України.

Робота виконана за підтримки гранту ДФФД Міністерства освіти і науки України Ф7/256-2001.

Автор щиро вдячний О. Ході за обчислення, виконані за допомогою ПЗ «Bernese GPS Software ver 4.2».

1. Bernese GPS Software Version 4.2 / Eds U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez. — Berne: Astron. Inst., Univ. of Berne, 2001.—515 p.
2. Blewitt G. An automatic algorithm for GPS data // *Geophys. Res. Lett.*—1990.—17, N 3.—P. 199—202.
3. Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software / R. King, Y. Bock. — Massachusetts Inst. of Technology, 2003.—320 p.
4. Feigl K., Andrew D., Bock Y., et al. Measurement of the

- velocity field in central and southern California // *J. Geophys. Res.*—1993.—98, N B3.—P. 21667—21712.
5. Kashani I., Wielgosl P., Grejner-Brzezinska D. A. On the reliability of the VCV Matrix: A case study based on GAMIT and Bernese GPS Software // *GPS Solutions.*—2004.—N 8.—P. 193—199.
 6. Mao A., Harrison C., Dixon Th. Noise in GPS coordinate time series // *J. Geophys. Res.*—1999.—105, N B2.—P. 2797—1999.
 7. 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.
 8. Niell A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // *J. Geophys. Res.*—1996.—101, N B2.—P. 3227—3246.
 9. Saastamoinen I. I. Contribution to the theory of atmospheric refraction // *Bull. Geodesique.*—1973.—107.—P. 13—43.
 10. Schaffrin B., Bock Y. A unified scheme for processing GPS phase observations // *Bull. Geodesique.*—1988.—62.—P. 142—160.
 11. Weber W., Ray J., Kouba J. Review of IGS Analysis Products // *Proc. IGS Network, Data, and Analysis Centre 2002*

Workshop “Towards Real-Time”, April 8—11, 2002, Ottawa, Canada. — Ottawa, 2002.—P. 3—10.

COMPARISON BETWEEN RESULTS OF UKRAINIAN PERMANENT GPS-NETWORK DATA PROCESSING WITH GAMIT/GLOBK AND MAO GPS LOCAL ANALYSIS CENTRE RESULTS

M. O. Lytvyn

A monthly series of Ukrainian Permanent GPS-network data is processed with the use of GAMIT/GLOBK ver. 10.1 and four weekly solutions are derived. These results are in good agreement with analogous solutions of the Local Analysis Centre at the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine. Four combined solutions and transformation parameters between the coordinate systems are computed. An analysis of the solutions shows that it is possible to work with GAMIT/GLOBK according to EPN standards and that combined solution can be used as a product of the Local Analysis Centre.

УДК 539.4

Р. В. Гаврилов

Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з кріогенної техніки
Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

**Наземные и орбитальные исследования
материалов, процессов и конструкций
ракетно-космической техники.
Создание наземной имитационной базы**

Надійшла до редакції 07.02.05

Описуються науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, що проводяться останнім часом в СКТБ ФТІНТ НАНУ за напрямками: вплив факторів космічного простору на терморадіаційні властивості покриттів, які застосовуються для «радіаційного» охолодження космічних апаратів; теоретичні дослідження теплових режимів космічних апаратів; створення стендів для імітації впливу факторів космічного простору; підготовка орбітальних експериментів на РС МКС; розробка бортових систем охолодження.

**1. ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО
ПРОСТРАНСТВА НА ПОКРЫТИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ
ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Это направление включает в себя разносторонние физические исследования, направленные на решение проблемы обеспечения работоспособности, надежности и долговечности широкого класса используемых в аэрокосмической технике конструктивных и функциональных материалов и покрытий (металлов, сплавов, композитов, керамик, стекол, пластиков и др.) в экстремальных эксплуатационных условиях (низкие и очень низкие температуры, глубокий вакуум, жидкие и газообразные криогенные среды, высокие магнитные поля, высокие статические, динамические и знакопеременные циклические нагрузки, многократные градиентные термонагрузки, электромагнитное излучение Солнца и потоки корпускулярного излучения в широком диапазоне энергий).

Работы в этом направлении в СКТБ ФТІНТ ведутся в интересах украинских предприятий космической отрасли и по заказам российских космических организаций [4, 7, 11, 12].

В течение последних двух лет на имитационной базе СКТБ проводятся систематические исследова-

ния физических свойств новых функциональных и конструкционных материалов отечественной разработки с целью определения их пригодности к эксплуатации в условиях космоса и установления ресурса их работоспособности при воздействии факторов космического полета. Результаты таких исследований кладутся в основу рекомендаций по использованию материалов и по совершенствованию технологий их изготовления.

Терморадіаційні свойства покриттів. В конструкциях современных космических аппаратов, а именно в пассивных системах терморегулирования, широко используются лакокрасочные материалы в качестве терморегулирующих покрытий (ТРП). Нанесенные на внешнюю поверхность аппарата, они предназначены для поддержания определенного теплового режима объекта за счет установления баланса между поступающей тепловой энергией (поглощаемой из окружающей среды и выделяемой внутренними источниками тепла) и энергией, излучаемой поверхностью космического аппарата в окружающую среду. Этот баланс особенно важен для пилотируемых космических аппаратов, к которым предъявляются наиболее жесткие требования, и для которых лучистый теплообмен является единственной формой теплообмена с окружающей средой.

Основным внешним источником энергии является солнечное излучение, а главным (в космическом аппарате — единственным) путем сброса теплоты оказывается собственное тепловое излучение наружной поверхности объекта. Поэтому эффективность материала ТРП характеризуется двумя основными оптическими (терморadiационными) параметрами: коэффициентом поглощения солнечного излучения A_s и коэффициентом излучения (черноты) ε . Температура тела, освещаемого Солнцем, определяется соотношением оптических параметров наружной поверхности A_s/ε . Для отражающих покрытий характерны значения $A_s < 0.2$ и $\varepsilon < 0.2$ и отношение $A_s/\varepsilon = 1$; для поглощающих — $A_s > 0.9$ и $\varepsilon > 0.9$ при $A_s/\varepsilon = 1$. Солнечные отражатели характерны тем, что для них $A_s < 0.2$ и $\varepsilon > 0.9$. Солнечные поглотители — это материалы, для которых $A_s \approx 1$ и $\varepsilon < 0.1$.

Интегральный коэффициент излучения ε в ИК-области определялся в спектральном диапазоне $\lambda\lambda = 3\text{—}40$ мкм. При температурах, близких к нормальной (20°C), около 97 % излучения черного тела заключено именно в этом участке спектра. Интегральный коэффициент поглощения солнечной энергии A_s измерялся в интервале длин волн $\lambda\lambda = 0.3\text{...}2.4$ мкм, так как практически вся энергия солнечного излучения приходится на эту область спектра.

Объектами исследования служили белые и черные лакокрасочные покрытия, нанесенные на подложки из алюминиевого сплава, и фрагменты каркаса солнечных батарей. Терморadiационные характеристики измерялись в исходном состоянии, а также после воздействия моделируемых в наземных имитаторах факторов космического пространства (ФКП). Одновременно с оптическими измерениями изучались также процессы газовой выделенности и потери массы образцами ТРП.

Проведенные исследования показали, что воздействие искусственных ФКП по-разному влияет на оптические характеристики и состояние поверхности. Так, одновременное воздействие потоков протонов и электронов $1.625 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ с энергией 150 кэВ (что соответствует пяти годам нахождения аппарата на орбите высотой 700 км) и электромагнитного излучения Солнца с интенсивностью 0.14 Дж/см^2 в диапазоне длин волн $\lambda\lambda = 0.25\text{...}2.5$ мкм привело к заметному увеличению значений A_s (1.5—2 раза); при этом величина ε практически не изменилась. В то же время было обнаружено заметное снижение ε в образцах, подвергнутых термоциклированию в интервале $20\text{...}300 \text{ K}$, что связывается с растрескиванием по-

крытий. Несколько неожиданным оказалось отсутствие заметного влияния на оптические свойства поверхности сотовых панелей, облученных электронами с энергией 1 МэВ.

Масс-спектрометрическое исследование газовой выделенности в вакууме сотовых конструкций с углепластиковой обшивкой при воздействии электромагнитного излучения показало, что процессы потери массы и обезгаживание образцов имеют тенденцию к насыщению. В заключительных спектрах остаются пики масс диапазона 2—45 а. е., интенсивность пиков зависит от температуры образцов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ. СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ СТЕНДОВ

2.1. Пакет программ TANSAT для тепловых расчетов космических аппаратов в условиях орбитального полета и при проведении наземных термовакуумных испытаний

Пакет программ TANSAT разработан для расчета нестационарных температурных полей и тепловых потоков в элементах КА с активными и пассивными системами терморегулирования в условиях орбитального полета и при термовакуумных испытаниях в имитаторах космического пространства [5].

При решении задачи сложного теплообмена в системе элементов КА моделируется воздействие нестационарных внешних (Солнце, Земля, элементы камеры имитатора) и внутренних тепловых источников/стоков, диффузное или диффузно-зеркальное отражение излучения, анизотропная теплопроводность элементов конструкции. Учитываются вековые возмущения параметров орбиты и заданная временная зависимость ориентации КА в полете. При испытаниях КА в термовакуумном

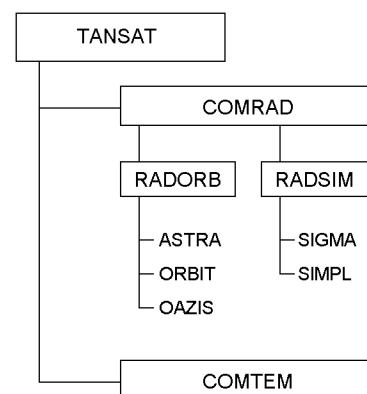


Рис. 1. Состав пакета TANSAT

имитаторе моделируется воздействие на объект испытаний потоков излучения от имитаторов Солнца и Земли.

В состав пакета TANSAT, показанном на рис. 1, входят программные системы COMRAD и COMTEM. Система COMRAD предназначена для формирования оптико-геометрических моделей КА и решения задач внешнего и внутреннего лучистого теплообмена соответственно при орбитальном полете (подсистема RADORB) и при термовакуумных испытаниях (RADSIM).

Программная система COMTEM предназначена для расчета температурных полей в элементах КА, при работе в пакетном режиме она использует результаты, полученные программной системой COMRAD.

Программы пакета тестированы на задачах, для которых решения получены аналитически или другими численными методами. В зависимости от постановки задачи программы могут работать автономно или в составе пакета.

ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА COMRAD. Подсистема RADORB. Программная подсистема включает программы ASTRA, ORBIT, OAZIS и используется при расчете теплового режима КА в условиях орбитального полета.

ASTRA предназначена для автоматизированного построения оптико-геометрических моделей КА, их модификации, хранения и графического отображения. Рабочей системой координат (СК) при построении модели КА является приборная декартова СК, связанная с отдельным прибором, отсеком или всем КА. Оптико-геометрическая модель КА строится из набора базовых геометрических фигур (конструктивов), ограниченных системой конечных элементов (граней) базовых типов поверхностей: плоскости, сферы и цилиндра, конуса, параболоида. Грани представляют определенные стороны объемных расчетных элементов КА, для которых определяются температуры.

Базовый конструктив характеризуется системой координат конструктива (СКК) $X_k Y_k Z_k$; геометрическими параметрами в СКК, признаком наружной (+) или внутренней (−) стороны; порядком нумерации граней; оптическими характеристиками граней ε , A_s . При построении модели КА из базовых конструктивов задачи для них в приборной СК указываются координаты точки привязки начала СКК и установочные углы осей OX_k , OY_k .

ORBIT используется для моделирования орбитального движения КА и вычисления данных, необходимых при расчете потоков излучения от Земли и Солнца. Вычисляются: текущие параметры орби-

ты с учетом вековых возмущений от второй зональной гармоники геопотенциала; положение КА и ориентация приборной СК на орбите; координаты Земли и орт направления на Солнце в приборной СК. Для решения этих задач используются несколько групп систем координат, которые иерархически связывают приборную СК с программно-путевыми КА-центрическими СК: экваториальной, перигейной, орбитальной и эклиптической.

Программа обеспечивает возможность получить в выбранном ракурсе графическое изображение взаимного положения Земли, КА на орбите, Солнца на эклипнике в геоэкваториальной системе координат.

OAZIS решает задачи внутреннего и внешнего лучистого теплообмена элементов КА. Методом Монте-Карло вычисляются разрешающие угловые коэффициенты излучения в поглощенных потоках: $\varphi_{ij}^{(p)}$ между i -й и j -й гранями модели КА; $\varphi_{E,i}^{(p)}$ между i -й гранью и поверхностью Земли (ИК-излучение), $\varphi_{SE,i}^{(p)}$ между i -й гранью и неравномерно освещенной частью поверхности Земли (солнечный спектр) в p -м положении КА на расчетном витке. При расчете $\varphi_{E,i}^{(p)}$ и $\varphi_{SE,i}^{(p)}$ учитываются заданные широтная и долготная зависимости плотности потока собственного излучения и альbedo Земли.

Поглощенные i -й гранью плотность q_i потоков собственного излучения системы, потоков собственного Q_E и отраженного солнечного Q_{SE} излучения от Земли (в p -м положении КА на витке) определяются выражениями

$$q_i = \varepsilon_i \sum_{j=1}^{K_F} \varphi_{ij} \sigma T_j^4,$$

$$Q_{E,i}^{(p)} = \varepsilon_i A_i \varphi_{E,i}^{(p)} q_E, \quad Q_{SE,i}^{(p)} = a_i A_i \varphi_{SE,i}^{(p)} \alpha_s q_S.$$

Здесь A_i , T_i — площадь и температура поверхности грани; q_E , q_S — плотность потока собственного излучения Земли и солнечная постоянная; α_s — альbedo Земли. Поток прямого излучения Солнца, поглощенный j -й гранью, равен

$$Q_{S,j}^{(p)} = \sum_{i=1}^{K_F} \varphi_{ij}^{(p)} Q_{пад,i}^{(p)},$$

$$Q_{пад,i}^{(p)} = 0.5 q_S \int_{(A_i)} ((\nu_i(P) \cdot \mathbf{r}_S^{(p)}) + |(\nu_i(P) \cdot \mathbf{r}_S^{(p)})|) dA_i,$$

где $Q_{пад,i}^{(p)}$ — прямой солнечный поток, падающий на i -ю грань (коэффициент отражения грани учитывается при вычислении $\varphi_{ij}^{(p)}$); $\nu_i(P)$ — орт нормали в точке P , принадлежащей грани A_i ; $\mathbf{r}_S^{(p)}$ — орт направления на Солнце.

Подсистема RADSIM. Программная подсистема включает программы SIGMA и SIMPL. Она пред-

назначена для численного моделирования лучистого теплообмена КА в термовакуумной камере, расчета имитаторов излучения Солнца и Земли с «точечными» и протяженными источниками излучения, зеркально-линзовыми оптическими системами.

SIGMA используется для формирования оптико-геометрической модели исследуемой системы с помощью набора базовых конструктивов. Включает все конструктивы программы ASTRA, а также дополнительные конструктивы элементов оптических систем: параболоида, эллипсоида и гиперболоида, линзовых элементов с плоскими и сферическими поверхностями, решетчатые ослабители излучения (38 конструктивов).

SIMPL предназначена прежде всего для расчета лучистого переноса от источников излучения к «приемнику» (референтная плоскость) в имитаторах излучения с оптическими системами. Рассматриваются оптические системы с неоднородными свойствами граничных поверхностей, диффузно-зеркальным законом отражения, преломлением и поглощением излучения в линзовых элементах. Моделируется диффузный закон излучения с грани-источника в конусе с углом полураствора $0..90^\circ$. Для имитатора излучения Солнца вычисляются: двумерные распределения освещенности и угла декоррелиации в заданной области референтной плоскости; средняя интегральная освещенность; средняя квадратичная неравномерность освещенности.

ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА СОМТЕМ предназначена для расчета поля температур в элементах КА с использованием результатов решения радиационной задачи, полученных COMRAD. Конструкция КА разбивается на множество изотермических (вершины) и одномерных (дуги) расчетных элементов. Тепловые связи расчетных элементов описываются ориентированным графом. Учитываются внешние и внутренние нестационарные тепловые источники и терморегуляторы: жалюзи, вентиляторы, нагреватели.

Для i -й дуги температура $T_i(x, t)$ определяется уравнениями

$$(\rho \cdot c \cdot F)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[(\lambda \cdot F)_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right] - \Lambda \kappa_i \frac{\partial T_i}{\partial x} + q(T_i, x, t) + \sum_{n \rightarrow i} \Lambda_{ni} (T_n - T_i),$$

где $0 \leq x \leq L_i$, $i = 1, 2, \dots, K_A$, t, x — временная и пространственная координаты; ρ, c, λ — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности; $F = F(x)$ — площадь поперечного сечения; $\Lambda \kappa$ — коэффициент конвективной про-

димости; $q(T, x, t)$ — линейная плотность внутреннего тепловыделения.

Для ν -й вершины температура $\theta_\nu(t)$ определяется уравнениями

$$(mc)_\nu \frac{d\theta_\nu}{dt} = Q_\nu(\theta_\nu, t) + \sum_{j=1}^{K_N} r_{\nu j} \theta_j^4 + Q_\nu^{(e)} + \sum_{n \rightarrow \nu} \sigma_{\nu n} (\theta_n - \theta_\nu) + \sum_{k' \rightarrow \nu} (\lambda F)_{k'} \partial T_{k'} \cdot \partial x \Big|_{x=0} - \sum_{k' \rightarrow \nu} (\lambda F)_{k'} \frac{\partial T_{k'}}{\partial x} \Big|_{x=L},$$

$$\nu = 1, 2, \dots, K_N,$$

где m, c — масса и удельная теплоемкость элемента; $Q_\nu(\theta_\nu, t)$ — источниковый член; $Q_\nu^{(e)}(t)$ — внешний тепловой поток на грани ν -й вершины. Первая сумма в правой части определяет результирующий поток излучения, вторая — тепловой поток по связям теплопроводностью, конвекцией или излучением от смежных граней. Последние две суммы учитывают кондуктивный тепловой поток по дугам, инцидентным ν -й вершине своим началом или концом.

Температура на краях дуг связана с температурами соответствующих вершин условиями непрерывности $T_i(0, t) = \theta_i(t)$, $T_i(L_i, t) = \theta_\nu(t)$, $i \rightarrow \nu$. Система уравнений для дуг и вершин решается численно методом конечных разностей на заданном временном интервале при начальных условиях $T_j(x, 0) = T_{0j}(x)$, $\theta_\nu(0) = \theta_{0\nu}$.

2.2. Расчет напряженно-деформированного состояния панели солнечной батареи космического аппарата при термическом нагружении

Солнечные батареи являются самым распространенным источником энергоснабжения космических аппаратов. В связи с постоянным расширением спектра задач, решаемых КА, ужесточением требований минимизации массы, увеличения энергопотребления его бортовой аппаратуры и повышения сроков активного существования КА на орбите перед конструкторами постоянно стоит проблема совершенствования конструкции СБ, и в частности, оптимизации ее структуры для обеспечения минимального уровня напряженности конструкции. Для ее решения необходимо обеспечить оперативный инженерный анализ структуры батареи. Наиболее подходящими для этого являются аналитические модели, основанные на расчетных схемах различного уровня точности.

Для решения поставленной задачи на базе двух расчетных схем многослойного клеевого соединения были выведены две унифицированные методики определения напряженно-деформированного состояния панели СБ КА при термомеханическом ее нагружении [2]. Панель СБ в обоих случаях представляется пятислойным клеевым соединением (см. [2]).

Наиболее простым представляется т.н. одномерный или плоский подход к решению задачи определения напряженно-деформированного состояния (НДС) данной структуры.

В качестве основы для исследования выбрана одномерная модель соединения, разработкой научных основ которой занимался еще Харт-Смитт [13]. Основные допущения данной модели:

- клеевая прослойка работает только на сдвиг;
- геометрические и жесткостные параметры деталей и клеевых слоев постоянны по длине;
- нормальные напряжения распределены по толщине равномерно;
- материалы деталей ортотропны в осях x и y .

При равномерном распределении нормальных и касательных напряжений по толщине деталей применяются две расчетные модели соединительного слоя. В классической — деформация сдвига соединительного слоя сосредоточена в клеевом слое, а во второй, предложенной Фолькерсеном [14] — в приведенном соединительном слое, включающем клеевую прослойку и половины толщин деталей, примыкающих к ней.

На базе данной расчетной схемы выведены основные соотношения, определяющие НДС конструкции СБ при термомеханическом нагружении, а также вытекающих из него структур меньшего порядка.

Данная методика основана на основных соотношениях механики, а результирующая система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\Pi_{ci} \sum_{j=1}^i \frac{d^2 N_{jk}}{dx^2} + \Pi_{i+1,x} N_{i+1,x} - \Pi_{ix} N_{ix} = a_i,$$

где Π_c и Π_{ix} — податливости клеевых прослоек и соединяемых деталей, a_i — константа, зависящая от физико-механических характеристик слоев СБ и температуры.

Методом последовательного исключения неизвестных из этой системы получаем дифференциальное уравнение относительно усилий в первой детали N_{ix} . Решив его, с учетом уравнений равновесия получаем зависимости для определения нормальных напряжений в деталях и касательных напряжений в клеевых прослойках. Константы интегрирования получают из граничных условий.

Поскольку корни характеристического уравнения

соответствующего дифференциального уравнения не всегда имеют аналитическое решение, проведено исследование характера корней для всего интервала жесткостных характеристик материалов. Показано, что корни действительные. Это позволило представить решение системы в виде суммы гиперболических синусов и косинусов, т.е. в аналитическом виде.

Одномерная расчетная схема является наиболее упрощенной, так как она не учитывает влияние ширины соединения на НДС. Лучшим приближением к истинному результату представляется квазидвумерный подход, по которому поперечные напряжения не влияют на продольные, а каждая полоска соединения шириной dx рассматривается изолированно.

Как и для одномерной модели, для квазидвумерной была получена основная система дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} & \Pi_{ci} \sum_{k=1}^i \left(\frac{d^2 N_{ky}}{dy^2} \right) + \Pi_{i+1,y} N_{i+1,y} - \\ & - \mu_{i+1,xy} \Pi_{i+1,x} N_{i+1,x} - \Pi_{iy} N_{iy} - \mu_{ixy} \Pi_{ix} N_{ix} = a_{iy}. \end{aligned}$$

Для направления x напряжения считаются по представленной выше одномерной модели.

Основным отличием данной модели от одномерной является возможность учета одного из коэффициентов Пуассона μ_{ixy} .

В качестве иллюстрации применимости рассматриваемых расчетных моделей для определения НДС СБ КА произведено определение и анализ НДС модельной структуры СБ разработки КНР, а также сравнение результатов данного расчета с результатами квазидвумерной модели и давно используемого научно-обоснованного метода конечных элементов (МКЭ).

Рассматривались два расчетных случая нагружения СБ: теневой (-100°C) и солнечный ($+100^\circ\text{C}$) участок орбиты. Для упрощения анализа не рассматривался случай теплового удара при переходе КА через терминатор, не учитывались процессы теплопроводности, а конструкция считалась равномерно прогретой.

Расчеты показали, что конструкция СБ максимально нагружена на теневом участке орбиты. Максимум нормальных напряжений наблюдается в средней части панели. Что касается касательных напряжений, то максимум, полученный по одномерной и квазидвумерной методикам, наблюдается на краю соединения. МКЭ, в отличие от приведенных выше методик, позволяет удовлетворить граничным условиям на краю соединения. Соответственно и максимум находится на расстоянии поряд-

ка нескольких толщин слоя от края соединения, однако также в крайней области панели.

Максимальные касательные напряжения наблюдаются в клеевых прослойках, совместных с полиимидным слоем, однако они намного меньше предела прочности клея на сдвиг, что говорит о работоспособности рассматриваемой конструкции. Разрушение конструкции, если и возможно, то от сдвиговых нагрузок при большом количестве циклов нагружения. Испытание СБ производства КНР, проводившееся в СКТБ ФТИНТ НАНУ, на циклическое нагружение, эквивалентное году нахождения КА на геостационарной орбите, не привело не только к разрушению конструкции панели, но и к существенной деградации ее свойств. Не удалось также добиться разрушения конструкции и при жестком ударном температурном нагружении. Эти факты, а также результаты математического моделирования говорят о великолепных эксплуатационных качествах данной конструкции.

Максимальные нормальные напряжения наблюдаются в полиимидном слое, однако они не определяют прочность соединения. Связано это с существенно более низкой прочностью клеевых прослоек на сдвиг по сравнению с прочностью соединяемых деталей.

Сравнение с результатами тестового моделирования, проводимого по МКЭ и квазиплоской модели дает основание сделать вывод о применимости рассматриваемой модели для определения и анализа НДС тонкопленочных структур СБ КА.

Одной из основных задач для конструктора является вопрос оптимизации разрабатываемой конструкции, определения ее рациональных параметров. Задача многопараметрической оптимизации является достаточно сложной для современного математического обеспечения, а в некоторых случаях эта проблема не решается математическими методами. Солнечная батарея в полной мере относится к такому классу конструкций ввиду наличия большого количества физико-механических характеристик входящих в нее материалов и разнообразия геометрических параметров этого соединения. Для оптимального проектирования СБ необходимо предварительно определить степень влияния этих параметров на НДС и выработать ряд рекомендаций по подбору оптимальных параметров и характеристик СБ.

В качестве основных геометрических параметров СБ принимаются: линейные размеры панели (ее длина и ширина) и толщины соединяемых слоев и клеевых прослоек. Существенное влияние на НДС СБ оказывают так же упругие характеристики входящих в нее материалов соединяемых деталей

клеевых прослоек, т. е. модуль упругости соединяемых деталей E , модуль сдвига клеевых прослоек G , коэффициент линейного термического расширения α и коэффициент Пуассона μ .

Результаты параметрического исследования (рис. 2) показали, что максимальное влияние на сдвиговую прочность СБ оказывают геометрические и жесткостные характеристики полиимидного слоя и двух прилегающих к нему клеевых прослоек. При увеличении толщины полиимида наблюдается существенное увеличение уровня касательных напряжений. Увеличение же толщины клеевых прослоек приводит к уменьшению уровня действующих в них касательных напряжений. Повлиять на уровень нормальных напряжений в конструкции можно за счет увеличения толщины полиимидного слоя примерно до 0.3 мм, что приведет к некоторому уменьшению нормальных напряжений в нем и к увеличению касательных напряжений. Аналогичное влияние оказывает увеличение толщины слоя углепластика, ближайшего к полиимидному слою. При увеличении длины соединения напряжения в СБ асимптотически увеличиваются, стремясь к определенному значению.

В итоге были даны некоторые рекомендации по созданию оптимально прочных панелей СБ. Так,

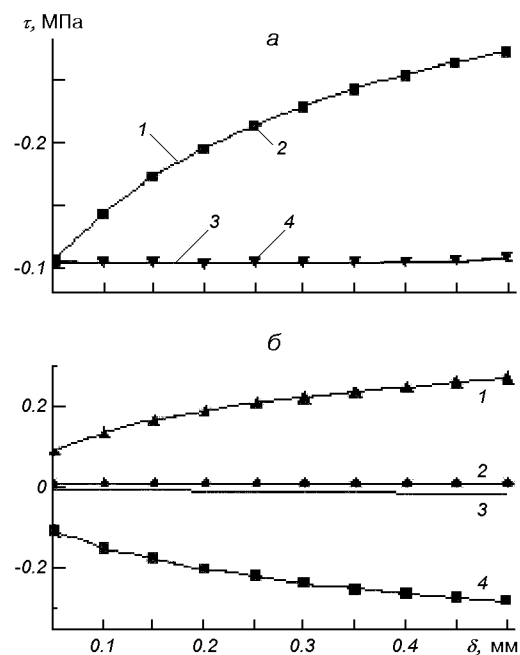


Рис. 2. Зависимости максимальных касательных напряжений τ_{\max} СБ от толщины δ углепластика, полиимида, кремния и стекла (а, 1 — углепластик, 2 — полиимид, 3 — стекло, 4 — кремний) и касательных напряжений τ_{\max} в каждом слое от толщины δ полиимида (б, 1 — верхний клей, 2 — оптический клей, 3 — сотовый наполнитель, 4 — нижний клей)

минимизировать уровень сдвиговых напряжений в клеевых прослойках СБ можно за счет постановки углепластиковых обшивок и полиимидной пленки минимальной толщины и минимально возможной жесткости. Уровень нагруженности конструкции от сдвиговых напряжений снижается также при подборе материалов с близкими КЛТР.

Повлиять на геометрические характеристики клеевых прослоек тяжело, да и их воздействие на НДС невелико. В то же время увеличение модуля сдвига и предела прочности клеевых прослоек на сдвиг очень желательно, поскольку это позволит снизить уровень напряжений в СБ и увеличить срок эксплуатации.

2.3. Стенд термовакуумных испытаний космических аппаратов (СТВИ)

Неодинаковость нагрева отдельных частей КА в полете, изменение во времени коэффициентов поглощения и степени черноты наружных его поверхностей, учет рассеивания внутренней энергии — все это требует специальных, подчас весьма сложных экспериментальных исследований, которые целесообразно проводить при наземной отработке летательных аппаратов с помощью специальных установок, имитирующих условия космического пространства.

Описываемый стенд термовакуумных испытаний КА предназначен для имитации космического вакуума, холодного космического пространства, электромагнитной радиации Солнца, Земли и альbedo Земли и определения влияния этих факторов на тепловой режим конструкции и аппаратуры КА, размещаемого в криовакуумной камере стенда на опорно-поворотном устройстве, имитирующем движение КА по заданной орбите вокруг Земли [6].

В состав стенда термовакуумных испытаний (СТВИ) космических аппаратов входят имитаторы космического пространства и системы, обеспечивающие его работоспособность при проведении термовакуумных испытаний космических аппаратов: вакуум-камера; имитатор «холодного» космического пространства; система вакуумирования; имитатор солнечного излучения; имитатор излучения Земли; опорно-поворотное устройство; система управления, измерения и обработки параметров аппаратуры стенда термовакуумных испытаний и система контроля параметров элементов конструкции КА.

Расположение вакуум-камеры стенда — горизонтальное. Вакуум-камера предназначена для создания замкнутого герметичного пространства, в котором имитируются внешние условия функциониро-

вания КА на орбите (вакуум, излучения Солнца, Земли, холод космического пространства), а также для размещения в ней и стыковки испытываемого объекта (КА или его теплового макета) с узлами, агрегатами и другими системами и оборудованием. Обеспечена возможность визуального наблюдения за процессом испытаний КА. Внутренние размеры вакуум-камеры: диаметр до 3280 мм, длина 6725 мм.

Конструкция вакуум-камеры и опорно-поворотного устройства обеспечивает возможность монтажа КА с габаритами до 2 м и массой не менее 200 кг. Плоская отстыковываемая крышка камеры вместе со смонтированным на ней опорно-поворотным устройством может перемещаться на тележке по рельсовому пути на расстояние до 3 м для установки КА.

Модель космического пространства, полностью поглощающего тепловую радиацию КА и ничего не излучающего на его поверхность, представляет среду с коэффициентом поглощения, равным единице при температуре, близкой к 0 К. Практически такая модель выполнена в виде экранов, помещенных в вакуумную камеру и окружающих испытуемый объект. Изнутри экраны покрыты краской, имеющей коэффициент поглощения для радиации Солнца и Земли не менее 0.90 (в диапазоне длин волн $\lambda = 0.3...4$ мкм); снаружи экраны имеют большой коэффициент отражения. Покрытие экранов обладает низкой упругостью паров, стойкостью при облучении ультрафиолетовой радиацией, постоянством во времени коэффициента поглощения при изменениях температуры. Достаточно хорошая имитация космического пространства достигается путем охлаждения экранов жидким азотом (77—100 К). В этом случае собственное излучение внутренней поверхности экрана не превышает 0.5 % излучения КА (при средней его температуре около 300 К и отношении излучающих поверхностей экрана и спутника не менее 2:1).

Система вакуумирования, состоящая из безмасляной форвакуумной системы и высоковакуумной системы из криогенных и турбомолекулярных насосов, обеспечивает выход на рабочий режим до остаточного давления в вакуум-камере не выше 1 мПа за время не более 10 ч. Контроль остаточного газового состава, включая газовыделение исследуемого КА, осуществляется масс-спектрометром.

Имитатор солнечного излучения обеспечивает облучение КА потоком излучения со средней интенсивностью 1300...1500 Вт/м² в диапазоне длин волн $\lambda = 0.3...2.5$ мкм; спектральное распределение интенсивности облученности соответствует спектральному распределению интенсивности излучения ксеноновой лампы, что достаточно близко к спект-

ральному излучению Солнца. Оптическая схема имитатора позволяет достичь уровня средней квадратичной неравномерности облученности менее 10 % при непараллельности лучей менее 5°. Полный диаметр пятна облучения с нормируемыми параметрами — не менее 2.2 м. Оборудование имитатора Солнца обеспечивает непрерывную работу в течение не менее 3 сут не считая времени выхода на рабочий режим.

Имитатор излучения Земли предназначен для обеспечения облучения поверхности КА потоком ИК-излучения, плотность которого соответствует суммарной плотности собственного и отраженного солнечного излучения Земли на расчетной орбите КА. Имитатор конструктивно размещен на опорно-поворотном устройстве и ориентирован относительно КА таким образом, что направление потока излучения соответствует направлению потока излучения Земли на КА, находящегося на орбите. Конструктивно имитатор состоит из панелей нагревателей, образующих поверхность усеченной четырехгранной пирамиды (без большого основания), малое основание и грани которой заполнены черными полосками-излучателями, нагреваемыми электрическим током. Эффективная суммарная площадь нагревателей составляет не более 10 % от общей площади поверхностей рабочих граней пирамиды. Нагреватели объединены в несколько электрических секций. Каждая секция имеет измеритель температуры, сигналы от которых поступают в систему управления, которая обеспечивает поддержание необходимого значения температуры на каждой секции в зависимости от режима испытаний и имитации взаимного расположения Солнца, Земли и КА на его расчетной орбите. При имитации освещенных участков орбиты обеспечивается тепловой поток на КА с учетом альбедо Земли до 700 Вт/м².

Опорно-поворотное устройство включает в свой состав электрический привод, кинематический редуктор, поворотную платформу — узел крепления КА, узел укладки кабельной сети и контроллер управления, регулирующий направление и скорость вращения поворотной платформы. Поворотный узел крепления КА обеспечивает ориентацию оси вращения КА относительно светового потока имитатора Солнца под углом 67.5°.

Система управления, измерения и обработки информации осуществляет регулирование следующими процессами: поддержания заданного уровня жидкого азота в секциях радиационного экрана; управление масс-спектрометром; управление приводом опорно-поворотного устройства по заданной программе; измерение температуры и ее поддержа-

ние в секциях излучателей имитатора Земли; управление световым потоком 19 Хе-ламп для поддержания заданного светового потока каждой лампы; контроль за функционированием всех обеспечивающих систем стенда.

Система контроля параметров элементов конструкции КА обеспечивает измерение температурных полей испытуемого КА и параметров его функционирования.

3. БОРТОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

В настоящее время в рамках «Программы совместных научных исследований и технологических экспериментов на российском сегменте МКС» СКТБ ФТИНТ является постановщиком трех космических экспериментов: «Материал—Трение», «Кипение» и «Пента—Усталость». Эксперименты будут выполняться в кооперации с российскими организациями космической отрасли [1, 3, 8—10].

3.1. Исследование перспективных для космической техники материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве.

При длительном использовании орбитальных космических комплексов возможны нарушения и отказы функционирования ответственных бортовых систем в результате выхода из строя подвижных сопряжений. В связи с этим особенно важно получение достоверной информации о триботехнических свойствах конструкционных материалов в условиях реального космического полета.

Целью проведения космического эксперимента «Материал—Трение» является установление влияния факторов космического пространства на коэффициенты трения и механизмы изнашивания антифрикционных и износостойких материалов; определение адекватности характеристик трения и изнашивания идентичных материалов по результатам их испытаний непосредственно на борту международной космической станции и в наземных лабораторных условиях; а также определение триботехнических характеристик новых антифрикционных и износостойких материалов и покрытий в открытом космическом пространстве.

В 2003 г. совместно с ИПМ НАНУ, ГКБ «Южное» и ГНПП «Спецавтоматика» разработан эскизный проект КЭ «Материал—Трение» и основные методические положения по космическому эксперименту.

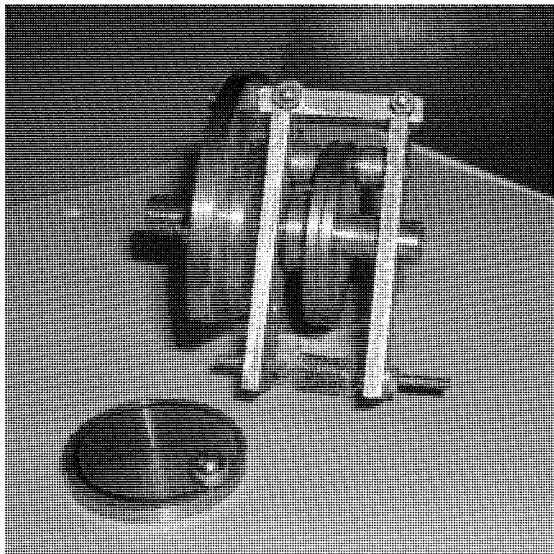


Рис. 3. Макет модульного узла трения многопозиционного бортового трибометра и пара трения «диск — шарик»

Основной составной частью научной аппаратуры для проведения КЭ является многопозиционный бортовой трибометр (БТ), включающий в себя 18 малогабаритных бортовых трибометров (МБТ). В состав комплекта бортового оборудования также входят образцы антифрикционных и износостойких материалов для экспонирования в открытом космическом пространстве, многоканальная система управления работой многопозиционного бортового трибометра, системный микроконтроллер, платформа для монтажа БТ на внешней оболочке МКС, транспортный контейнер и др.

Каждый малогабаритный бортовой трибометр представляет собой модульный узел трения (МТ) с электромеханическим приводом. На рис. 3 показаны макет модульного узла трения и пара трения, которая представляет собой ведущий (вращающийся) образец — диск, к торцевой поверхности которого прижимается ведомый (неподвижный) образец — шарик (или цилиндрический индентор). МТ включает в себя две пары трения скольжения, систему нагружения, датчики нормальной нагрузки и силы трения, датчики температуры и количества оборотов, а также элементы конструкции.

Выбор материалов пар трения для КЭ осуществляется на основании результатов наземных лабораторных испытаний в условиях, моделирующих воздействие основных ФКП на процессы трения и изнашивания. Для проведения отборочных испытаний используют криогенно-вакуумные установки для исследования трения УТИ-ТВ [11], созданные в СКТБ ФТИНТ НАНУ.

В настоящее время проведен первый цикл триботехнических исследований для ряда материалов, разработанных в ИПМ НАНУ [7]. Испытания материалов, в основу которых положен принцип самоорганизующихся систем, а также самосмазывающихся антифрикционных материалов на металлической основе (СКАМ) осуществляли на установке УТИ-ТВ в вакууме (0.2 мПа) при нормальной и низкой (120 К) температурах и на воздухе.

Показано, что при скорости скольжения 1.0 м/с и нормальной нагрузке 25 Н пары трения из материала с элементами самоорганизации (на основе сильнолегированной инструментальной стали) характеризуются высокой износостойкостью как при трении на воздухе, так и в вакууме. В установившемся период коэффициент трения для этих материалов составляет 0.48 при трении на воздухе и 0.4 — при трении в вакууме.

Пары трения из материалов типа СКАМ при указанных выше параметрах трения имеют на воздухе коэффициент трения от 0.2 до 0.3, а в вакууме при нормальной температуре — от 0.13 до 0.27 в зависимости от состава. При понижении температуры в вакууме наблюдается тенденция к некоторому уменьшению коэффициента трения.

В ходе исследований уточнены размеры образцов для бортового трибометра и определены оптимальные значения внешних параметров трения (нормальная нагрузка, скорость скольжения) для проведения триботехнических исследований на МКС.

3.2. Подготовка группы космических экспериментов «Исследование влияния микрогравитации на процессы кипения жидкого гелия, гидродинамику и теплообмен в жидком гелии» на борту Международной космической станции

На основе анализа разных источников о составе и принципах функционирования научной аппаратуры для проведения космических экспериментов по изучению влияния микрогравитации на физические процессы в криогенных жидкостях определены современные тенденции развития такой аппаратуры и разработана концепция криогенного универсального рабочего места (КУРМ) для выполнения совместной российско-украинской программы научных исследований на борту РС МКС.

Криогенные жидкости, и в первую очередь гелий, в больших количествах применяются в системах охлаждения бортовой научной аппаратуры. Успешно развиваются в США и научные исследования влияния микрогравитации на некоторые свойства жидкого гелия. Американские ученые планируют

продолжить эти исследования на МКС, используя создаваемую сейчас установку LTMPF (Low Temperature Microgravity Physics Facility).

В условиях микрогравитации характерные времена ряда физических процессов в жидкости сильно возрастают; ценность многих наблюдений объектов космического пространства также увеличивается с продолжительностью периода наблюдений. В то же время ясно, что дальнейшее увеличение длительности КЭ и ресурса автономной бортовой научной аппаратуры путем прямолинейного наращивания количества жидкого гелия, выводимого на орбиту в криостате, технически невыполнимо, поскольку требует увеличения размеров и массы последнего до недопустимых размеров. На повестке дня — поиск путей повышения эффективности использования криоагента и аппаратуры (т.е. научного результата на единицу массы, доставляемой на орбиту), сокращения грузопотоков в расчете на один КЭ.

Один из таких путей — многократное использование элементов научной аппаратуры. Установка LTMPF предполагает проведение в одном криостате 2-3 КЭ, затем возвращение криостата на Землю, замену отработавших экспериментальных ячеек на новый комплект, повторную заправку жидкого гелия и возвращение аппаратуры на МКС.

NASA ведется разработка новой технологии длительного хранения криогенных жидкостей в условиях микрогравитации без потерь — так называемой концепции ZBOS (zero boiloff storage — хранения без выкипания). Суть ее состоит в том, что паразитные теплопритоки в криостат с криогенной жидкостью (и тепловыделения от погруженных в жидкость элементов аппаратуры) компенсируются отбором тепла с помощью криорефрижератора и повторным ожижением образовавшегося пара.

Еще одна новая концепция, направленная на экономию криоагента, заключается в максимальном использовании холода космического пространства для предварительного или даже окончательного охлаждения значительной доли массы научной аппаратуры, запускаемой в «теплом» состоянии, т. е. не заправленной криогенными жидкостями.

Российскими учеными анализируется возможность повышения эффективности криогенных исследований путем создания на РС МКС КУРМ, объединяющего ряд предложенных низкотемпературных КЭ в единый комплекс с рациональным расходом криоресурсов и научной аппаратуры.

КУРМ является постоянно действующей космической криогенной лабораторией с автономной системой криобеспечения, где на сменяемых криостатах с набором экспериментальных ячеек может

длительное время проводиться широкий спектр КЭ по физике конденсированного состояния, высоко-точной сверхпроводимости и криоэлектронике, технологические эксперименты по отработке элементов мощных технических устройств, охлаждаемых жидким гелием. Создание и функционирование КУРМ предусматривает:

- развертывание на борту РС МКС совместимого с системами последней комплекса служебного оборудования, обеспечивающего периодическую смену научной аппаратуры и проведение КЭ на ней криоагентом, электроэнергией с необходимыми параметрами; контролем параметров и передачей служебной информации; сбором, обработкой, хранением и передачей на Землю научной информации по результатам КЭ; наконец — заданным уровнем микрогравитации;
- доставку на борт, перекачку из емкости в емкость, длительное хранение жидкого гелия с заданными параметрами состояния, а на втором этапе — сбор испарившегося гелия, его ожижение и повторное использование в научной аппаратуре;
- поочередную доставку на РС МКС сменной научной аппаратуры различного назначения, совместимой с интерфейсами КУРМ и обеспечивающими системами последнего, монтаж/демонтаж ее силами экипажа с использованием манипуляторов.

СКТБ ФТИНТ НАНУ с учетом вышеизложенных тенденций выполнена интеграция на концептуальном уровне российской идеологии КУРМ, российской научной программы КЭ с криогенными жидкостями и разрабатываемых с 1998 г. украинской группы КЭ «Исследование влияния микрогравитации на кипение жидкого гелия, гидродинамику и теплообмен» и криогенной полетной установки (КПУ) «Кипение». Последняя при этом рассматривается как один из важнейших компонентов КУРМ (рабочая площадка «Физика жидкости»), используемых на первом этапе его развертывания.

Каждый КЭ проводится на отдельной ячейке с использованием единого криогенного оборудования КПУ, что обещает значительную экономию средств и ресурсов по сравнению с реализацией аналогичной по содержанию программы в форме независимых экспериментов (каждый на своей установке). Общие особенности КЭ объединенной программы: использование нескольких уровней искусственной микрогравитации, получаемой за счет вращения криостата; визуализация и видеосъемка процессов в жидком гелии; исследование кипения и гидродинамики как в большом объеме неподвижной жид-

кости, так и в потоке, движущемся через канал.

Экспериментальные ячейки имеют разную геометрию, но содержат в той или иной конфигурации общие конструктивные элементы: электрические тепловыделяющие элементы, датчики температуры, датчики разности давлений и т.д. Суть всех КЭ состоит в подаче по заданной программе на нагреватели ячейки тепловой мощности и регистрации происходящих вследствие этого изменений температуры, разности давлений и внешней картины процесса (т. е. образования и движения паровых пузырей или пленок, перестройки структура двухфазного потока жидкого гелия и др.).

Криогенная полетная установка «Кипение» состоит из блока управления и регистрации (БУР) и двух гелиевых криостатов — исследовательского и расходного (РКЕ — расходная криогенная емкость) — размещенных на специальной платформе на внешней стороне корпуса РС МКС. Во вращающемся исследовательском криостате (далее ВКБ — вращающийся криогенный блок) размещены несколько (от трех до пяти) ячеек, на которых поочередно проводятся КЭ, и система видеосъемки. Через трубопровод с помощью насосов в ВКБ может подаваться поток нормального сверхтекучего жидкого гелия из РКЕ. Таким образом решаются две проблемы: проведение КЭ по теплообмену и гидродинамике при вынужденном движении жидкого гелия и дозаправка ВКБ. Объединенной научной программой КЭ предусмотрено последовательное использование двух пар криостатов на РС МКС: одна содержит нормальную жидкость при температуре 4.4 К; другая — сверхтекучую жидкость при температуре 1.8 К.

Предполагается, что на каждом из КЭ будет проведено по 4 сеанса КЭ: без вращения криостата и при трех угловых скоростях вращения, соответствующих значениям относительного центробежного ускорения у поверхности кипения ячейки $\eta = 10^{-4}$, 10^{-3} , 10^{-2} . Фактический уровень ускорения измеряется во время сеансов по трем взаимно перпендикулярным осям и регистрируется синхронно с результатами КЭ.

Основные технические характеристики КПУ:

- заправляемый на Земле объем жидкого гелия — 250 л (50 л — в ВКБ, 200 л — в РКЕ);
- продолжительность научной жизни криостатов на РС МКС — до 36 сут;
- общая масса КПУ — до 310 кг (в том числе заправленный ВКБ — 70 кг, заправленная РКЕ с трубопроводом — 200 кг);
- ориентировочные габариты двух криостатов в сборе с платформой снаружи РС МКС — высота 2200 мм, длина 1800 мм, ширина 900 мм;

- пиковое потребление электроэнергии во время сеансов КЭ — до 300 Вт; в дежурном режиме — до 100 Вт;
- общая продолжительность основной фазы сеансов КЭ — не более 32 ч;
- ресурс несменяемой части оборудования — до 3 лет.

Определено содержание и цели КЭ с жидким гелием, выполняемых на КПУ «Кипение».

Космический эксперимент «Пузырь» (постановщик — СКТБ ФТИНТ НАНУ) состоит из двух частей, выполняемых на одной ячейке, и имеет целью получить видеозапись процессов роста и отрыва паровых пузырей на единичном центре пузырькового кипения при локальном подводе тепла (собственно КЭ «Пузырь») и на единичном отверстии под действием избыточного давления (КЭ «Барботаж») в нормальном или сверхтекучем жидком гелии.

Космический эксперимент «Автоволна» (постановщик — СКТБ ФТИНТ НАНУ) состоит из двух частей, выполняемых на одной ЭЯ, и имеет целью получить опытные данные о направлении и скорости движения по поверхности кипения границы между областями с пузырьковым и пленочным режимами кипения нормального жидкого гелия.

Космический эксперимент «Пленка» (постановщик — Московский энергетический институт, Россия) имеет целью получить опытные данные об условиях возникновения (распада) и динамике паровой пленки в СТ жидкого гелия и о теплообмене.

Космический эксперимент «Импульс» (постановщик — Московский инженерно-физический институт, Россия) имеет целью получить опытные данные об условиях и временах задержки возникновения пузырькового и пленочного режимов кипения нормального жидкого гелия при различных режимах «ударного» теплоподвода к поверхности кипения.

Космический эксперимент «Пора» (постановщик — Институт высоких температур РАН, Россия) имеет целью получить опытные данные о теплообмене и размерах паровых пузырей в нормальном жидком гелии, кипящем на поверхностях с различными геометрическими характеристиками покрытия.

Космический эксперимент «Криомагистраль» (постановщик — Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Россия) состоит из двух частей — «Криомагистраль-1» и «Криомагистраль-2», которые различаются лишь параметрами жидкого гелия, подаваемого на вход в канал под избыточным давлением через трубопровод из РКЕ, и соответствующими средствами изме-

рения: в КЭ «Криомагистраль-1» используется нормальный жидкий гелий с температурой 4.4 К; в КЭ «Криомагистраль-2» — сверхтекучий жидкий гелий с температурой 1.8 К. Цель космического эксперимента — получить опытные данные о теплообмене, гидравлическом сопротивлении и режимах течения одно- и двухфазного потока жидкого гелия при различных массовых расходах.

В космическом эксперименте «Рэлей» (постановщик — ФТИНТ НАНУ) предполагается исследовать влияние микрогравитации на условия перехода (положение границы) между режимами кондуктивной и конвективной теплоотдачи к нормальному жидкому гелию.

В космическом эксперименте «Расслоение» (постановщик — ФТИНТ НАНУ) предполагается исследовать характер фазового расслоения и механизмов роста зародышей в растворах ^3He — ^4He при микрогравитации в области температур 0.3...0.8 К, кинетические характеристики фазового перехода и условия существования метастабильных растворов.

В космическом эксперименте «Срыв» (постановщик — ФТИНТ НАНУ) будут измерены характеристики пленки сверхтекучего жидкого гелия и характеристик критического теплового потока по гелиевой пленке при микрогравитации.

Космический эксперимент «Конвекция» (постановщик — Институт проблем механики РАН) состоит из двух частей. В первой из них (КЭ «Конвекция-Мега») планируется экспериментальное исследование основных крупномасштабных характеристик конвекции и процессов теплопереноса, температурного расслоения и увеличение давления в объеме криостата с жидким гелием. Во второй части (КЭ «Конвекция-Микро») предполагается провести экспериментальное исследование влияния различных уровней микрогравитации на основные характеристики конвекции типа Релея — Бенара в жидком гелии, находящемся в нормальном или сверхтекучем состоянии, а также в около- и закритическом термодинамическом состоянии, при контролируемом подводе тепла к границе объема.

Космический эксперимент «Сорбция» (постановщик — Московский энергетический институт) имеет целью изучение влияния микрогравитации на закономерности поведения тонких пленок гелия, сформированных путем сорбции из газа, при λ -переходе.

Космический эксперимент «Нанокластер» (постановщик — Институт физики твердого тела РАН) имеет целью изучение влияния микрогравитации на свойства примесных нанокластерных конденсатов (гелей), которые образуются при конденсации потока газообразного гелия с примесью паров ис-

ледуемого вещества в сверхтекучем гелии.

Параллельно с выполнением программы перечисленных КЭ на КПУ «Кипение» будет происходить развертывание КУРМ (доставка на РС еще двух рабочих площадок — для исследования мощных сверхпроводящих магнитных систем и для проведения прецизионных измерений с использованием охлаждаемых жидким гелием приборов; оборудования для сбора и повторного ожижения гелия и т.д.) и постепенный переход от доставки с Земли сменной научной аппаратуры, заправленной жидким гелием, к дозаправке аппаратуры на борту МКС от доставляемой с Земли транспортной емкости с жидким гелием и, наконец, к полному рециклингу жидкого гелия на КУРМ.

Ожидается, что новый подход к созданию научной аппаратуры, интегрирующий новые тенденции, позволит значительно повысить эффективность использования жидкого гелия и научной аппаратуры на борту МКС.

3.3. Исследование влияния факторов космического пространства на цикловую долговечность материалов в условиях реального космического полета. Космический эксперимент «Пента—Усталость».

Космический эксперимент «Пента—Усталость» подробно описан нами в работе [8]. В настоящее время подготовка эксперимента проходит стадию эскизного проектирования и макетирования научной аппаратуры и проведения наземных отборочных исследований материалов в условиях воздействия «искусственных» факторов космоса.

4. РАЗРАБОТКА БОРТОВЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

В последние три-пять лет СКТБ ФТИНТ проводит работы по созданию криогенных охладителей малой производительности, работающих по обратному циклу Стирлинга, которые могут быть использованы в космической технике и технологии.

Работы ведутся по трем направлениям:

- системы охлаждения при температуре 100 К и ниже, производительностью от 5 до 20 Вт для обеспечения экспериментальных исследований материалов в вакуумных камерах, имитирующих космическое пространство;
- комбинированные системы охлаждения с термоаккумуляторами на фазовых переходах и активными генераторами холода;
- автономные охладители широкого применения, в том числе для космического приборостроения.

Технологические системы охлаждения увеличенной холодопроизводительности позволяют уйти от использования жидкого азота в исследовательских установках, расширить диапазон рабочих температур на область ниже 78 К, упростить систему автоматического регулирования температуры охлаждения. Такие системы могут использоваться также для обеспечения работы систем криовакуумного обеспечения для получения безмасляного вакуума.

В своих разработках мы используем накопленный опыт по созданию безмасляных поршневых компрессоров с ротационным приводом и вынесенные охладители, работающие по сплит-схеме Стирлинга. Причем мы используем как охладители с активным приводом поршня-вытеснителя, так и пассивные (резонансные) машины. Компрессоры, как правило, имеют электропитание от промышленной сети 3-фазного переменного тока. Такие компрессоры обладают запасом мощности привода, что обеспечивает повышение объемной производительности, либо увеличение длины соединительных трубопроводов от компрессора к охладителю до 0.5...1 м. Потребляемая мощность компрессора составляет 200...2000 Вт, а холодопроизводительность охладителя — от 2...5 до 40 Вт.

Проводятся работы по использованию подобных схем для получения криогенных температур с помощью пульсационных трубок.

При разработке было исследовано влияние резонансных характеристик охладителей на температуру и производительность охладителей в широком диапазоне реализуемых углов сдвига фаз охладителя и компрессорного поршня.

По автономным охладителям основные работы были связаны с отработкой сплит-охладителей, работающих по обратному циклу Стирлинга, с учетом возможности их использования в комплексе с термоаккумуляторами плавления. При этом рассматривалось два применения систем:

- использование термоаккумулятора для работы с объектами, имеющими изменяющуюся тепловую нагрузку, периодически превышающую холодопроизводительность активной холодильной машины;
- использование термоаккумулятора для накопления холода для периодической работы системы с выключенной активной машиной.

Последний режим обеспечивает экономию ресурса работы холодильной машины, позволяет вести работу аппаратуры с пониженными механическими и электромагнитными шумами от работы привода, а также обеспечивает непрерывность работы аппаратуры при переходе на резервную систему охлаждения.

Соответственно у нас проводятся работы по автономным охладителям производительностью 0.5...4 Вт с встроенными и вынесенными в поршень-вытеснитель регенераторами. Причем использование в схеме вынесенного регенератора обеспечивает тепловую развязку термоаккумулятора и холодильной машины на время выключения последней.

При разработке охладителей проведено исследование линейного магнитного привода компрессора, проверены варианты охладителя с пассивным (резонансным) и активным приводом поршня-вытеснителя охладителя, исследуются вопросы снижения массы и энергопотребления, а также уравнивания подвижных масс машины.

1. Броневец М. А., Габуля Г. Д., Еланский Ю. А. и др. Орбитальный трибометр и новые материалы для проведения КЭ «Материал—Трение» // *Космічна наука і технологія*.—2003.—9, № 5/6.—С. 40—46.
2. Ван Сяоянь, Похил Ю. А., Коваль К. В. и др., Расчет напряженно-деформированного состояния панели солнечной батареи космического аппарата при термическом нагружении // *Космічна наука і технологія*.—2005.—11, № 5/6.—С.
3. Введенский Ю. В., Гаврилов Р. В., Габуля Г. Д. и др. Выбор антифрикционных и износостойких материалов и покрытий для КЭ «Материал—Трение» // Третья укр. конф. по перспективным космическим исследованиям: Сб. тез. — Киев, 2003.—С. 55.
4. Гаврилов Р. В., Еременко В. В., Похил Ю. А. Исследование физических характеристик материалов космического назначения при воздействии факторов космического пространства // *Вакуумные технологии и оборудование (SVTE-5): Сб. тр. Междунар.конф.* — Харьков, 2002.—С. 85—95.
5. Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Романенко В. Г. и др. Пакет программ Trassa для расчета тепловых режимов космических аппаратов // *Космічна наука і технологія*.—2004.—10, № 4.—С. 3—16.
6. Гаврилов Р. В., Меленевский Ю. А., Конюхов С. Н. и др. Стенд для тепловакуумных испытаний космических аппаратов // *Космічна наука і технологія*.—2004.—10, № 5/6.—С. 42—46.
7. Гаврилов Р. В., Похил Ю. А. Исследования СКТБ ФТИНТ НАНУ в области низкотемпературного и криогенного материаловедения // *Современные проблемы холодильной техники: Сб. тр. Междунар. научно-технич. конф., 3-5 октября 2001 г.* —С. 6—10.
8. Гаврилов Р. В., Похил Ю. А., Яковенко Л. Ф. и др. Исследование влияния факторов космического пространства на долговечность материалов в условиях реального космического полета. Космический эксперимент «Пента-Усталость» // *Космічна наука і технологія*.—2003.—9, № 5/6.—С. 33—39.
9. Габуля Г. Д., Скороход В. В., Солнцев В. П. и др. Разработка научной аппаратуры и антифрикционных материалов нового поколения для проведения космического эксперимента «Материал—Трение» // *Космічна наука і технологія*.—2002.—8, № 5/6.—С. 28—34.
10. Bondarenko S. I., Gavrylov R. V., Eremenko V. V., et al. Physical Research of Microgravity Influence on Physical Phenomenon in Cryogenic Facility for Realization of this Research Aboard International Space Station // *Fizika Nizkikh Temperatur*.—2003.—29, N 6.—P. 628—632.

11. Gavrylov R. V., Pokhyl Yu. O. Influence of On-ground Simulated Space Factors on Physical Properties of Spacecraft Materials // *J. Spacecraft and Rockets*.—2005.—(в печати).
12. Gavrylov R. V., Pokhyl Yu. O., Agashkova N. N., et al. Investigation of the influence of cosmic-space factors on physical properties of space-application functional materials by methods of accelerated simulation // *Protection of Materials and Structures from Space Environment: 6th International Conf.*, Toronto, May, 2002. — Toronto, 2002.—P. 5.
13. Hart-Smith L. J. Adhesive Bond Stresses and Strains at discontinuities and Cracks in Bonded Structures // *Trans. ASME, Engineering Materials and Technology*.—1978.—100, January.—P. 15—24.
14. Volkersen O. Recherches sur la theorie des assemblages colles // *Constructions metalliques*.—1965.—N 4.—P. 12—18.

**GROUND-BASED AND ABOARD INVESTIGATIONS
OF MATERIALS, PROCESSES, AND DESIGNS
OF THE ROCKET-SPACE ENGINEERING. CREATION OF
ONGROUND GROUND-BASED SIMULATION EQUIPMENT**

R. V. Gavrylov

We consider some scientific, research, experimental and design efforts achievements recently gained by SRDB in the fields of the space factor influence on thermal radiation properties of the covers used for «radiation» cooling of space vehicles, of computer simulation and account of thermal conditions for a spacecraft, of creation of test-benches for simulation of space factor influence, of arrangement of space-borne experiments, and of developments of space-borne cooling systems.

УДК 533.2:533.27

В. А. Шувалов¹, В. Г. Тихий², А. И. Приймак¹,
И. А. Гусарова², Н. И. Письменный¹, Н. А. Токмак¹,
Н. П. Резниченко¹, С. В. Носиков¹, Г. С. Кочубей¹

¹Институт технічної механіки НАНУ і НКАУ, Дніпропетровськ

²Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

**Деградация полимерных материалов
обшивок солнечных батарей КА
при длительном воздействии потоков
атомарного кислорода**

Надійшла до редакції 04.03.05

Розроблено процедуру та технічне забезпечення фізико-хімічного моделювання, проведення приско- рених ресурсних випробувань деградації вагових, геометричних та термооптичних характеристик полімерних матеріалів КА під час тривалої дії надзвукових потоків атомарного кисню у іоносфері Землі. Отримано залежності характеристик поліімідних плівок та вуглепластику від інтегрального флюенсу атомарного кисню.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения длительного функционирования космических аппаратов (КА) на низких и средних орбитах тесно связана с проблемой обеспечения стойкости материалов и покрытий наружных поверхностей элементов конструкций к воздействию околоспутниковой среды. При орбитальной скорости $U_{\infty} \approx 8$ км/с поверхности элементов конструкций КА испытывают воздействие потока частиц ионосферной разреженной плазмы. Кинетическая энергия частиц в зависимости от массы составляет от 0.3 до 10 эВ. Преобладающим химическим компонентом ионосферы Земли, оказывающим определяющее влияние на деградацию основных классов конструкционных материалов КА на высотах от 200 до 700 км, является атомарный кислород. Механизм разрушения материалов наружных поверхностей КА связан как минимум с двумя видами воздействия: физическим распылением и химическим травлением потоком атомарного

кислорода. Следствием его воздействия на материалы панелей солнечных батарей КА являются:

- унос массы с поверхности материалов;
- изменение термооптических свойств поверхности материалов (коэффициента поглощения солнечного излучения α_s и интегральной излучательной способности ϵ);
- снижение электропроводности металлических контактов из-за окисления;
- изменение физико-механических свойств материалов в результате эрозии поверхности.

Информация об изменении свойств материалов наружных поверхностей КА из-за воздействия потока атомарного кислорода может быть получена практически только экспериментально — по результатам летных или стендовых испытаний. Относительная сложность и высокая стоимость натурных испытаний не позволяют считать их приемлемым средством для детального изучения влияния кислорода на материалы. Поэтому при построении моделей взаимодействия КА с околоспутниковой

средой предпочтение отдается модельным стендовым экспериментам. Такие исследования позволяют из широкого спектра процессов, протекающих на орбите, выделить основные, изучить их природу, провести параметрический анализ и сформулировать уточненные модели [16].

Целью данной работы является моделирование длительного воздействия потока атомарного кислорода ионосферы на материалы наружных поверхностей КА и оценка деградации весовых и термооптических характеристик полимерных материалов обшивок панелей солнечных батарей из-за длительного воздействия высокоскоростного потока частично ионизованного кислорода.

УСЛОВИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КА С АТОМАРНЫМ КИСЛОРОДОМ В ИОНОСФЕРЕ

Стендовое (физико-химическое) моделирование и имитация воздействия потока кислорода на наружные поверхности КА на орбите определяется условиями равенства скоростей и энергий при идентичности сорта частиц, бомбардирующих поверхность:

$$U_M \approx U_N, \tag{1}$$

или

$$\frac{M_O U_M^2}{2} = \frac{M_O U_N^2}{2}, \tag{2}$$

и интегральных флюенсов

$$F_O^{(M)} = F_O^{(N)}, \tag{3}$$

или потоков кислорода

$$\Phi_O^{(M)} t_M = \Phi_O^{(N)} t_N, \tag{4}$$

где индексы $\langle M \rangle$ и $\langle N \rangle$ соответствуют условиям стендового моделирования и условиям на орбите, $U_N \approx 8$ км/с, $M_O U_N^2 / 2 \approx 5$ эВ, M_O — масса атома кислорода, $\Phi_O^{(H)} = N_O^{(H)} \cdot U_N$ — плотность потока (флюенс) кислорода, $N_O^{(H)}$ — концентрация атомов кислорода; t_N — время контакта газа с поверхностью.

Значения годового флюенса $\Phi_O^{(H)}$ атомов кислорода, бомбардирующих поверхность КА, приведены на рис. 1 [4]. Кривая 1 соответствует номинальным (стандартным) условиям солнечной активности, 2 — максимуму солнечной активности, 3 — минимуму солнечной активности. Атомарный кислород в ионосфере Земли на высотах от 200 до 700 км ионизован. Кривые 4, 5 рис. 1 представляют зависимости степени ионизации кислорода $\zeta = N_O^+ / N_O$

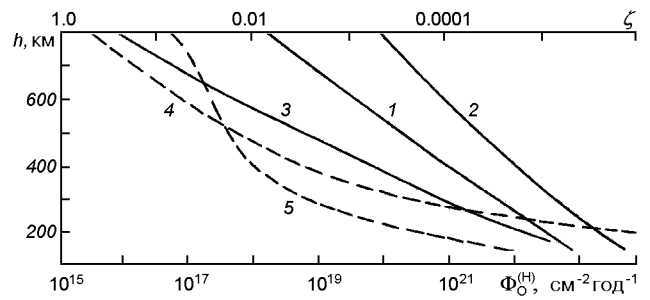


Рис. 1. Зависимость флюенса $\Phi_O^{(H)}$ (сплошные кривые) и степени ионизации ζ (штриховые) атомарного кислорода от высоты: 1 — номинальные, 2 — максимальные, 3 — минимальные условия солнечной активности; 4 и 5 — номинальные условия солнечной активности (ночь и день соответственно)

(4 — ночь, 5 — день) для номинальных условий солнечной активности. Степень ионизации кислорода на высотах от 200 до 700 км колеблется от 10^{-4} до 10^{-1} [4].

Физико-химическое воздействие кислорода на материалы и покрытия в ионосфере характеризуют взаимосвязанные процессы обмена энергией, массой и зарядом между частицами набегающего потока и поверхностью, включая химические реакции в адсорбированном и поверхностном слоях в условиях бесстолкновительного обтекания КА.

Положительные ионы кислорода с энергией от 5 до 10 эВ выполняют роль радиационно-химического активатора на поверхности материалов КА. Природа такого взаимодействия связана с нейтрализацией ионов, приводящей к возбуждению в полупроводниках и диэлектриках электронно-дырочных пар, достаточно долго сохраняющихся в поверхностном слое, толщиной не менее 10 атомных монослоев [1].

В условиях бесстолкновительного обтекания элементов конструкций КА потоком ионосферной разреженной плазмы с вероятностью, близкой к единице, непосредственно с поверхностью материалов КА взаимодействует нейтральный атом кислорода с энергией иона в момент нейтрализации [3, 9, 10, 14].

Близость процессов физико-химического взаимодействия в системах ион — твердое тело и нейтрал — твердое тело подтверждает близость значений коэффициентов аккомодации импульса и энергии и коэффициентов гетерогенной рекомбинации атомов и ионов кислорода и азота на бомбардируемых поверхностях [5, 14, 16].

Выполнение условий (1), (3) при бесстолкновительном обтекании поверхностей твердого тела сверхзвуковым потоком частично ионизованного кислорода обеспечивает моделирование и имита-

цию процессов физического (динамического) и химического взаимодействия материалов наружных поверхностей с кислородом в ионосфере Земли. Моделирование условий длительной эксплуатации КА на орбите предполагает проведение ускоренных ресурсных (стендовых) испытаний с применением более интенсивных, чем на орбите, потоков частиц. Из выражения (4) следует

$$\Phi_0^{(M)} = \Phi_0^{(H)} \frac{t_H}{t_M} = \Phi_0^{(H)} k_y. \quad (5)$$

Здесь $k_y = t_H/t_M > 1$ — отношение длительности эксплуатации КА на орбите к длительности стендовых испытаний в форсированном режиме в соответствии с термодинамическим критерием эквивалентности испытаний [13] (коэффициент ускорения) характеризует условия приведения материала в одно и то же состояние накопленных повреждений.

Энтропийный критерий эквивалентности режимов эксплуатации и испытаний предполагает наличие верхних (предельных) значений нагрузок (концентраций и флюенса кислорода) для ускоренного режима. Главное условие выбора верхних (предельных) значений нагрузок состоит в том, чтобы ускоренные испытания не приводили к изменениям в механизмах взаимодействия частиц с поверхностью, возникновению новых (отличных от условий эксплуатации) физико-химических процессов в материалах, изменению механизмов старения или накопления повреждений. Область допустимых нагрузок при форсированных модельных (стендовых) испытаниях может быть определена условием

$$\Phi_0^{(H)} \leq \Phi_0^{(M)} < \Phi_{0\max}^{(M)}.$$

Для взаимодействия потока кислорода с поверхностью КА это условие соответствует требованию, чтобы процессы на поверхности, инициированные одним соударением, не перекрывались во времени. Согласно оценкам работы [3] для концентрации и флюенса кислорода такому требованию соответствуют соотношения

$$N_{0\max}^{(M)} \approx 10^{12} \text{ см}^{-3} \text{ и } \Phi_{0\max}^{(M)} \approx 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}. \quad (6)$$

Таким образом, для реализации ускоренных модельных испытаний материалов наружных поверхностей КА с целью определения их эрозийной стойкости к воздействию атомарного кислорода в ионосфере необходимо обеспечить:

- наличие потока частично ионизованного кислорода с направленными скоростями частиц, близкими либо равными орбитальным скоростям в ионосфере;
- режим бесстолкновительного обтекания фраг-

- ментов элементов конструкций КА или образцов испытуемых материалов газовым потоком;
- выполнение для параметров кислорода в ионосфере и на стенде условий и соотношений (1), (3), (5) и (6).

Перечисленные условия реализованы на плазгодинамическом стенде Института технической механики НАНУ и НКАУ [14, 16].

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Стенд, средства измерения и контроля параметров потока. Стенд относится к классу плазменных газодинамических труб и позволяет создавать высокоскоростные потоки разреженной плазмы с широким диапазоном рабочих параметров. Схема стенда приведена на рис. 2. Безмасляная откачивающая система производительностью по воздуху около $50 \text{ м}^3/\text{с}$ (вакуумный электроразрядный агрегат и система турбомолекулярных насосов), наличие криопанелей, охлаждаемых жидким азотом (LN_2), дают возможность реализовать в вакуумной камере — цилиндре диаметром 1.2 м и длиной 3.5 м — статическое разряжение 10^{-5} Па, а в рабочих условиях при натекании газа давление ($10^{-4} \dots 10^{-3}$) Па.

В качестве источника сверхзвуковых потоков разреженного частично ионизованного газа используется газоразрядный ускоритель с ионизацией рабочего тела электронным ударом и осциллирующей электронов во внешнем магнитном поле. Стенки разрядной камеры и элементы катодного узла охлаждаются проточной водой. Разряд «горит» между ленточным катодом и цилиндрическим анодом в кварцевой трубке (внутренний диаметр 60 мм, длина 200 мм, толщина стенки 4.0 мм). В вакуум-

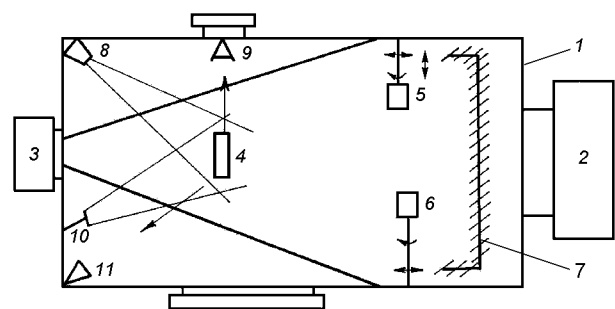


Рис. 2. Схема плазмодинамического стенда ИТМ: 1 — вакуумная камера; 2 — система откачки; 3 — генератор сверхзвуковых плазменных потоков; 4 — образец, модель космического аппарата; 5, 6 — системы диагностики; 7 — криопанели (LN_2); 8 — электронная пушка; 9, 11 — антенны систем сверхвысоких частот; 10 — источник ультрафиолетового излучения

ной камере плазменная струя до термостата с испытуемыми образцами распространяется в кварцевой трубке с внутренним диаметром 160 мм и длиной 260 мм. Ресурс ленточного катода из фольги тантала с ниобием толщиной 0.2 мм и рабочей частью 22×22 мм в кислороде $t_p \approx 60$ мин. Смена катода осуществляется без разгерметизации вакуумной камеры при давлении в рабочей части 10^{-5} Па. Разрядный ток $I_p \approx 7.5$ А. Через катод пропускается ток до 400 А. Применение ускорителя с «саморазгоном» плазмы позволяет получать в рабочей части вакуумной камеры стенда высокоскоростные потоки частично ионизованного атомарно-молекулярного кислорода. Стенд снабжен электронной пушкой с энергией частиц от 0.1 до 30 кэВ и плотностью потока высокоэнергичных электронов от 0.01 до 100 нА/см², источником электромагнитного излучения солнечного спектра в диапазоне длин волн от 115 до 400 нм [17].

Для измерения параметров плазменных потоков служит система электрических зондов и СВЧ-интерферометры, работающие в частотном диапазоне от 3 до 3.75 ГГц. Образцы испытуемых материалов, установленные на термостате, и диагностические средства размещены на подвижных платформах верхнего и нижнего координатников с четырьмя степенями свободы каждый, обеспечивающих продольное и поперечное перемещение в горизонтальной плоскости, перемещение в вертикальной плоскости и вращение вокруг вертикальной оси. Точность отсчета для линейных перемещений 0.5 мм, для угловых — 0.5°. При измерениях параметров заряженных частиц использовались электрические зонды: цилиндрические (из вольфрама радиусом $r_p \approx 2 \cdot 10^{-2}$ см, длиной $l_p \approx 2.0$ см и из молибдена $r_p \approx 4.5 \cdot 10^{-3}$ см, $l_p \approx 0.45$ см), а также сферический диаметром $2r_p \approx 0.40$ см и плоский зонд из молибдена с рабочей поверхностью диаметром $2r_p \approx 0.35$ см. Энергия направленного движения потока ионов контролировалась многоэлектродным зондом-анализатором радиусом $r_p \approx 1.75$ см. При измерениях параметров нейтрального компонента применялся зонд давления и соотношения работы [18]. Для всех зондов при рабочих давлениях в вакуумной камере стенда ниже 0.01 Па выполнялись условия бесстолкновительного обтекания. Осевое (а) и радиальное (б) распределения концентрации заряженных частиц в высокоскоростном потоке плазмы атомарно-молекулярного кислорода показаны на рис. 3. Точки 1 — измерения концентрации заряженных частиц $N_{O^+ + O_2^+}$ цилиндрическими зондами, 2 — сферическим, 3 — СВЧ-диагностика.

Соответствие зондовых (электронная ветвь

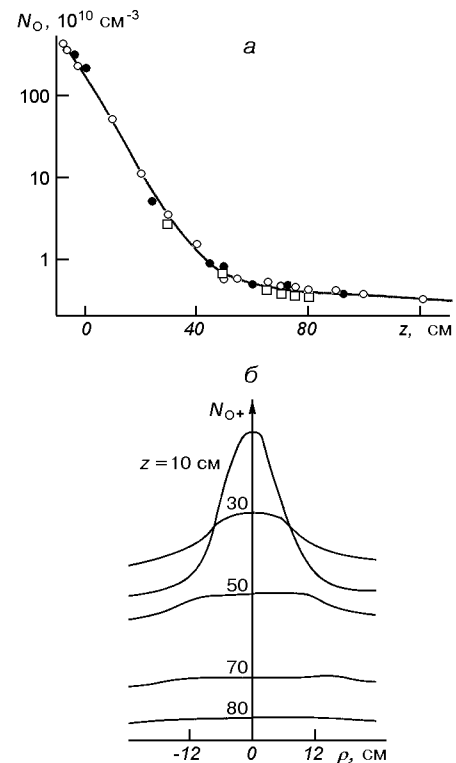


Рис. 3. Распределение концентрации ионов атомарно-молекулярного кислорода $O^+ + O_2^+$: а — осевое (кружки и точки — электрические зонды, квадратики — СВЧ-диагностика); б — радиальное (z — продольная координата от среза источника плазмы, ρ — радиальная координата от оси симметрии потока плазмы)

вольт-амперной характеристики) и СВЧ-измерений концентрации заряженных частиц позволяет с использованием условия квазинейтральности плазмы оценить:

- долю (наличие) отрицательных ионов в потоке плазмы атомарно-молекулярного кислорода, $(N_e + N_i^-)_{\text{зонд}} \approx N_{e\text{свч}}$, где N_e — концентрация электронов, N_i^- — концентрация отрицательных ионов;
- суммарную концентрацию положительных атомарных и молекулярных ионов: $N_e \approx N_{\Sigma}^+ = N_{ia}^+ + N_{im}^+$.

Такой подход вполне оправдан, так как методы СВЧ-диагностики основаны на рассеянии электромагнитного излучения на свободных электронах ионизованной среды [14, 19].

Степень диссоциации потока плазмы атомарно-молекулярного кислорода ξ_d контролируется масс-спектрометром MX 7303 и непосредственно у поверхности испытываемых образцов — электрическими зондами. Если степень диссоциации плазмы

атомарно-молекулярного кислорода представить в виде

$$\frac{N_{ia}}{N_{i\Sigma}} = \frac{N_{ia}}{N_{ia} + N_{im}} = \xi_d, \quad (7)$$

то ионный ток насыщения, ограниченный орбитальным движением частиц, на цилиндрический зонд, ориентированный перпендикулярно к вектору скорости набегающего потока, запишется в виде

$$I_{i\Sigma} = I_{ia} + I_{im} = \frac{A_p}{\pi} e N_{im} V_{im} \sqrt{1 + \frac{2e\varphi_w}{M_1 V_{im}^2}} + \frac{A_p}{\pi} e N_{ia} V_{ia} \sqrt{1 + \frac{2e\varphi_w}{m_1 V_{ia}^2}}, \quad (8)$$

где A_p — площадь зонда, M_1 , m_1 — масса молекулярного и атомарного иона соответственно, $\varphi_w = \varphi_p - \varphi_0$ — потенциал зонда φ_p относительно потенциала плазмы φ_0 .

Из (8) для цилиндрического зонда следует

$$I_{i\Sigma} = (1 + 0.4\xi_d) \frac{A_p}{\pi} e N_{i\Sigma} U_{im} \sqrt{1 + \frac{2e\varphi_w}{M_1 V_{im}^2}}, \quad (9)$$

откуда

$$\xi_d \approx 2.5 \left(\frac{I_{i\Sigma}}{I_{0i} \sqrt{1 + \frac{2e\varphi_w}{M_1 U_{im}^2}}} - 1 \right), \quad (10)$$

где $I_{0i} = \frac{A_p}{\pi} e N_{i\Sigma} U_{im}$ — ионный ток на зонд при $\varphi_w \approx 0$. Аналогичные выражения могут быть использованы для сферического и плоского зондов. В сечении $z \approx 30$ см с применением цилиндрических, сферического и плоских зондов получены значения степени диссоциации плазмы атомарно-молекулярного кислорода $0.58 \leq \xi_d \leq 0.65$. Измеренная электрическими зондами величина согласуется с измерениями ξ_d с помощью масс-спектрометра MX 7303 ($\xi_d \approx 0.61$). Разброс полученных значений не превосходит $\pm 7.5\%$.

На расстоянии $z \approx 30$ см от среза ускорителя есть область с линейным размером около 12 см. Здесь концентрация ионов атомарно-молекулярного кислорода распределена равномерно, степень диссоциации равна $\xi_d \approx 0.6$, степень ионизации $\zeta = N_{O^+ + O_2^+} / N_{O + O_2} \geq 0.01$, направленная скорость ионов кислорода $U_{O^+} \approx (8.3 \pm 0.5)$ км/с, концентрация ионов атомарного кислорода $N_{O^+} \approx (2.0 \pm 0.3) \cdot 10^{10}$ см⁻³ и отношение скоростей $S_{O^+} = U_{O^+} / V_{O^+} \approx 3.7$ (V_{O^+} — тепловая скорость ионов кислорода), флюенс ионов атомарного кислорода $\Phi_{O^+} \approx 1.7 \cdot 10^{16}$ см⁻²с⁻¹. Годо-

вой интегральный флюенс $F_{O^+} \approx 3 \cdot 10^{20}$ см⁻² достигается, например, при $t_M \approx 1.8 \cdot 10^4$ с, т. е. коэффициент ускорения испытаний составляет $k_y \approx 1800$. В сечении струи плазмы атомарно-молекулярного кислорода $z \approx 30$ см при давлениях $P \leq 0.01$ Па для фрагмента образцов испытываемых материалов с характерным размером $R \leq 12$ см реализуется режим сверхзвукового бесстолкновительного обтекания.

Материалы, средства измерения потери массы и термооптических характеристик. Материалами для обшивок отечественных панелей солнечных батарей (СБ) служат: полиимидная пленка ПМ-А (желтая) толщиной $\delta \approx 0.040$ мм и углепластик ЭЛУР 008+ЭДТ-10 (черный блестящий) толщиной $\delta \approx 1.07$ мм. Для полиимида использовались образцы трех видов: 1) концы пленки завернуты за фольгу из нержавеющей стали размером 50×50 мм и толщиной $\delta \approx 0.2$ мм; 2) пленка на двух боковых сторонах закреплена тонкой вольфрамовой нитью диаметром 0.02 мм; 3) по периметру полиимидная пленка прижата к фольге металлической рамкой шириной около 2 мм. Такое крепление пленки позволяет исключить влияние краевых эффектов. Измерение и контроль температуры полиимидной пленки осуществлялось двумя миниатюрными термомпарами (хромель-копель) диаметром 0.1 мм, размещенными между пленкой и фольгой. В образец углепластика размером 50×50 мм термомпары вмонтированы с внутренней стороны (между углепластиком и фольгой). Геометрические размеры образцов контролируются инструментальным микроскопом с 80-кратным увеличением.

Образцы испытываемых материалов (четыре одновременно) крепятся на фронтальной (относительно набегающего потока) поверхности двухсекционного термостата, охлаждаемого проточной водой (как в нашем случае) или жидким азотом. Термостат размером 115×115 мм размещен на подвижной платформе нижнего координатника. Термостат с образцами испытываемых материалов в потоке плазмы атомарно-молекулярного кислорода показан на рис. 4.

Контроль флюенса атомарного кислорода осуществляется посредством мониторинга ионного тока насыщения при фиксированном потенциале на плоский зонд, закрепленный в одной плоскости с образцами испытываемых материалов на фронтальной поверхности термостата.

Измерение весовых и термооптических характеристик образцов производилось вне вакуумной камеры до и после экспонирования в потоке кислорода. Измерение массы образцов испытываемых матери-



Рис. 4. Термостат с образцами испытуемых материалов в потоке плазмы атомарно-молекулярного кислорода

алов определялось взвешиванием на микровесах с точностью не хуже 0.1 мг.

Термооптические характеристики образцов в видимой части спектра (от 400 до 750 нм) определялись: α_s с помощью спектрофотометра СФ-18 при источнике света с цветовой температурой 2856 К; ϵ с применением совокупности традиционных методов с использованием государственного эталона единицы света [8, 11], а также терморадометра ТРМ-И с погрешностью не более $\pm 1\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования кинетики процесса взаимодействия плазмы атомарно-молекулярного кислорода с полиимидной пленкой [6, 7] свидетельствуют о том, что молекулярный кислород инертен. Все химические реакции лимитирует одна стадия — реакция с участием окислителя (атомарный кислород). При этом соотношение скоростей газовой выделенной продукции химического травления (CO_2 , CO , H_2O и H_2) остается постоянным и не зависит от температуры пленки в диапазоне от 290 до 400 К и параметров разряда. Последнее также служит подтверждением, что вид частиц, химически воздействующих на пленку, не изменяется. Это обстоятельство, а также высокая вероятность нейтрализации положительных ионов кислорода при соударении с поверхностью полимерных, диэлектрических и полупроводниковых материалов позволяет при количественных оценках потери массы испытуемых образцов объединить в один ряд результаты исследований, выполненных в нейтральных потоках кислорода и плазмы атомарно-молекулярного кислорода.

Потери массы материалов. Пленка *kapton-H*. За рубежом на КА широко используется полиимид-

ная пленка *kapton-H*, характеристики которой близки к параметрам отечественных полимеров. На рис. 5, а приведена зависимость потери массы пленки *kapton-H* от интегрального флюенса кислорода по данным: крестики — измерения в СВЧ-плазме кислорода на стенде Lockheed Missiles and Space Company [25] (энергия частиц 2.2 эВ; $\Phi_0 \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, толщина пленки $\delta \approx 0.025 \text{ мм}$); квадратик — спутниковые измерения на STS-41 (Space Shuttle Discovery) [21]; треугольники — стендовые измерения в пучке кислорода с энергией частиц 4.6 эВ и $\Phi_0 \approx 1.86 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ из [23]; кружок — измерения в плазме положительного столба разряда постоянного тока в O_2 [6, 7]; звездочки — измерения на орбитальной станции «Мир» (время экспозиции 28 и 42 мес, толщина пленки $\delta \approx 0.026 \text{ мм}$) [20]; прямая линия — зависимость $\Delta t = Y_0 F_0^{\beta_m}$. Здесь $Y_0 \approx 4.4 \cdot 10^{-24} \text{ г/атомО}$ — коэффициент эрозии; коэффициент $\beta_m \approx 1.0$.

Изменение толщины полиимидной пленки *kapton-H* Δx в зависимости от интегрального флюенса атомарного кислорода F_0 иллюстрирует рис. 5, б: точка, кружок, квадратик, ромб — спутниковые измерения на STS-4, 5, 8 [1] и STS-416 [24]; треугольники, звездочки — расчетные значения Δx из [2] и [22]; вертикальный отрезок — программа ATOMOX ESA; крестики — эксперимент LDEF (Long Duration Exposure Facility, время экспозиции 10 и 70 мес); косые крестики — измерения на ОС «Мир» (28 и 42 мес); прямая линия — зависимость $\Delta x = R_e \cdot F_0^{\beta_x}$, где для пленки *kapton-H* $\beta_x \approx 1.0$, $R_e \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомО}$ — объемный коэффициент потери материала.

Пленка ПМ-А. Зависимость изменения толщины полиимидной пленки ($\delta \approx 0.040 \text{ мм}$) от интегрального флюенса кислорода, полученная нами, показана на рис. 6, а. Крестики соответствуют измерениям при облучении фронтальной поверхности пленки набегающим потоком со скоростью $U_{O^+} \approx (8.3 \pm 0.5) \text{ км/с}$. Точки характеризуют условия облучения пленки диффузно рассеянными частицами, проникающими на поверхность пленки, экранированную металлической рамкой, с тепловыми скоростями $V_{O^+} \approx 2.24 \text{ км/с}$; кружки — измерения на ОС «Мир» (пленка ПМ-1Е, $\delta \approx 0.040 \text{ мм}$, время экспозиции 28 и 42 мес) [20]; прямая линия — зависимость $\Delta x = R_e \cdot F_0^{\beta_x}$. Для полиимидной пленки ПМ-А — $\beta_x \approx 1.0$; $R_e \approx 2.6 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомО}$. Представленная зависимость свидетельствует о преобладающем влиянии механизма химического травления пленки кислорода. Потери массы полиимидной пленки ПМ-А из-за воздействия потока

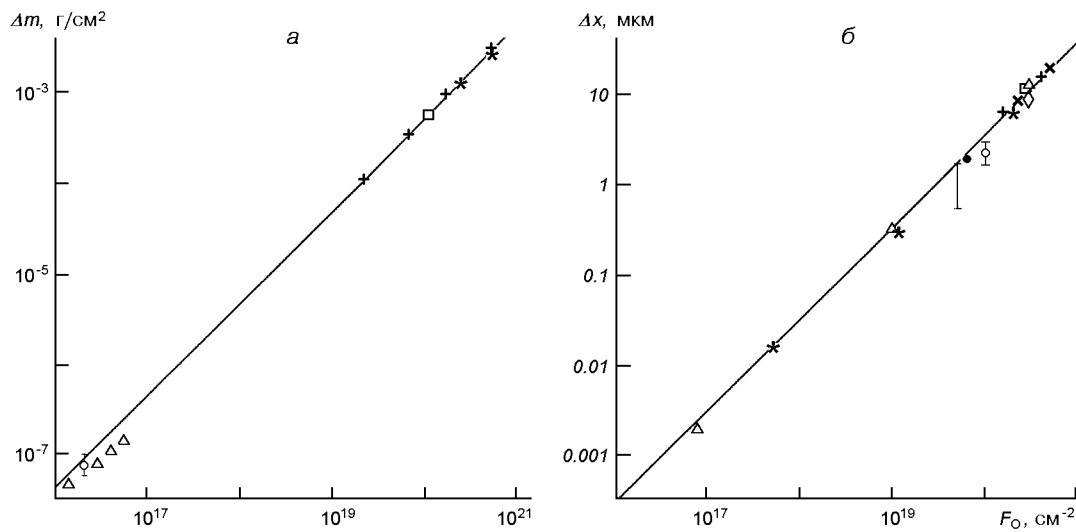


Рис. 5. Изменение массы (а) и толщины (б) полиимидной пленки картон-Н (детали см. в тексте)

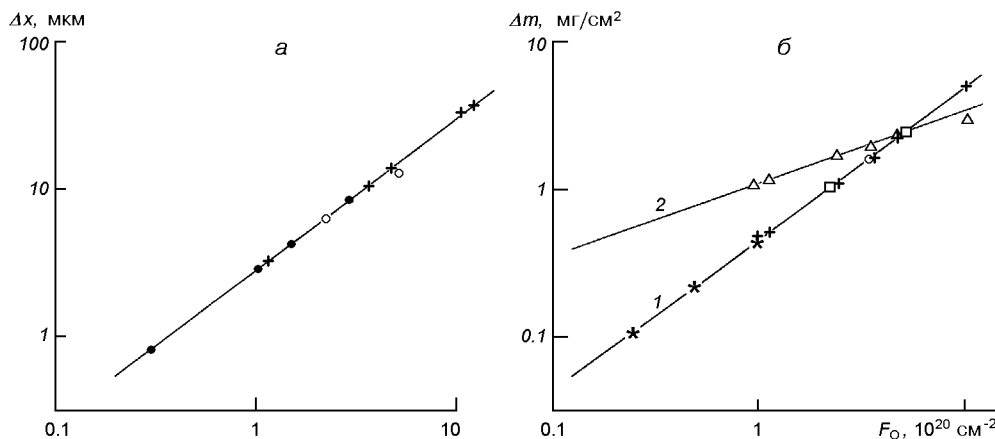


Рис. 6. а — изменение толщины полиимидной пленки ПМ-А; б — потеря массы полиимидной пленки (1) и углепластика (2) (детали см. в тексте)

атомарного кислорода иллюстрирует рис. 6, б. Крестики — наши измерения; кружок — ОС «Мир» (пленка толщиной $\delta \approx 0.080$ мм, время экспозиции 1036 сут) [15]; квадратики — ОС «Мир» (пленка ПМ-1Е $t_H \approx 28$ и 42 мес); звездочки — данные из работы [12]; прямая линия — зависимость $\Delta m = Y_O F_O^{\beta_m}$. Для полиимидной пленки ПМ-А $\beta_m \approx 1.0$; $Y_O \approx 4.2 \cdot 10^{-24}$ г/атомО. Сравнение показывает, что изменения Δx и Δm для ПМ-А (ПМ-1Е) ниже, чем для пленки картон-Н, т. е. эрозионная стойкость пленки ПМ-А к воздействию атомарного кислорода несколько выше, чем пленки картон-Н.

Углепластик ЭЛУР. Изменение (потери) массы углепластика ЭЛУР 0.08+ЭДТ-10, измеренные нами, представлены на рис. 6, б. Наши экспери-

ментальные данные (треугольники) аппроксимирует зависимость $\Delta m = Y_O F_O^{\beta_y}$ (кривая 2). Для углепластика ЭЛУР $Y_O \approx 4.45 \cdot 10^{-23}$ г/атомО; $\beta_y \approx (1.45-1.045) \cdot 10^{-21} \eta F_O$, $\eta = 1.0$ см².

Термооптические характеристики материалов. Коэффициент поглощения солнечного излучения α_s . Оптические характеристики полимерных пленок картон-Н, ПМ-1Е и ПМ-А близки. Это подтверждают начальные значения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения α_{0s} этих материалов, неэкспонированных в кислороде: $\alpha_{0s} \approx 0.2$ для пленки картон-Н ($\delta \approx 0.025$ мм) по данным [25]; $\alpha_{0s} \approx 0.221$ для пленки ПМ-1Е ($\delta \approx 0.04$ мм) в спектральном диапазоне $\lambda_v =$

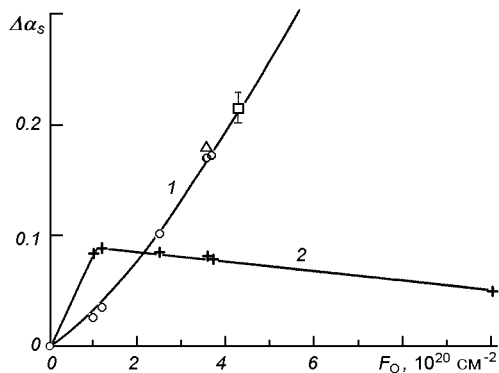


Рис. 7. Изменение коэффициента поглощения солнечного излучения для пленки ПМ-А (1) и углепластика ЭЛУР (2) (детали см. в тексте)

= 550...900 нм [20]; $\alpha_{0s} \approx 0.219$ для пленки ПМ-А ($\delta \approx 0.04$ мм, наши измерения в диапазоне $\lambda_v = 400...750$ нм). Под воздействием кислорода происходит химическое травление, химическая модификация, проявляющаяся в поверхностной эрозии, увеличении шероховатости поверхности полимерной пленки. Химическая модификация сопровождается уменьшением пропускательной способности пленки в видимой части спектра, пропорционально интегральному флюенсу кислорода. По данным [20] при $F_0 \approx 4.52 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ относительная пропускательная способность полиимидной пленки ПМ-1Е приближается к нулю: прозрачность уменьшается. С макроскопической точки зрения пленки, экспонированные в кислороде, являются непрозрачными по сравнению с неэкспонированными. Интегральный коэффициент поглощения видимого солнечного излучения увеличивается. Это подтверждают и данные рис. 7. Кружки — результаты наших стендовых испытаний для пленки ПМ-А ($\delta \approx 0.04$ мм); треугольник — измерения на ОС «Мир» (1036 сут, пленка ПМ-А, $\delta \approx 0.08$ мм) [15]; квадрат — данные спутниковых измерений [20] для полиимидной пленки ПМ-1Е ($\delta \approx 0.040$ мм) с указанием максимальных и минимальных значений α_s . Кривая — наша аппроксимация $\Delta\alpha_s \approx 1 \cdot 10^{-27.5} F_0^{1.3}$. Крестиками на рис. 7 представлены наши измерения для углепластика ЭЛУР $\alpha_{0s} \approx 0.879$. При воздействии потока атомарного кислорода наблюдается потеря блеска углепластика, экспонированная поверхность покрывается эмиттируемым углеродом (сажей), что приводит к увеличению интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения α_s . Далее с увеличением интегрального флюенса кислорода F_0 происходит оголение волокон наполнителя из-за разрушения и уноса материала поли-

Излучательная способность в ИК-диапазоне для полимерных материалов обшивок СБ

| Материал | $F_0, 10^{20} \text{ см}^{-2}$ | Коэффициент излучения ϵ | |
|--|--------------------------------|----------------------------------|------------------|
| | | до экспозиции | после экспозиции |
| Полиимидная пленка ПМ-А ($\delta \approx 0.040$ мм) | 1.16 | 0.550 | 0.550 |
| | 3.67 | 0.550 | 0.560 |
| | 4.9 | 0.550 | 0.560 |
| Углепластик ЭЛУР | 12.7 | 0.550 | * |
| | 1.16 | 0.900 | 0.900 |
| | 10.7 | 0.900 | 0.915 |

Примечание. * — образец разрушился, время разрушения эквивалентно $t_H \approx 3.8$ лет на орбите 700 км в условиях максимума солнечной активности

мерной матрицы и, как следствие, «посерение» облучаемой поверхности, приводящее к уменьшению α_s .

Коэффициент излучения ϵ . Результатом воздействия атомарного кислорода на поверхность экспонированных образцов является увеличение диффузной составляющей излучения (степени шероховатости пленки). Следствием таких изменений является слабое, но устойчиво регистрируемое увеличение интегральной излучательной способности материалов в ИК-диапазоне ϵ . Начальное значение ϵ_0 , измеренное для полиимидной пленки ПМ-А в нашей работе, хорошо согласуется со значением $\epsilon_0 \approx 0.52$ для пленки kapton-H из [25]. Измеренные значения ϵ при различных флюенсах кислорода представлены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана процедура и техническое обеспечение физико-химического моделирования, проведены ускоренные ресурсные испытания деградации весовых, геометрических и термооптических характеристик полимерных материалов обшивок панелей СБ при длительном воздействии сверхзвуковых потоков атомарного кислорода на орбите. Полученные зависимости характеристик деградации свойств материалов от интегрального флюенса кислорода соответствуют результатам натурных спутниковых измерений на низко- и среднеорбитальных КА в ионосфере.

Изменение термооптических характеристик полиимидной пленки происходит вследствие химической модификации облучаемой поверхности и сопровождается уменьшением пропускательной способности пленки в видимой части спектра. Поверхно-

стная деградация углепластика проявляется в оголении волокон наполнителя из-за разрушения и уноса материала полимерной матрицы, сопровождается увеличением диффузной составляющей излучения.

Зависимости $\Delta m(F_0)$ и $\Delta x(F_0)$ для полиимидной пленки ПМ-А могут быть использованы как эталонные для оценки и контроля значений интегрального флюенса кислорода при проведении ускоренных ресурсных испытаний.

1. Акишин А. И., Гужова С. К. Взаимодействие ионосферной плазмы с материалами и оборудованием космических аппаратов // Физика и химия обработки материалов.—1993.—№ 3.—С. 40—47.
2. Акишин А. И., Теплов И. Б. Имитация воздействия космических излучений на материалы // Физика и химия обработки материалов.—1992.—№ 3.—С. 47—57.
3. Войцеха В. С., Гужова С. К., Титов В. И. Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. — М.: Энергоатомиздат, 1991.—224 с.
4. Гуревич А. В., Шварцбург А. В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973.—272 с.
5. Колесников А. Ф., Якушкин М. И. Об определении эффективных вероятностей гетерогенной рекомбинации атомов азота и кислорода по тепловым потокам к поверхности // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. — М.: Наука, 1989.—С. 34—45.
6. Кувалдина Е. В., Любимов В. К., Максимов А. И. и др. Исследование температурных зависимостей скоростей травления полиимидной пленки в плазме // Химия высоких энергий.—1990.—24, № 5.—С. 471—474.
7. Кувалдина Е. В., Любимов В. К., Рыбкин В. В. Константа скорости и вероятность взаимодействия атомарного кислорода с полиимидной пленкой // Химия высоких энергий.—1992.—26, № 5.—С. 475—478.
8. Латышев Л. Н., Петров В. А., Чеховский В. Я., Шестаков Е. Н. Излучательные свойства твердых тел. — М.: Энергия, 1974.—472 с.
9. Мак-Даниэль И. Процессы столкновений в ионизованных газах. — М.: Мир, 1967.—832 с.
10. Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела. — М.: Мир, 1981.—488с.
11. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах. Справочник. — М.: Машиностроение, 1980.—224 с.
12. Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия / Под. ред. К. С. Касаева. — М.: ЗАО НИИ «ЭНЦИТЕХ», 2000.—Т. 17В.—279 с.
13. Переверзев Е. С. Модели накопления повреждений в задачах долговечности. — Киев: Наук. думка, 1995.—360 с.
14. Резниченко Н. П., Шувалов В. А. Передача энергии атомарных ионов сверхзвукового потока частично диссоциированного газа поверхности твердого тела // Журн. прикладной механики и технической физики.—1989.—№ 6.—С. 11—19.

15. Черник В. Н., Наумов С. Ф., Демидов С.А и др. Исследования полиимидных пленок с защитными покрытиями для космических аппаратов // Перспективные материалы.—2000.—№ 6.—С. 14—20.
16. Шувалов В. А. Моделирование взаимодействия тел с ионосферой. — Киев: Наук. думка, 1995.—180 с.
17. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И. и др. Моделирование радиационной электризации подветренных поверхностей космических аппаратов на полярной орбите в ионосфере Земли // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С. 30—43.
18. Шувалов В. А., Приймак А. И., Резниченко Н. П. и др. Контактная диагностика ионосферной и лабораторной плазмы // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 2/3.—С. 3—15.
19. Шувалов В. А., Чурилов А. Е., Турчин В. В. Диагностика струи разреженной плазмы с применением зондового и СВЧ-методов // Теплофизика высоких температур.—1978.—16, № 1.—С.9—16.
20. Allegri G., Corradi S., Marchetti M., et al. On the degradation of polymeric thin films in LEO space environment // Proc. 9th Intern. Symp. on Materials in a Space environment. — Noordwijk, ESTEC, 2003.—P. 255—264.
21. Koontz S., King G., Dunnet A., et al. Intelsat solar array coupon atomic oxygen flight experiment // J. Spacecraft and Rockets.—1994.—31, N 3.—P. 475—481.
22. Paillous A. Spacecraft surface exposure to atomic oxygen in LEO // Technol. Environment spatial.—1987.—Toulouse.—P. 353—375.
23. Yokota K., Seikyn S., Tagava M., et al. A quantitative study in synergistic effects of atomic oxygen and ultraviolet regarding polymer erosion in LEO space environment // Proc. 9th Intern. Symp. on Materials in a Space environment. — Noordwijk, ESTEC, 2003.—P. 265—272.
24. Zimcik D. G., Maag C. R. Results of apparent atomic oxygen reactions with spacecraft materials during Shuttle flight STS-41G // J. Spacecraft and Rockets.—1988.—25, N 2.—P. 162—168.
25. Zimcik D. G., Wertheimer M. R., Balmain K. B., et al. Plasma-deposited protective coating for spacecraft applications // J. Spacecraft and Rockets.—1991.—28, N 6.—P. 652—657.

DEGRADATION OF POLYMERIC MATERIALS FOR COVERING SPACECRAFT SOLAR ARRAYS UNDER EXPOSURE TO ATOMIC OXYGEN FLOWS

V. A. Shuvalov, V. G. Tihy, A. I. Priymak,
I. A. Gusarova, N. I. Pismenny, N. A. Tokmak,
N. P. Reznichenko, S. V. Nosikov, G. S. Kochubey

We developed a procedure and hard ware for physical and chemical modelling and conducting shortcut operational-life proof of degradation in weight, geometric and thermo-optical characteristics of polymers for spacecraft under prolonged exposure to supersonic fluxes of atomic oxygen in the Earth's ionosphere. Dependences of variation in the characteristics of polyimide films and carbon plastic materials on the integral fluence of atomic oxygen are derived.

УДК 536.42:621.891

В. Г. Боровик

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. Н. Францевича НАН України, Київ

Модульный узел трения «диск — индентор» для триботехнических исследований в космическом пространстве

Надійшла до редакції 25.03.05

Розглянуто та проаналізовано конструкції вузлів тертя типу «диск-індентор» трибометрів, призначених для проведення експериментів в умовах впливу факторів космічного простору. Для дослідження триботехнічних характеристик матеріалів в космічних умовах запропоновано конструкцію вузла тертя «диск-індентор», яка враховує досвід в цій галузі. Описана конструкція модульного вузла тертя перспективного орбітального трибометра та наведені його технічні характеристики.

Задача повышения надежности узлов трения космических аппаратов требует совершенствования экспериментального оборудования для изучения особенностей воздействия факторов космического пространства (ФКП) на триботехнические характеристики материалов. Совершенствование трибометров идет по пути расширения их функциональных возможностей, повышения точности измерений и информативности экспериментов, а также улучшения их массогабаритных характеристик и энергопотребления. Современные подходы к изучению влияния ФКП на трение и механизмы изнашивания материалов требуют оснащения орбитального трибометра системами измерения триботехнических характеристик испытываемых пар трения, в первую очередь — линейного износа. Полезным свойством перспективных трибометров может стать возможность неоднократного их использования. При этом образцы пар трения, доставляемые на борт МКС и возвращаемые на Землю после испытаний должны иметь минимальные массу, габариты и допускать простую их установку в трибометр. Очевидно, что в случае неоднократного использования трибометр не должен требовать юстировки на борту МКС: необходимая точность установки образцов должна обеспечиваться конструктивно.

Необходимо отметить, что ФКП можно разделить на две группы. Первая — это факторы,

имеющие скалярную природу: невесомость, вакуум и т.п. Вторая — это факторы, имеющие векторную природу: излучения, корпускулярные и микрометеоритные потоки и т.п. При анализе конструкций орбитальных трибометров необходимо представлять, влиянию каких ФКП на трение и износ подвержена конкретная пара трения в данном трибометре. Очевидно, что влияние векторных ФКП может проявляться только в незатененных парах трения с частичным перекрытием.

В настоящее время известно несколько трибометров, предназначенных для работы в открытом космическом пространстве.

Одним из первых космических трибометров можно считать имитатор трения, который был создан в НПО им. С. А. Лавочкина и размещен на КА «Луна-22» [8]. Имитатор имел сдвоенный привод и испытательный блок, включающий три узла трения типа «диск — индентор» и три узла типа «вал — втулка». Передача вращения с вала привода на шесть валов узлов трения осуществлялась с помощью специального редуктора. Все шесть узлов находились в постоянном зацеплении с валом привода. Каждый узел «диск—индентор» имел диск диаметром около 30 мм, к обеим плоскостям которого на диаметре около 20 мм прижаты два соосных индентора. Каждый индентор закреплен на свободном конце консольной балки, имеющей минималь-

ную жесткость в направлении касательном к окружности диска, а другой конец балки закреплен на оси, перпендикулярной к радиусу диска и его плоскости. Балки соединены одна с другой при помощи податливой винтовой пружины, которая задает нормальную силу (усилие прижатия инденторов к диску). На балки наклеены тензорезисторы, которые использовались для измерения силы трения инденторов о диск.

Данный имитатор не был оснащен системой для измерения температуры в области контакта пар трения и их линейного износа.

Использовать рассмотренный имитатор трения в качестве основы для проектирования перспективного орбитального трибометра не представляется возможным по следующим причинам:

1. Все испытываемые пары трения в имитаторе работают одновременно, что в случае больших нормальных нагрузок и скоростей скольжения требует использования достаточно мощного привода.

2. Прекращение испытаний одной из пар трения неизбежно ведет к прекращению испытаний остальных пяти пар трения, т. е. такая кинематическая схема трибометра накладывает существенные ограничения на программу испытаний.

3. Ось индентора отклоняется в процессе испытаний по мере износа индентора и образца-диска.

4. Кинематическая схема крепления индентора приводит к изменению радиуса дорожки трения при изменении силы трения.

5. Установка инденторов и дисков, а также юстировка трибометра/имитатора является достаточно сложной задачей даже в земных условиях.

6. Диски имитатора в значительной степени закрыты другими деталями от воздействия на них излучений, а также корпускулярных и микрометеоритных потоков, что не позволяет изучить влияние последних на трение и износ.

Интересная конструкция трибометра TRIBOLAB предложена для размещения на борту европейского сегмента МКС [7]. Этот трибометр состоит из двух блоков. Первый блок предназначен для испытания шести узлов «диск — индентор», а второй — шести шарикоподшипниковых узлов. В узле «диск — индентор» каждый диск взаимодействует только с одним индентором. Особенностью конструкции данного трибометра является то, что образцы-диски (шарикоподшипники) в каждом блоке расположены на общем валу. При этом к каждому блоку подключено по два привода, один из которых (основной) приводит во вращение вал с дисками (подшипниками), а второй (переключающий привод) предназначен для поочередного введения в контакт соответствующих диска и индентора (нагружения соответ-

ствующего шарикоподшипника). Таким образом, в процессе испытаний узлы трения в каждом блоке испытываются поочередно. Такая конструкция трибометра позволяет существенно снизить мощность, габариты и массу основного привода и трибометра в целом. Отметим, что переключающий привод не требует большой мощности, поэтому его габариты и масса невелики.

Однако конструкция узла «диск — индентор», примененная в данном трибометре не содержит датчиков линейного износа. Кроме того, узлу трения данного трибометра свойственны недостатки, рассмотренные ранее в п. 3 и 4 для имитатора трения [8].

В конструкции трибометра [7] доставляться на борт МКС и возвращаться на Землю могут блоки с узлами трения (без приводов).

Известен модульный трибометр [3], который был разработан Г. Д. Гамулей для изучения адекватности характеристик трения и износа, получаемых в наземных лабораториях и в условиях открытого космоса. Однако данному трибометру присущи недостатки, рассмотренные ранее в п. 3 при анализе имитатора трения. Кроме того, его конструкция не обеспечивает измерение суммарного линейного износа инденторов, поэтому она, по-видимому, не может стать основой для проектирования перспективного орбитального трибометра.

Развитием имитатора трения можно считать трибометр, разработанный группой организаций во главе с НПО им. С. А. Лавочкина [2], схема которого демонстрировалась на конференции [1]. В отличие от имитатора, в этом трибометре три пары инденторов испытывают на одном диске диаметром 85 мм, т.е. одновременно испытываются шесть инденторов на одном диске. С каждой стороны диска расположены по три индентора на трех дорожках трения с различными радиусами. При этом скорости скольжения инденторов на внешней и внутренней дорожках трения отличаются примерно в два раза. Инденторы, расположенные по обе стороны диска, попарно соосны. Каждый индентор закреплен на собственном упругом элементе, имеющем две степени свободы: по нормали к плоскости диска и в направлении силы трения. Упругие элементы выполнены в виде двух параллелограммов на упругих шарнирах. Один параллелограмм имеет большую податливость в направлении нормальной нагрузки и малую податливость в направлении силы трения, а другой параллелограмм имеет малую податливость в направлении нормальной нагрузки и большую податливость в направлении силы трения. В области наибольших деформаций упругих шарниров нанесены тензорезисторные

датчики (фольговые или на основе монооксида самария), которые используются для определения нормальной нагрузки и силы трения. По изменению нормальной силы в процессе испытания определяется текущий суммарный износ каждой пары соосных инденторов и диска по методике, предложенной в работе [3].

Данный трибометр унаследовал от имитатора некоторые недостатки, рассмотренные ранее в п. 1, 2, 4 и 5. Кроме того, у него появилась характерная особенность — испытание шести инденторов на одном диске на разных дорожках трения. Это негативно отражается на корректности получаемых триботехнических характеристик по следующим причинам:

а) испытание трех инденторов на разных дорожках трения на каждой стороне одного диска приведет к переносу продуктов износа с внутренних дорожек трения (с меньшей скоростью скольжения) на внешние дорожки (с большей скоростью скольжения);

б) вибрации, возникающие при трении диска и индентора, зависят от скорости их взаимного скольжения, а также от других условий (среды, температуры, резонансных характеристик нагружающей, измерительной и испытательной систем и т. д.). Характеристики трения и износа существенно изменяются при наложении внешних вибраций на пару трения [4]. Поэтому в процессе испытаний на каждую пару соосных инденторов будут накладываться вибрации, создаваемые двумя другими соосными парами инденторов, работающими в других скоростных режимах.

Эти причины могут привести к тому, что интерпретация получаемых результатов, их сопоставление и создание (пополнение) баз данных триботехнических характеристик пар трения для ракетно-космической техники будут крайне затруднены или вообще невозможны.

Кроме того, применение в рассматриваемом трибометре консольной схемы крепления параллелограммов на упругих шарнирах, которые используются для создания нормальной силы и измерения силы трения, не обеспечивает максимальной жесткости на кручение, которая необходима для сохранения перпендикулярности оси индентора к плоскости диска в процессе износа индентора и диска.

С учетом результатов приведенного выше анализа была разработана конструкция модульного узла трения, которая показана на рис. 1. В ней в значительной степени устранены недостатки, свойственные рассмотренным трибометрам.

Главным элементом данного узла является деталь 1, условно названная рамкой. Она выполнена

из алюминиевого сплава Д16Т1 и содержит в себе несколько параллелограммов на упругих шарнирах, соединенных последовательно и/или параллельно, обоймы с посадочными отверстиями для двух подшипников 2, в которых установлен вал 3 с диском 4. Параллелограммы на упругих шарнирах и посадочные отверстия подшипников симметричны относительно средней плоскости диска. С каждой стороны диска в гладких цилиндрических отверстиях бобышек А, связывающих два параллелограмма, установлены инденторы 5. Эти параллелограммы предназначены для создания усилия прижатия индентора к диску (нормальной нагрузки). Тензорезисторы 6, наклеенные на упругих шарнирах этих параллелограммов и соединенные по мостовой схеме, используются для измерения нормальной силы и, по ее изменению в процессе испытаний, — линейного износа инденторов и диска [3]. Общая жесткость параллелограммов в направлении нормальной силы равна 1500 Н/м, что обеспечивает получение нормальной силы 30 Н при осевом перемещении индентора 0,2 мм и изменении этой силы не более чем на 25 % при линейном износе пары трения 50 мкм.

Максимальные напряжения в упругих шарнирах при нормальной силе 30 Н не превышают 120 МПа. Необходимо отметить, что упругие шарниры в предлагаемой конструкции работают при знакопостоянном нагружении с наложением небольших вибраций. Материал упругих шарниров в процессе работы подвергаются усталости при коэффициенте асимметрии цикла, близком к единице ($R \approx 1$) (ползучести/релаксации с наложением небольших вибраций). В справочной литературе (см. [5]) обычно приводят значения предела выносливости при симметричном циклическом нагружении ($R = -1$), которое, как известно, значительно более опасно, чем знакопостоянное циклическое нагружение ($0 \leq R \leq 1$). Таким образом, максимальные рабочие напряжения в упругих шарнирах данного узла, не превышают его предела выносливости при нормальной температуре и предела ползучести при повышенной температуре алюминиевого сплава Д16Т1 ($\sigma_{-1} = 130$ МПа, $\sigma_{0.2/30000ч}^{150^\circ\text{C}} = 140$ МПа [5]). Для обеспечения большего запаса прочности при изготовлении летных образцов узлов трения могут быть использованы алюминиевые сплавы ВД23Т1 или АК4-1Т1, которые по характеристикам ползучести при повышенных температурах превосходят сплав Д16Т1 [5].

Инденторы 5 имеют цилиндрическую боковую поверхность. Они зафиксированы от проскальзывания в бобышках А с помощью клиньев 7 и гаек 8.

Параллелограммы, расположенные по обе сторо-

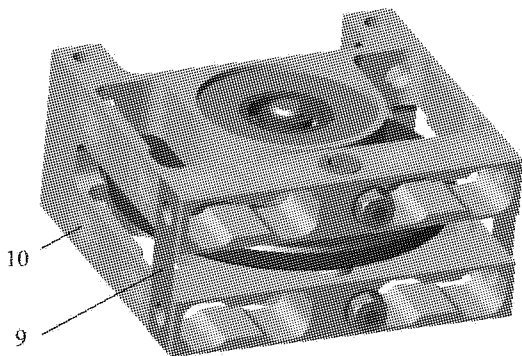
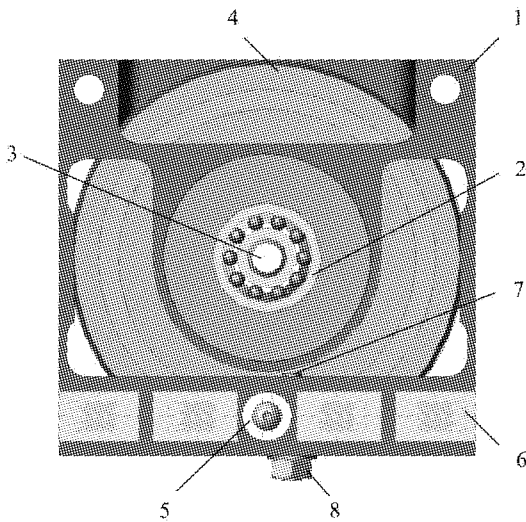
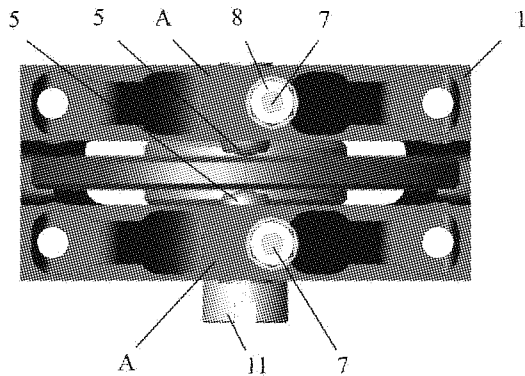


Рис. 1. Модульный узел трения с тензорезисторными датчиками нормальной силы и силы трения: А — бобышка, 1 — рамка, 2 — подшипник, 3 — вал, 4 — диск, 5 — индентор, 6 — тензорезистор датчика нормальной силы, 7 — клин, 8 — гайка, 9 — стяжка, 10 — тензорезистор датчика силы трения

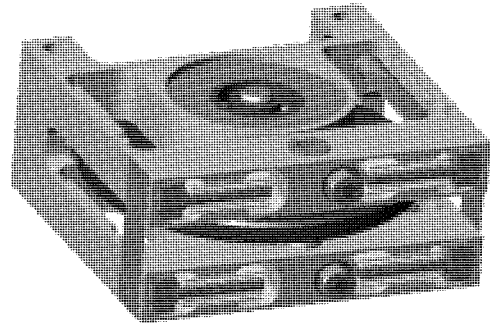


Рис. 2. Модульный узел трения с емкостными датчиками нормальной силы и силы трения

ны от плоскости диска и создающие нормальную силу, соединены между собой с помощью стяжек (лент) 9, имеющих высокую жесткость в осевом направлении и низкую жесткость при изгибе. Эти стяжки воспринимают на себя нормальную нагрузку инденторов, благодаря чему она не передается на упругие шарниры параллелограмма, предназначенного для измерения силы трения с помощью тензорезисторов 10. Кроме того, стяжки 9 позволяют уменьшить отклонение оси индентора от начального положения при изменении величин нормальной силы и силы трения. Так, при максимальных значениях нормальной силы 30 Н и силы трения 12 Н отклонение оси индентора от начального положения не превышает 0.2° (до 0.02° при ужесточении требований к данному параметру и использовании более сложной геометрии стяжек).

Расстояние между соответствующими упругими шарнирами параллелограмма, предназначенного для измерения силы трения, равно радиусу дорожки трения индентора на диске (16 мм). Этим обеспечивается неизменность радиуса дорожки трения при изменении силы трения.

Внутри инденторов 5 выполнены сквозные отверстия, в которых на расстоянии менее 1 мм от вершины индентора (поверхности диска) установлены датчики температуры.

Передача вращения с привода трибометра на вал 3 модульного узла осуществляется через шлицевую гайку 11.

Для снижения влияния ФКП на характеристики датчиков нормальной силы (линейного износа инденторов) и силы трения эти датчики могут быть реализованы с использованием емкостных преобразователей перемещения, устанавливаемых, как показано на рис. 2.

Рамка 1 закрыта отражающим экраном (на рис. 1 и 2 не показан), который предотвращает быстрое, неравномерное ее нагревание/охлаждение и обусловленное этим коробление упругих элементов датчиков. При этом экран и расположенная под ним рамка 1 закрывают дорожку трения на одной из плоскостей диска не более чем на 30 % от воздействия векторных ФКП, находящихся на оси вращения диска.

Таким образом, в каждый момент времени испытаний 70 % этой дорожки трения открыто воздействию векторных ФКП. Например, при ориентации оси модульного узла на Солнце индентор, скользящий по освещенной плоскости диска, будет представлять собой пару трения, работающую в условиях воздействия векторных (вызванных Солнцем) и скалярных ФКП, а индентор, скользящий по неосвещенной плоскости диска, представляет собой пару трения, работающую в условиях воздействия только скалярных ФКП.

Масса разработанного модульного узла трения не превышает 100 г, габариты — не более 45×45×25 мм. При максимальных нормальной силе 30 Н, коэффициенте трения 0.4 и скорости скольжения 1.5 м/с для работы данного модульного узла требуется привод мощностью не более 50 Вт (при КПД привода 75 %).

Данный модульный узел трения имеет небольшие габариты, массу и легко стыкуется с приводом. Индентор и диск составляют основную часть массы узла и определяют его габариты. Поэтому данный узел может доставляться на борт МКС и возвращаться на Землю в собранном виде.

В сентябре 2004 г. на четвертой Украинской конференции по космическим исследованиям состоялась демонстрация работы модульного трибометра, оснащенного данным узлом. Демонстрация проводилась в Гелиоцентре ИПМ НАН Украины (пгт Качивели, Крым) на установке СГУ-5 [6] в вакууме при температурах от -100 °С до 150 °С. На демонстрации присутствовали представители НКА Украины, НПК «Курс», ГКБ «Южное», СКТБ ФТИНТ НАНУ, НПО им. С. А. Лавочкина, РКК

«Энергия», ЦНИИ МАШ, ИПМех РАН, которые занимаются разработками узлов трения КА и НА для исследования трения и износа в условиях воздействия ФКП.

1. Боровик В. Г., Броневец М. А., Гамуля Г. Д. и др. КЭ «Материал-Трение». Состояние работ, задачи исследований // 4-я Украинская конференция по космическим исследованиям: Тез. докладов, 19-26 сентября 2004 г., Крым. — 2004.—С. 16.
2. Броневец М. А., Ярош В. М., Соколов В. Н. и др. Космический эксперимент «Исследование перспективных для космической техники материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве и наземных лабораториях» // Актуальные проблемы развития отечественной космонавтики: Тр. 29 академических чтений по космонавтике. — М., 2005.—С. 409—413.
3. Гамуля Г. Д., Скороход В. В., Солнцев В. П. и др. Разработка научной аппаратуры и антифрикционных материалов нового поколения для проведения космического эксперимента «Материал-Трение» // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 5/6.—С. 28—34.
4. Гаркунов Д. Н. Триботехника. — М.: Машиностроение, 1985.—424 с.
5. Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. изд-ние / С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др. — М.: Металлургия, 1984.—528 с.
6. Фролов Г. А., Пасичный В. В., Тимошенко В. И. Проблемы научно-методического обеспечения разработки и эксплуатации теплозащитных покрытий для теплонапряженных элементов ракетно-космической техники. II. Экспериментальное моделирование аэродинамического нагрева теплозащитных покрытий // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 2/3.—С. 45—57.
7. Serrano J., Gymez-Elvira J., Ocate J. I., et al. A Facility for Tribological Tests in the International Space Station // 8-th Internat. Symp. «Materials in a Space Environment», Ground testing, Poster section, Arcachon – France, 5-9 June 2000. — P. 13—17.
8. Yarosh V. M., Moisehev A. A., Bronovets M. A., Lopatin A. S. Investigation of the hard lubrication coatings in open space around Moon // Abstracts of papers from World Tribology Congress, 8—12 Sept. 1997. — London: Publ. MEP, 1997.— P. 512.

FRICITION MODULE OF PIN ON DISK TYPE FOR TRIBATECHNICAL INVESTIGATIONS IN SPACE

V. G. Borovyk

We consider the constructions of friction modules of pin on disk type for tribometer. These friction modules are intended for experiments in outer space conditions. To study tribotechnical characteristics of materials in space, the pin on disk construction for the friction module is proposed. The construction of the friction module of a promising orbital tribometer is described and its technical characteristics are given.

УДК 523.036

В. М. Батуркин

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Терморегулирование микроспутников — современные тенденции

Надійшла до редакції 14.10.04

Зроблено огляд тенденцій побудови систем терморегулювання микроспутників. Наведено характеристики основних компонентів цих систем.

ВВЕДЕНИЕ

Материалы научно-технических конференций по малым спутникам [15—18], а также информация о текущих разработках и планируемых космических миссиях с их применением [<http://www.certaur.sstl.co.uk>] свидетельствуют о наличии устойчивого интереса к данному типу космических аппаратов. Актуальность разработок малых спутников объясняется прежде всего умеренной стоимостью и непродолжительным сроком их разработки (4—20 млн долларов США за 2—4 года), возможностью установки на них в качестве полезной нагрузки сложной научной аппаратуры, такой как многофункциональное оборудование и оптические системы. Также важным является возможность осуществления запуска таких КА в виде дополнительного груза, что существенно дешевле индивидуального запуска. Согласно классификации Космического центра фирмы «Surrey Ltd.», использующей в качестве критерия массу КА, предложены следующие условные группы: нано- и пикоспутники (масса менее 10 кг), микроспутники (масса в пределах 10—100 кг), мини-спутники (100—500 кг), а также малые межпланетные аппараты (более 500 кг). Типичные технические характеристики группы «малых» спутников приведены в табл. 1.

Ограничения при конструировании малых спутников, вызванные лимитом массы, электрической мощности и объема для установки полезной нагрузки и вспомогательных систем, предъявляет ряд жестких требований к системе терморегулирования (СТР). Анализ используемых подходов для выбора

типа СТР и ее компонентов позволяет более полно понять особенности синтеза таких систем и использовать эту информацию при создании малых спутников. Основное внимание в предлагаемом обзоре уделено группе «микроспутников» (масса до 100 кг), где особенно сложно найти компромисс при распределении массы, объема, энергопотребления между обязательными служебными системами и полезной нагрузкой.

С 1980 по 2002 гг. на околоземную орбиту было выведено более 250 микроспутников, разнородных по структуре и по условиям функционирования (рис. 1). Ниже мы рассмотрим основные принципы

Таблица 1. Характерные признаки малых спутников

| Класс спутника | Масса, кг | Линейные размеры корпуса, м | Средняя мощность, Вт |
|----------------|-----------|-----------------------------|----------------------|
| Мини-спутники | 100—500 | > 1 | < 100 |
| Микроспутники | 10—100 | 0.5—1 | Десятки |
| Наноспутники | < 10 | < 0.2 | Единицы |

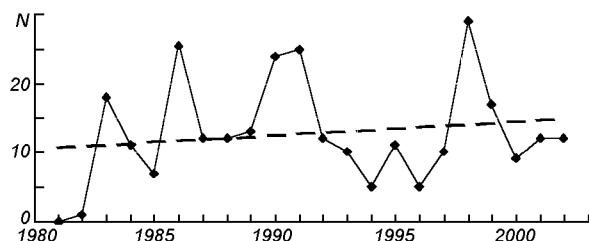


Рис. 1. Количество N запусков микроспутников в 1980—2002 гг. согласно данным Small Satellite Home Page (SSHHP)

построения систем теплового контроля, опираясь на опыт их проектирования ведущими производителями космического оборудования, среди которых Конструкторское бюро «Южное», Украина, фирма «Сари Сателлайт Текнолоджи Лимитед», Великобритания, Берлинский технический университет и др. [1, 2, 6, 10, 13, 15, 19, <http://www.ufa.cz2000>, <http://www.ee.surrey.ac.uk/EE/CSER/OUSAT/IJSSE/IJSSC/issue1/cjilla/cjilla.html>, http://electronics-cooling.com/Resources/EC-articles/SEPT96/Sep96_03.htm], а также базируясь на работах, выполненных коллективом лаборатории тепловых труб Национального технического университета Украины (КПИ) [7, 12, 14, 21], одним из членов которого является автор.

УСЛОВИЯ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА

Микроспутники Земли могут функционировать как на низких круговых орбитах (450—1200 км) с орбитальными углами $-90^\circ < \beta < 90^\circ$, так и на высокоэллиптических орбитах. Они подвержены воздействиям прямого солнечного излучения, отраженного Землей солнечного излучения и собственного ИК-излучения Земли. Характерные значения падающих потоков для плоской поверхности, ориентированной в надир Земли на круговой орбите высотой 550 км с углом $\beta = 0^\circ$, составляют соответственно 1400, 150 (максимум 450) и 190 Вт/м².

Для теневых круговых орбит время пребывания в тени достигает 0,5 ч, для эллиптических — несколько часов. Методики детального определения величин внешних лучистых потоков, а также анализ влияния состава атмосферы и аэродинамического нагрева приведены в работах [1—3, 6, 10, 14, 19, 20].

Выделим несколько вариантов ориентаций микроспутников: а) хаотическая ориентация; б) одна из осей направлена на Солнце; в) одна из осей перпендикулярна к направлению солнечных лучей; г) одна ось направлена по вектору скорости; д) ось направлена к центру Земли; е) трехосная ориентация, когда каждая ось может ориентироваться по заданному сценарию.

Принятый вариант ориентации микроспутника определяет выбор системы стабилизации, а также расположение солнечных панелей и радиаторов-излучателей СТР. Применяемые в микроспутниках системы ориентации основаны на стабилизации вращением, гравитацией, реакции вытекающих газовых струй, а также использовании двигателей-маховиков и моментных магнитопроводов [3].

КОНЦЕПЦИИ ПОСТРОЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ

При построении системы терморегулирования доминирующими являются три подхода: автономная, централизованная и комбинированная концепция. Согласно автономной концепции каждый из рассматриваемых приборов термически изолирован от других (порядок термического сопротивления более 10—100 К/Вт) и имеет собственное терморегулирование. Требуемая температура прибора поддерживается при достижении баланса между тепловыделением прибора и теплообмена с окружающей средой и посадочными местами микроспутника. Уровни температур прибора и микроспутника могут существенно отличаться (до 100 К). Особенность централизованной концепции заключается в том, что приборы должны быть хорошо термически связаны между собой (порядок термического сопротивления менее 1 К/Вт). Энергия тепловыделения приборов передается к основному радиатору-излучателю теплопроводностью по корпусу микроспутника, излучением, контактным теплообменом, специальными теплопроводами (тепловыми трубами) или потоком среды (при герметичном исполнении спутника). На практике наиболее распространенной является комбинированная концепция, в которой одна часть приборов имеет автономный тепловой контроль, а другая часть — централизованный.

Каждая из концептуальных схем имеет свои преимущества и недостатки. Достоинствами автономной схемы являются возможность независимого проектирования прибора и поддержание отличного от остальных приборов уровня температур, однако каждый из приборов должен иметь собственную СТР. Также важно отметить, что при малой теплоемкости прибора (1—1000 Дж/К) колебания его температуры при движении по орбите могут быть значительными из-за существенного отличия внешних условий на освещенном Солнцем и находящимся в тени участках орбиты.

Преимуществами централизованной концепции являются привязка температур приборов к одной базовой температуре, однотипность конструирования системы терморегулирования, «сглаживание» влияния внешних тепловых возмущений, уменьшение количества радиаторов и температурная однородность в объеме. Однако равновесная температура микроспутника при отсутствии активных способов влияния на нее (например, подвод дополнительного тепла от электрических нагревателей, либо путем изменения ориентации радиатора относительно Солнца или его оптических свойств) не может быть скорректирована или изменена в ходе эксплуатации.

Первичная оценка площади F_p плоского радиатора-излучателя прибора осуществляется на основе анализа уравнения баланса тепловых потоков с использованием усредненных по орбите оценок тепловыделения прибора $\bar{Q}_П$, плотности \bar{q}_C поглощенного радиатором потока от Солнца, плотности отраженного Землей солнечного потока \bar{q}_{O3} и ИК-излучения Земли $\bar{q}_{ИК}$:

$$F_p \varepsilon \cdot \sigma (\bar{T}_p^4 - T_0^4) \geq \bar{Q}_П + F_p \cdot \bar{q}_{ИК} + F_p (\bar{q}_{O3} + \bar{q}_C) + Q_{РК},$$

где величины $\bar{q}_{ИК}$, \bar{q}_{O3} , \bar{q}_C нормализованы к плоскости радиатора и являются функциями ориентации радиатора относительно Земли и Солнца, величина $Q_{РК}$ — теплообмен радиатора с корпусом микроспутника, \bar{T}_p — заданная усредненная температура радиатора, К; T_0 — температура окружающей среды, ε — степень черноты покрытия радиатора. Уточнение значений размера радиаторов и температур T_p проводится на основе программных комплексов, обеспечивающих решение систем уравнений теплового баланса в нестационарном режиме для составляющих микроспутника.

На определение места рационального расположения радиатора излучателя существенное влияние оказывает ориентация микроспутника. Если ось вращения микроспутника перпендикулярна к направлению теплового потока от Солнца, внешняя (боковая) оболочка вполне может обеспечивать сток тепла от внутренних источников (рис. 2, а). Так, при соотношении оптических свойств ее покрытия $\alpha_s/\varepsilon < 1$ (α_s — коэффициент поглощения солнечного излучения) температура поверхности будет близка к 10—20 °С [14]. Если ось вращения совпадает с направлением теплового потока от Солнца, для расположения радиатора может использоваться поверхность, расположенная в затененной зоне. Лобовые поверхности микроспутника, на которые солнечный тепловой поток падает по нормали, могут либо теплоизолироваться от излу-

чения, либо покрываться селективными оптически покрытиями ($\alpha_s \approx 0.2$, $\varepsilon \approx 0.85$). Это позволяет понизить температуру до 30 °С и использовать эту поверхность в качестве радиатора для отвода выделяющегося во внутреннем пространстве тепла (рис. 2, б).

При трехосной ориентации, в случае, когда одна ось ориентирована на Солнце, вполне оправдана установка радиаторов-излучателей на боковых поверхностях, а также на лобовой поверхности. При этом отвод тепла может быть организован как через один радиатор (централизованная схема), так и через несколько радиаторов, рассредоточенных по спутнику и обеспечивающих автономное решение тепловых режимов элементов КА (рис. 2, в). Объединение тепловой связью всех компонентов микроспутника приводит к существенному увеличению теплоемкости системы, что уменьшает температурную неоднородность по объему, снижает температурные деформации и колебания температуры самого радиатора при прохождении освещенных и теневых участков орбиты.

При хаотической ориентации (свободно летящие объекты) любая зона боковой поверхности может быть использована для установки радиаторов.

Необходимо также отметить, что подавляющее большинство современных микроспутников выполнены как негерметичные объекты, в которых транспорт тепловой энергии от источника (прибор, отсек) до радиатора осуществляется излучением, теплопроводностью или по специальным теплопроводам.

Рассмотрим технические параметры типичного микроспутника (негерметичный корпус, централизованная схема, одноосная солнечная ориентация) со средней тепловой мощностью 40 Вт:

- размеры микроспутника — куб $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ м;
- площадь наружной поверхности спутника — 1.5 м^2 ;
- площадь радиатора, расположенного в теневой зоне, в зависимости от орбиты — $0.1\text{--}0.2 \text{ м}^2$;

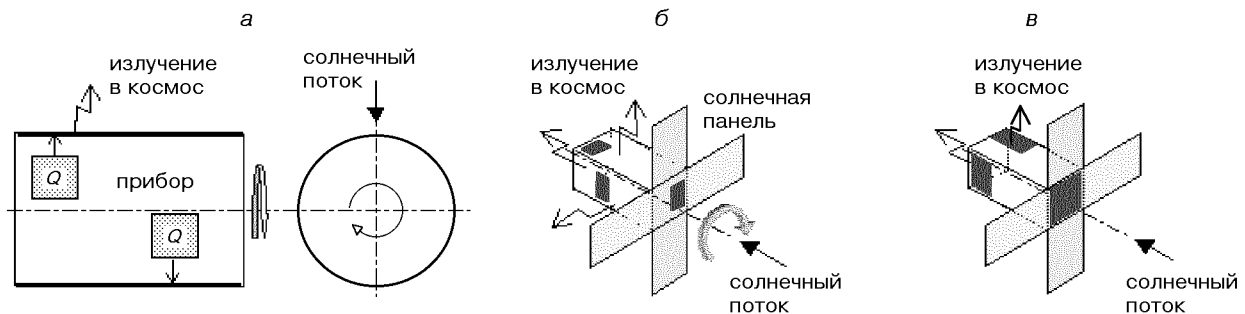


Рис. 2. Концепции построения систем терморегулирования: а — ось вращения перпендикулярна к направлению солнечного потока, б — ось вращения совпадает с направлением солнечного потока, в — схема расположения радиаторов на спутнике с трехосной стабилизацией с продольной осью, направленной на Солнце

- температура поверхности радиатора-излучателя — 280 К.

Для обеспечения теплового режима такого спутника большую часть его наружной поверхности — почти 1.3 м^2 — необходимо защищать экранно-вакуумной изоляцией от теплового воздействия внешних источников. Стабильность температуры радиатора (в централизованной системе) и, соответственно, всего остального приборного оборудования будет зависеть от постоянства внутреннего тепловыделения и внешних теплопритоков. Так, для приведенных выше данных при температуре радиатора 280 К изменение усредненного внутреннего тепловыделения на 1 Вт приводит к сдвигу температуры радиатора на примерно 1 К.

Обязательным атрибутом микроспутника являются солнечные панели, которые занимают, как правило, более 0.5 м^2 его поверхности. Солнечные панели устанавливаются непосредственно на корпусе, являясь органической частью его поверхности (неподвижные панели), или примыкают к его внешней поверхности (открываемые панели). Открываемые панели на микроспутниках, как правило, не имеют механизма переориентации относительно корпуса. Для космических аппаратов, не имеющих преимущественной ориентации на Солнце, солнечные панели покрывают большую часть поверхности корпуса с целью увеличения площади освещаемой поверхности.

Требования к температурному режиму типичных компонентов микроспутника приведены в табл. 2 [19], а также, например, в работах [10, 13, 14, 19]. Видно, что наиболее чувствительными устройствами являются аккумуляторы электрической энергии, оптическая аппаратура и индивидуальная по-

лезная нагрузка. Среднеорбитальное тепловыделение внутри микроспутника, обусловленное постоянным или периодическим функционированием служебной аппаратуры и полезной нагрузки, находится в диапазоне 15—50 Вт. Типичными тепловыделяющими компонентами являются бортовой компьютер, передатчики, система ориентации и электрические аккумуляторы. Постоянная работа аппаратуры полезной нагрузки практически исключает скачкообразное выделение тепловой энергии. При периодическом функционировании полезной нагрузки, например при сканировании поверхности Земли охлаждаемыми приемниками излучения, пик тепловыделения достигает величины 200 Вт в течение 10—20 мин.

Наблюдаются два организационных подхода к обеспечению теплового режима полезной нагрузки. Первый: полезная нагрузка и служебные системы разрабатываются и компонуются одним разработчиком. В этом случае предусматривается совместное решение тепловой задачи для всего микроспутника, как для полезной нагрузки, так и для служебных систем всего спутника. Второй: потребителю предлагается многоцелевой корпус микроспутника с выделенным местом для полезной нагрузки. Граничным условием для тепловой привязки полезной нагрузки является тепловой режим микроспутника.

Анализ работ [8, 15—18, а также <http://www.certaur.sstl.co.uk>, http://electronics-cooling.com/html/2000_jan_a2.html, <http://www.ufa.cz2000>] позволяет выделить ряд потенциальных задач, связанных с обеспечением тепловых режимов в микроспутнике, решение которых потребует в ближайшее время поиска новых подходов при разработке эффективных систем теплового контроля. К числу таких задач относятся:

- обеспечение геометрической и размерной стабильности несущего каркаса (рамы) микроспутника при одновременном решении задач обеспечения теплового режима, что связано с тенденцией оснащения микроспутников высокоточным оптическим оборудованием, имеющим жесткие допуски взаимного расположения оптических осей [8, 12];
- отвод от элементов бортового оборудования теплоток с мощностью 30...50 Вт и плотностями тепловыделения $0.08\text{—}0.2 \text{ МВт/м}^2$;
- обеспечение совместного функционирования приборов, требующих различных температурных уровней [8];
- миниатюризация космического оборудования и компактность сборки в условиях ограниченного пространства микроспутников требуют соответ-

Таблица 2. Типичные температурные условия эксплуатации

| Наименование компонентов | Температура, °С | Пиковая мощность, Вт |
|---|-----------------|---------------------------|
| Электрическое оборудование | -10...+40 | 10 для блока |
| Электрические аккумуляторы | -5...+15 | 20 |
| Газ в системе ориентации | +9...+50 | — |
| Микропроцессоры, электронные компоненты | -5...+40 | 20 |
| Несущий каркас | -5...+40 | — |
| Солнечные элементы | -60...+55 | — |
| Твердотельные диоды | -60...+90 | — |
| Датчики ориентации | -5...+45 | 5 |
| Оптика | 21 | 10 |
| Полезная нагрузка | Индивидуально | 150 |
| Откидные панели, штанги, вынесенные датчики | -100...+120 | — |
| Весь микроспутник | — | 250 в среднем 20—60 |

ствующей миниатюризации и монтажной гибкости элементов систем терморегулирования;
— увеличение срока эксплуатационного ресурса систем терморегулирования до 5—10 лет.

Схемные решения СТР (для микроспутников они, как правило, пассивные) базируются на использовании последовательно/параллельно соединенных компонентов системы теплового контроля, характеристики которых и способ их соединения определяют тепловые параметры всей системы. Характеристики важнейших компонентов СТР приведены ниже.

КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

Типичная система терморегулирования микроспутников состоит из экранно-вакуумной теплоизоляции, радиационных поверхностей, теплопроводов (включая тепловые трубы), теплоизоляторов, тепловых аккумуляторов и электрических нагревателей.

Теплоизоляция служит для теплового изолирования приборов друг от друга и от воздействия внешних тепловых факторов, таких как солнечный поток и окружающее пространство. Типичная экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) для микроспутников состоит из 20—30 внутренних слоев алюминизированного (одно- или двустороннее покрытие) лавсана толщиной 6 мкм. Внутренний и

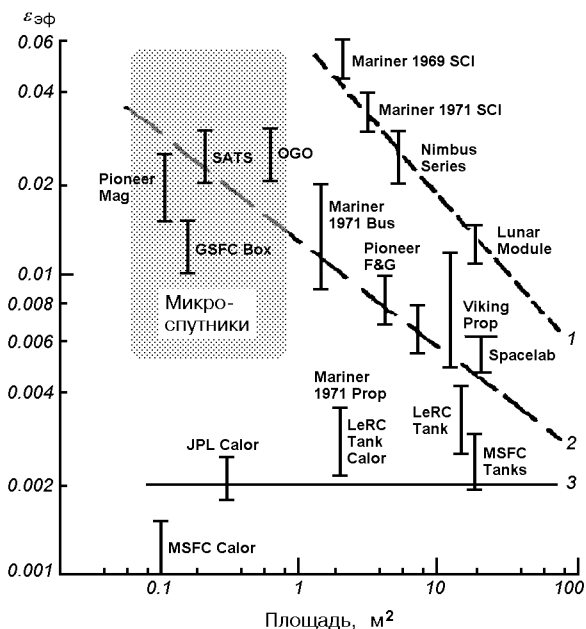


Рис. 3. Эффективный коэффициент излучения пакетов многослойной вакуумной теплоизоляции как функция от площади и неоднородности пакетов [14]: 1 — высокая неоднородность, 2 — средняя, 3 — низкая

внешний слой из алюминизированного каптона имеют толщину 25 или 50 мкм. Один квадратный метр (масса порядка 0.3 кг) такой изоляции с эффективным коэффициентом излучения $\varepsilon_{эф} = 0.03$ отводит в космос приблизительно 10 Вт тепловой энергии. Величина $\varepsilon_{эф}$ зависит от размера и конструктивного выполнения пакетов ЭВТИ, средней температуры, давления, уплотнения пакетов, наличия швов, накладок и щелей. Резюме относительно величины эффективного коэффициента излучения пакетов ЭВТИ представлено в работе [14] (рис. 3). Рекомендованное для предварительных расчетов значение $\varepsilon_{эф}$ ЭВТИ находится в диапазоне 0.03 ± 0.02 [14].

Радиационные поверхности служат для отвода тепловой энергии излучением в окружающее пространство, для поглощения требуемого количества тепловой энергии или для обеспечения заданной равновесной температуры. Оптические покрытия, обработка поверхности, напыление, электрохимические покрытия и селективные покрытия могут обеспечивать значения $0.1 < \varepsilon/\alpha_s < 10$ [19]. Для типичного оптического селективного покрытия $\alpha_s \sim 0.2$, $\varepsilon \sim 0.85$. На рис. 4 представлены оптические свойства для некоторых покрытий и типов обработки поверхности [14].

Значения $\varepsilon = 0$, $\alpha_s = 0$ соответствуют идеальному отражателю, $\varepsilon = 1$, $\alpha_s = 0$ — идеальному покрытию для радиационных поверхностей микроспутников, $\varepsilon = 0$, $\alpha_s = 1$ — идеальному поглотителю солнечного излучения, $\varepsilon = 1$, $\alpha_s = 1$ — идеальному поглотителю излучения.

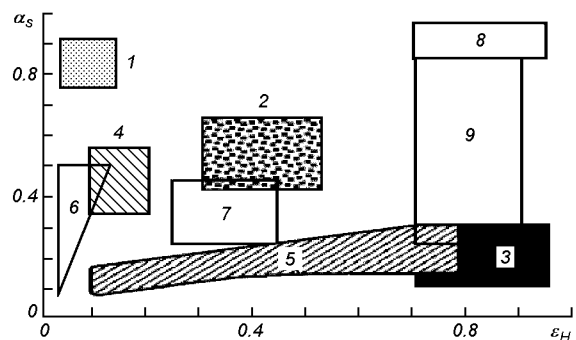


Рис. 4. Значения излучательной способности ε_H и коэффициента поглощения солнечного излучения α_s [14] для некоторых поверхностей: 1 — селективные солнечные поглотители; 2 — металлы, подвергнутые пескоструйной обработке, и защитные покрытия; 3 — белые краски и селективные покрытия на основе напыленного кварца; 4 — необработанные металлы; 5 — диэлектрические пленки на полированных металлах, 6 — полированные металлы, 7 — металлические краски, 8 — черные краски, 9 — серые и светлые краски

Теплопроводы. Теплопередача внутри спутника осуществляется излучением, теплопроводностью через структурные элементы и с помощью теплопроводов. Роль излучения при температурах 260—300 К и неизотермичности по объему порядка 10—20 К незначительна. Однако она важна для узлов, функционирующих при температурах 90—240 К. В качестве теплопроводов могут использоваться элементы несущей структуры спутника, изготовленные из алюминиевых сплавов. Эти, а также бериллиевые сплавы применяются для аккумуляции энергии в переходных процессах ($\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, теплопроводность $\lambda = 150 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{К}^{-1}$, теплоемкость $c_p = 900 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\text{К}^{-1}$, $\rho c_p = 2.43 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-3}\text{К}^{-1}$), бериллий — для передачи и аккумуляции тепла ($\rho = 1850 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 180 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{К}^{-1}$, $c_p = 1880 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\text{К}^{-1}$, $\rho c_p = 3.48 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-3}\text{К}^{-1}$). Теплопроводы могут быть изготовлены из гибких медных нитей в виде кабеля [4, 5]). Этот материал имеет определенную гибкость и является хорошим проводником тепла (типичное термическое сопротивление более 2 К/Вт). Такие теплопроводы позволяют соединять элементы с заранее неизвестным расположением и уменьшить передаваемый момент сил в точках присоединения теплопровода (механическое воздействие может возникнуть вследствие термического расширения, вибраций или манипуляций с изделием).

Другим типом эффективных теплопроводов являются тепловые трубы, в которых перенос тепловой энергии осуществляется движением теплоносителя в цикле «испарение — конденсация». В микроспутниках, как правило, используются тепловые трубы, заполненные аммиаком и имеющие капиллярную структуру в виде продольных (аксиальных) каналов, изготовленных путем экструзии. Типичный профиль имеет диаметр более 8 мм, тепловое сопротивление менее 0.1 К/Вт. Путем подбора типа капиллярной структуры (металлические войлоки,

порошки, сетки) и типа теплоносителя можно обеспечить работоспособность тепловой трубы на требуемой части температурного диапазона от -190 до $+100$ °С [7].

Иллюстрацией применения тепловых труб в системе теплового контроля могут служить микроспутники BIRD, «Magion-4» и «Magion-5» [12, 21]. Целью применения тепловых труб в обоих примерах была передача тепла между отдаленными зонами спутника (на расстояние 0.5 м между передним и тыльным отсеками спутников типа «Magion», и на расстояние 0.3 м между отсеком полезной нагрузки и главным радиатором спутника BIRD). Конфигурация тепловых труб представлена на рис. 5. Конструкции тепловых труб разработаны и изготовлены в НТУУ КПИ.

В космических проектах ближайших лет будут использоваться новые модификации тепловых труб, а именно тепловые микротрубы с характерными размерами корпуса 1—6 мм и контурные тепловые трубы. Тепловые микротрубы имеют вставную капиллярную структуру или профилированные канавки; материал их оболочки — медь или серебро; типичный диаметр окружности 1—6 мм; длина — до 100 мм, теплоноситель: спирты, вода; плотность теплового потока составляет 20—100 кВт/м²; тепловое сопротивление собственно тепловых труб составляет 0.5—10 К/Вт. Тепловые микротрубы также могут быть выполнены в виде плоских пластин шириной 20—40 мм, длиной 110 мм и толщиной 1—3 мм.

Все виды тепловых труб имеют ограничения по передаваемой мощности при функционировании в поле сил гравитации, действующей во время проведения наземных испытаний. В результате воздействия сил гравитации не всегда удастся воспроизвести условия функционирования тепловых труб из-за прерывания их функционирования. Инновационное направление в технологии тепловых труб — это контурные тепловые трубы, которые могут функционировать независимо от направления гравитации. При этом расстояние между зонами теплоподвода и теплоотвода может достигать нескольких метров при передаваемой мощности порядка десятков Ватт. Трубопроводы, соединяющие зоны теплоподвода и теплоотвода в контурных тепловых трубах, представляют собой гибкие тонкостенные трубки диаметром 2—4 мм, что позволяет применять это устройство для теплового соединения движущихся частей, например для открывающегося радиатора-излучателя.

Тепловой контакт. В зоне механического соединения деталей возникают тепловые контакты между элементами. При плотности тепловых потоков

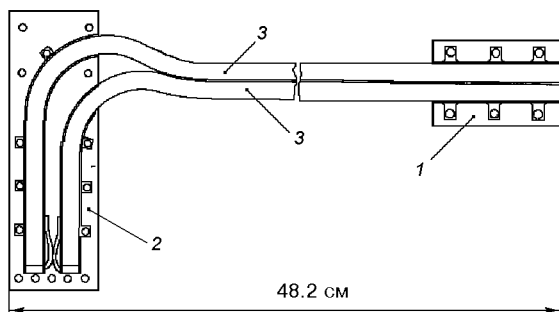


Рис. 5. Схема тепловых труб для микроспутников «Magion»: 1 — зона подвода тепла, 2 — зона отвода тепла, 3 — зона транспорта тепла

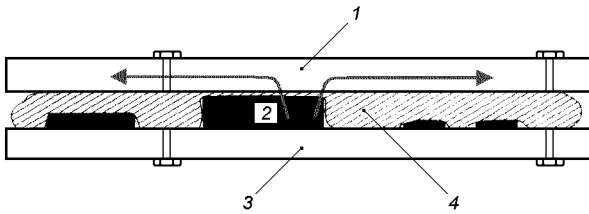


Рис. 6. Охлаждение электронных компонентов с помощью деформируемой теплопроводной прокладки: 1 — тепловой и электромагнитный экран, 2 — электронные компоненты, 3 — электронная плата, 4 — деформируемая прокладка

более 10 кВт/м^2 температурный перепад в зоне теплового контакта достигает 10 К и более, что недопустимо. С целью уменьшения перепадов температур на тепловом контакте применяются различные типы прокладок, смазок и герметиков, устанавливаемых между соединяемыми деталями. Типичная теплопроводность прокладок составляет $1\text{—}6 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, толщина $0.15\text{—}0.3 \text{ мм}$, они могут применяться при невысоком давлении сжатия ($0.7\text{—}2 \text{ бар}$) и позволяют уменьшить сопротивление контакта в местах соединения в несколько раз [11]. Отвод тепла от микроэлементов с неплоской геометрией поверхности осуществляется с использованием конформных (деформируемых) прокладок в зазорах величиной $1\text{—}4 \text{ мм}$. Типичная схема применения деформируемой прокладки показана на рис. 6 применительно к охлаждению микропроцессора, требующего установки электромагнитного экрана.

Обзор имеющихся средств, улучшающих тепловой контакт, насчитывает более 100 наименований таких материалов, как электропроводных, так и электроизоляционных [14]. Эксперименты, проведенные в НТУУ КПИ при выборе прокладок для улучшения контакта при присоединении тонкого металлического профиля (толщина $1\text{—}1.5 \text{ мм}$) к массиву (обе детали изготовлены из сплава алюминия) свидетельствуют о том, что они не всегда эффективны. Кроме того, при применении в космосе теплопроводных прокладок, смазок, наполнителей, герметиков и клеев есть опасность возможного загрязнения узлов микроспутника вследствие газовой выделения этих материалов. Так, например, из одиннадцати исследуемых материалов, отобранных для использования в микроспутнике BIRD [8, 12] для уменьшения контактного термического сопротивления, успешно прошли испытания и удовлетворяли критериям стандарта ESA [9] только четыре. Другая важная проблема обеспечения надежности применения этих материалов связана с их стабиль-

ностью при действии различных факторов космической среды.

К теплопроводам также относятся такой класс пассивных устройств, как распределители (трансформаторы) теплового потока, служащие для охлаждения элементов с плотностями тепловыделения более 50 кВт/м^2 . Эти устройства устанавливаются между тепловыделяющим элементом и стоком тепла и понижают плотности тепловыделения у стока за счет большей, чем у самого элемента, площади контакта со стоком тепла. Типичные материалы для таких распределителей — медь и алюминий. Возможно также использование для этой цели плоских панелей, собранных из цилиндрических тепловых труб, или плоских тепловых труб. Имеются примеры успешного конструирования распределителей теплового потока с использованием графитовых пиролитических порошков и графитовых волокон с теплопроводностью материала $600\text{—}1000 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ [14].

Теплоизолирующие элементы. Важным средством пассивного терморегулирования также являются низкотеплопроводные опоры и стойки. Они служат механическим основанием для устройства (частей устройства) на микроспутнике и одновременно служат для теплового изолирования этого устройства. Такая мера необходима главным образом для устройств с автономным терморегулированием или для устройств и их частей, которые функционируют на температурном уровне, существенно отличающемся от температур внутренних частей спутника.

Типичные материалы для таких конструктивных элементов — это материалы с низкой теплопроводностью, в том числе пластмассы, стекло- и графитовое волокно ($\lambda = 0.5\text{...}2 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), нержавеющая сталь ($\lambda = 14 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), сплавы титана ($\lambda = 8\text{...}15 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$).

Выбор материала в каждом конкретном случае определяется требуемой величиной термического сопротивления между устройством и его посадочным местом, уровнем температур, величиной деформаций при изменении температур и механическими качествами конструкции. Как пример на рис. 7 приведена конструкция опоры для установки

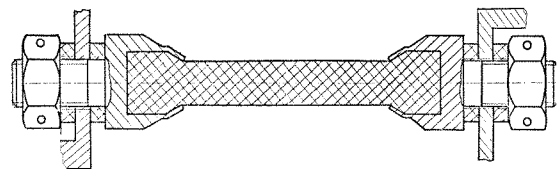


Рис. 7. Схема типичной низкотеплопроводной опоры прибора (длина опоры 52 мм)

двухкилограммового прибора. Четыре опоры обеспечивают термическое сопротивление более 400 К/Вт и фактически теплоизолируют прибор от структуры космического аппарата [4, 5].

Другие компоненты СТР. Такие эффективные средства терморегулирования как жалюзи, радиаторы с переменными оптическими свойствами, аккумуляторы тепла, регулируемые электрические нагреватели мы не рассматривали, однако при необходимости они также могут применяться для конструирования системы теплового контроля микроспутников. Современная конструкторская мысль демонстрирует новые перспективные разработки элементов систем терморегулирования, среди которых следует отметить покрытия с переменной и управляемой степенью черноты (изменение степени черноты в диапазоне 0.2—0.8); микрожалюзи (изменение эффективной степени черноты в два раза); механические тепловые микрокоммутаторы тепловой цепи (изменение термического сопротивления 100:1); композитные материалы углерод—углерод с плотностью 2000—3000 кг/м³, теплопроводностью 400—1100 Вт·м⁻¹К⁻¹ и минимальным коэффициентом линейного расширения, которые могут применяться для изготовления несущей конструкции микроспутника [14, 20].

ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ТЕПЛООВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

Проектирование системы обеспечения тепловых режимов микроспутника и его элементов является комплексной проблемой, требующей решения задач внешнего лучистого теплообмена (оболочка КА — внешняя среда), задачи внутреннего теплообмена (кондуктивно — радиационный перенос), а также прочностных задач, определяющих механические свойства элементов. Упрощенные аналитические решения, как правило, используются на этапе формирования концепции построения системы терморегулирования. Для дальнейшей углубленной проработки системы терморегулирования применяется широкий спектр коммерческих программ, базирующихся на численных методах. Не рассматривая достоинства и недостатки имеющихся коммерческих программ, их стоимостные параметры, можно отметить следующие программные пакеты.

1. ESATAN, ThermXL, SINDA/G, SINDA/FLUINT, TAK2000 — определяется температурное поле объекта, представляемого совокупностью материальных точек с сосредоточенными параметрами (теплоемкостью и тепловыделением). Пакеты

имеют логические операторы и набор готовых функциональных подпрограмм для стандартных элементов (нагреватели, плавящиеся аккумуляторы, жалюзи, тепловые трубы).

2. NASTRAN, COSMOS, ANSYS, FLOTHERM, TAS, TAK2000 — объект представляется моделью с распределенными параметрами с использованием его геометрического образа и теплофизических свойств. Применяются методы конечных элементов и конечных разностей. Логические операторы, как правило, в этих программах отсутствуют. Готовые подпрограммы для включения функциональных стандартных элементов СТР ограничены нагревателями, регулирующими контроллерами «включено — выключено» и пропорциональными, термобатареями Пельтье.

3. OAZIS, ESARAD, TERMICA, TRASYS, RadCAD, NEVADA, SSPTA. Пакеты используются для расчета радиационного теплообмена как для внутренней, так и для внешней задач на основе геометрии и оптических свойств объекта. Они позволяют определять тепловые потоки от Земли и Солнца на основании параметров орбиты и ориентации микроспутника, а также решать задачи лучистого теплопереноса при диффузионном и зеркальном отражении.

4. Интегрированные пакеты, в которых выполняется комплексное решение задач кондуктивно — радиационного теплообмена: TRASSA разработки Института низких температур НАН Украины, Termica (ASTRIUM, Европейский консорциум), IDEAS (MAYA, Канада), ITAS (Analytix Corp., США), SSPTA/386 (Swales and Associates, Inc., США), ESATAN + ESARAD (Alstom Power Technology Centre, Великобритания) и др.

5. Специализированное программное обеспечение, применяемое для расчета отдельных элементов системы терморегулирования:

- для определения теплопроводности механических контактов,
- для расчета термоэлектрических элементов,
- для проектирования тепловых труб различных модификаций.

При подготовке тепловой модели микроспутника повышенное внимание следует уделять:

- сбору информации о новых используемых материалах и анализу достоверности их теплофизических свойств: теплопроводности, теплоемкости, плотности, изотропии свойств, коэффициента линейного расширения, температурной зависимости свойств;
- поиску сведений об изменении оптических свойств покрытий во время эксплуатации для солнечного и ИК-диапазона длин волн: степени

черноты и коэффициента поглощения, коэффициента пропускания, коэффициента отражения. Указанные данные применимы при условии диффузионного отражения. При зеркальном или частично зеркальном отражении набор исходных данных должен дополняться с соответствующей коррекцией математической модели;

- определению реальных значений проводимости тепловых контактов в местах соединения и возможной экспериментальной проверке;
- разработке критериев, используемых для упрощения тепловой модели объекта, структуризации и упрощению тепловой схемы;
- выявлению функциональных зависимостей для внешних и внутренних тепловых нагрузок, определению преобладающих механизмов теплопередачи;
- отслеживанию происходящих во время разработки микроспутника механических и структурных изменений в его конструкции и, соответственно, адекватной и оперативной модификации тепловой модели.

Идеальным вариантом реализации теплового моделирования могло бы быть использование для построения геометрического образа микроспутника рабочих чертежей его деталей и узлов с дополнением модели тепловыми граничными условиями и условиями сопряжения деталей. Однако, в настоящее время тепловые модели строятся с многочисленными упрощениями геометрической модели, а часто — к трансформации ее к системе узлов (точек), не имеющих геометрического образа. Типичная спецификация тепловой модели космического корабля в 1969 г. состояла из 100 узлов (точек) с 150 тепловыми связями между ними, а в 1984 г. — 500 узлов с 13000 тепловыми связями [19].

Конечной целью разработки и использования тепловой модели микроспутника является определение температур элементов микроспутника для набора типичных эксплуатационных условий. Как правило, это «холодный» и «горячий» случаи эксплуатации, варианты с отказом функционирования некоторых элементов, параметрический анализ с целью изучения влияния изменения теплофизических и оптических свойств. В случае, если определенные температуры выходят за допустимые границы эксплуатации, проводится поиск уточненных теплотехнических параметров составляющих системы терморегулирования, при которых выполняются условия эксплуатации. Если же уточненные параметры не могут быть найдены, необходим пересмотр принятой концепции системы теплового ре-

гулирования либо для объекта в целом, либо для рассматриваемого прибора.

Тестирование и экспериментальная проверка функционирования системы терморегулирования являются обязательным дополнением ко всему комплексу работ по разработке системы терморегулирования микроспутника. Как правило, система терморегулирования тестируется до запуска. Типичная идеология предполагает проверки, начиная с отдельного элемента (например тепловой трубы), затем на уровне системы (например системы теплового контроля электронного блока) и завершается испытанием полномасштабного микроспутника. Проведение нескольких последовательных серий испытаний (для теплового макета, конструкторско-доводочного образца, летного образца), по результатам каждой из которых проводится уточнение конструкции, должно отсеять все ошибки в конструкции системы терморегулирования для летного образца микроспутника. Условия проведения испытаний системы терморегулирования необходимо приближать к условиям реальной эксплуатации в космическом пространстве [6]. Для моделирования тепловых условий космического пространства используются термовакуумные камеры. Типичные условия в термовакуумной камере для испытания микроспутников, имеющих температуру поверхностей не более 400 К, предполагают:

- внутренние размеры, не менее: длина 2 м, диаметр 1.5 м [13];
- рабочее давление в камере составляет менее 0.0013 Па (10^{-5} торр) при условии использования оборудования, исключающего наличие паромасляных следов;
- температура внутренней поверхности термовакуумной камеры находится на уровне -190°C , а степень черноты этой поверхности превышает 0.9;
- имеются средства имитации тепловых потоков, попадающих на микроспутник от Земли и Солнца при его движении по орбите. Лучистые тепловые потоки от Земли и Солнца могут моделироваться с помощью нагревателей, установленных на излучающих поверхностях. Величины тепловыделений нагревателей определяются на основе прогнозируемых значений поглощенных потоков на основе орбитальных данных, оптических свойств поверхности и геометрии объекта. Более корректно земное излучение моделируется тепловыми радиационными стоками с регулируемой температурой, а солнечные потоки — с помощью солнечных имитаторов (в США имеется более 40 термовакуумных камер с

солнечными имитаторами с размером солнечного пятна не менее 1.2 м [14]).

Обязательными термовакуумными испытаниями являются режимы условий «холодного» и «горячего» случаев эксплуатации. Микроспутник должен достичь состояния теплового равновесия при условиях, определяющих каждый случай. Полученные температуры характерных точек микроспутника служат для подтверждения принятой концепции системы теплового регулирования и уточнения принятых параметров в математической модели этой системы (тепловых проводимостей и теплоемкостей). Следует отметить, что несмотря на экспериментальную проверку системы теплового контроля для «холодного» и «горячего» случаев при реальной эксплуатации микроспутника возможны ситуации, которые нельзя предвидеть и проанализировать. Кроме того, моделирование космической среды проводится с определенными погрешностями. Поэтому в работе [14] рекомендуется расширить температурные пределы эксплуатации оборудования микроспутника на ± 11 К, чтобы компенсировать влияние возможных неопределенностей на температурный режим при функционировании на орбите.

ВЫВОДЫ

На основе обзора литературных данных, а также опыта, приобретенного в Национальном техническом университете Украины (КПИ) при разработке СТР для микроспутников «Magion-4» (1995 г.), «Magion-5» (1996 г.) и BIRD (2001 г.), проведен анализ тепловых условий функционирования и используемых концепций построения систем теплового контроля микроспутников (масса спутника менее 100 кг). Установлено, что наиболее распространенной является комбинированная концепция построения СТР, сочетающая признаки автономной и централизованной концепций. СТР использует пассивный принцип терморегулирования, в котором тепловое равновесие микроспутника (или прибора) при заданной температуре достигается путем подбора площади поверхности и оптических свойств радиаторов-излучателей. Систематизированы и численно охарактеризованы следующие используемые пассивные компоненты СТР: экранно-вакуумная теплоизоляция, радиационные поверхности, теплоизоляционные опоры, теплопроводы, контактные соединения, и приведены данные о новых конструктивных разработках. Анализ характеристик коммерческих программных комплексов для теплового проектирования показал существование двух подходов к моделированию — представления

объекта как системы точек с сосредоточенными параметрами и как представления объекта на основе его геометрического образа. Оба подхода требуют проведения упрощения реальной тепловой схемы. Подтверждение или уточнение принятой тепловой концепции осуществляется на основе результатов испытаний в условиях, как можно более полно имитирующих реальные. Компенсация неопределенностей принятых внешних граничных условий, свойств и используемых упрощений осуществляется за счет расширения температурного диапазона эксплуатации приборов и служебного оборудования микроспутника.

1. Андреанов В., Артамонов В., Атманов И. Т. и др. Автономные планетарные станции. — М.: Наука, 1973.—280 с.
2. Залетаев В., Капинос Ю., Сургучев О. Расчет теплопередачи в космических аппаратах. — М.: Машиностроение, 1979.—208 с.
3. Инженерный справочник по космической технике / Под ред. А. В. Солодова. — М.: Военное изд-во Министерства обороны СССР, 1977.—430 с.
4. Костенко В., Батуркин В., Гречина Н. и др. Криогенная система для видеоспектрометрического комплекса (ВСК) охлаждения в проекте ФОБОС. — М., 1988.—39 с.—(Препринт / АН СССР. Ин-т космич. исслед.; Pr-1409).
5. Телевизионное исследование кометы Галлея / Аванесов Г., Зиман Я., Тарнопольский В. и др. — М.: Наука, 1989.—295 с.
6. Фаворский О., Каданер Я. Вопросы теплопередачи в космосе. — М.: Вышп. шк., 1972.—280 с.
7. Baturkin V., Zhuk S., et al. Autonomous heat pipe systems for electronic components thermostating at near-Earth orbit exploitation // Proc. of 24th International Conference on Environmental Systems, Friedrichshafen, Germany, June 20-23, 1994. — Friedrichshafen, 1994.—rep. N 941302.
8. Briess K., Barwald W., Lura F., et al. The BIRD mission is completed for launch with the PSLV-C3 in 2001 // Digest of the 3rd International Symposium of IAA «Small Satellites for Earth Observation. Berlin, April 2—6, 2001. — Berlin: Wissenschaft und Technik Verl., 2001.—P. 323—326
9. ECSS-Q-70-02A. Thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials. 26 May 2000, ESA-ESTEC.—44 p.
10. Fundamental of space systems / Eds V. L. Pisacane, R. C. Moore. — Oxford: Univ. press, 1994.—784 p.
11. Latham C. Technical Brief. Thermal resistance of interface materials as a function of pressure // ElectronicsCooling.—1996.—2, N 3.—P. 35.
12. Lura F., Biering B., Baturkin V., et al. Heat pipe application for thermal stable bench arrangement in small satellite design // Proc. of the 30th International Conference on Environmental Systems (ICES) and 7th European Symposium on Space Environmental Control Systems, Toulouse, France, July 10-13, 2000, rep. N 2000-01-2460.—10 p.
13. Lura F., Hagelschuer D. System conditioning — our ways and testing tools for the development of reliability for spaceborne components and small satellites // Digest of the 1st International Symposium of the International Academy of Astronautics (IAA), Berlin, November 4—8, 1996.—P. 365—368.
14. Satellite thermal control handbook / Ed. by D. Gilmore D. — California: The Aerospace Corporation Press, El Segundo, 2002.—836 p.

15. Small satellites for Earth observation // Digest of the 1st International Symposium of the International Academy of Astronautics (IAA), Berlin, November 4—8, 1996. — Berlin: Walter de Gruyter & Co., 1996.—477 p.
16. Small satellites for Earth observation // Digest of the 2nd International Symposium of the International Academy of Astronautics (IAA), Berlin, April 12—16, 1999. — Berlin: Wissenschaft und Technik Verl., 1999.—426 p.
17. Small satellites for Earth observation // Digest of the 3rd International Symposium of the International Academy of Astronautics (IAA), Berlin, April 2—6, 2001. — Berlin: Wissenschaft und Technik Verl., 1999.—454 p.
18. Small satellites for Earth observation // Digest of the 4th International Symposium of the International Academy of Astronautics (IAA), Berlin, April 7—11, 2003. — Berlin: Wissenschaft und Technik Verl., 2003.—434 p.
19. Spacecraft system engineering / Eds P. Fortescue, J. Stark: 2nd edition. — New York: John Wiley & Sons Ltd, 1995.—600 p.
20. Spacecraft thermal control design data. — European Space Agency, 1989.—(ESA PSS-03-108, Issue 1).
21. Vojta J., Zhuk S., Baturkin V., et al. Thermocontrol system concept of Magion small subsatellites of Interball Mission // Digest of the 1st International Symposium of the International Academy of Astronautics (IAA), Berlin, November 4—8, 1996. — Berlin, 1996.—P. 380—383.

MODERN TENDENCIES IN THERMOCONTROL OF MICROSATELLITES

V. M. Baturkin

A survey of modern tendencies in the development of systems of thermocontrol of microsattelites is given. The characteristics of the main components of the systems are presented.

УДК 629.735

Ван Сяоянь¹, Ю. А. Похил², К. В. Коваль²,
Хе Ши Юй¹, Р. В. Гаврилов²

¹Харбінський політехнічний інститут, КНР

²Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з криогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур Національної академії наук України, Харків

**Расчет напряженно-деформированного состояния
панели солнечной батареи космического аппарата
при термическом нагружении**

Надійшла до редакції 09.04.04

Виведено дві уніфіковані аналітичні методики визначення напружено-деформованого стану панелей сонячних батарей космічних апаратів при термічному навантаженні. Проведено визначення й аналіз напружено-деформованого стану тестової моделі сонячної батареї, порівняння результатів розрахунків з результатами, отриманими методом скінченних елементів. На базі проведеного параметричного дослідження дано рекомендації щодо підбору оптимальної структури панелі.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянным расширением спектра задач, решаемых космическими аппаратами (КА), ужесточением требований к их массе, энергопотреблению и срокам активного существования, весьма актуальна задача совершенствования солнечных батарей (СБ), и в частности оптимизации их структуры для обеспечения минимального уровня напряжений в ней. Конструкция большинства современных СБ представляет собой многослойное клеевое соединение. Данная структура подвержена значительному кратковременному статическому и динамическому механическому нагружению во время выведения КА на орбиту и приведения батареи в рабочее состояние. Определяющим для прочности панели СБ считается механическое нагружение в процессе выведения и раскрытия СБ КА, но не менее важен длительный этап термоциклирования в широком диапазоне температуры при эксплуатации КА на орбите. В зависимости от параметров орбиты данная конструкция может подвергаться периодическому нагреву и охлаждению в интервале от +150 до -100°С, а из-за разности коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР)

склеиваемых слоев в конструкции возникают значительные напряжения, без учета которых невозможно спроектировать оптимальную с точки зрения прочности конструкцию СБ [1, 2]. Для решения поставленной задачи необходим оперативный инженерный анализ структуры батареи. Наиболее подходят для этого аналитические математические модели, основанные на расчетных схемах различного уровня точности.

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПАНЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

На базе двух расчетных схем многослойного клеевого соединения были выведены две унифицированные методики определения напряженно-деформированного состояния (НДС) панели СБ КА при термомеханическом нагружении. В обоих случаях панель СБ представлялась пятислойным клеевым соединением. В первом приближении сотовый наполнитель можно представить в виде приведенной клеевой прослойки. При этом в качестве меха-

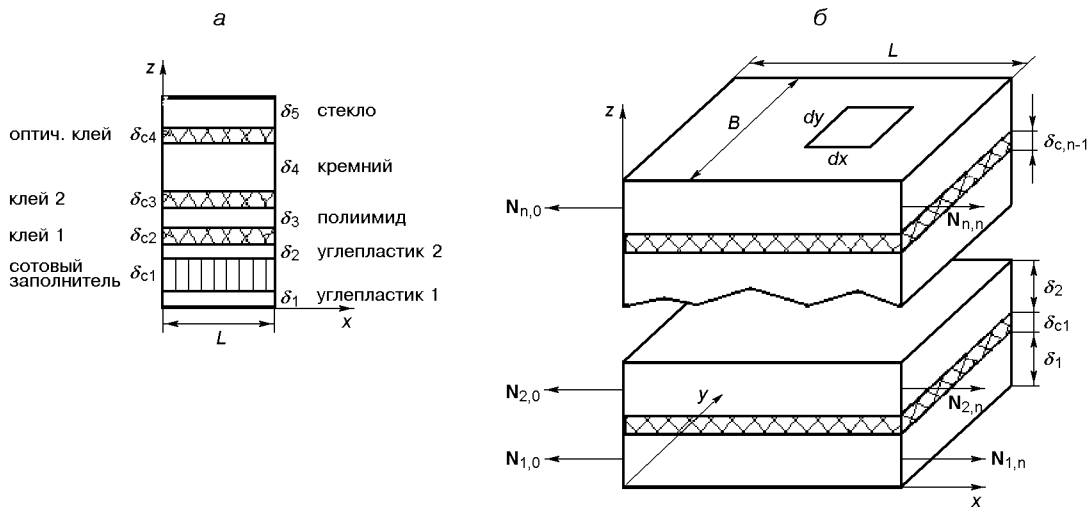


Рис. 1. Структура клеевого соединения солнечной батареи КА, а - структура, б - общий вид

нических характеристик выбираем усредненные между сотовым заполнителем и смежными клеевыми прослойками, соединяющими его с обшивками панели. На рис. 1 показана типичная структура СБ, положенная в основу дальнейших вычислений.

В качестве основы для исследования выбрана одномерная модель соединения, по которой клеевая прослойка работает только на сдвиг вдоль одного направления, геометрические и жесткостные параметры деталей и клеевых слоев постоянны по длине, нормальные напряжения распределены по толщине равномерно, а материалы ортотропны в осях xu [4].

Уравнения равновесия элементов деталей имеют вид

$$\frac{dN_{ix}}{dx} - Q_{(i-1)x} + Q_{ix} = 0, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, n,$$

где N_{ix} и Q_{ix} — нормальные и касательные усилия в соединяемых деталях и клеевых слоях, причем $Q_{0x} = Q_{nx} = 0$. Для рассматриваемого случая $n = 5$.

Уравнения совместности деформаций и физического закона:

$$Y_j = \frac{U_j - U_{j+1}}{\delta_{cj}}, \quad Y_j = \frac{Q_{jx}}{G_{cj}}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ix} = \frac{N_{ix}}{\delta_i E_{ix}} + \alpha_{ix} \Delta T_i,$$

$$j = 1, \dots, n,$$

где α_{ix} — коэффициент линейного температурного расширения.

Деформации определяются соотношениями Коши

$$\varepsilon_{ix} = \frac{dU_i}{dx}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Уравнение равновесия отсеченной части:

$$\sum_{i=1}^n N_{ix} = \sum_{i=1}^n N_{i0} = \sum_{i=1}^n N_{in}. \quad (4)$$

После дифференцирования выражений (2) по x с учетом зависимостей (1) и (3) получаем основную систему дифференциальных уравнений, состоящую из $n - 1$ уравнений:

$$\Pi_{ci} \sum_{j=1}^i \frac{d^2 N_{jx}}{dx^2} + \Pi_{i+1,x} N_{i+1,x} - \Pi_{ix} N_{ix} = a_i, \quad (5)$$

где Π_{ci} и Π_{ix} — податливости клеевых прослоек и соединяемых деталей,

$$a_j = \alpha_{jx} \Delta T_j - \alpha_{j+1,x} \Delta T_{j+1},$$

$$j = 1, \dots, n - 1.$$

Методом последовательного исключения неизвестных из этой системы получаем дифференциальное уравнение относительно усилий в первой детали.

Решив данную систему, находим нормальные усилия в соединяемых деталях:

$$N_{ix} = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{p=1}^n A_p |_{n=1} \cdot k_{ix}^{2p-2} \right) P_{ix} + \left(\sum_{i=1}^{i-1} a_i \sum_{l=1}^n A_{lx} + A_{0x} \Pi_{ix} \right) / \sum_{l=1}^n A_{lx} \Pi_{lx}, \quad (6)$$

$$t = 1, \dots, n,$$

где

$$P_{ix} = C_{2j-1} \operatorname{sh}(k_{ix}x) + C_{2j} \operatorname{ch}(k_{ix}x),$$

k_{ix} — соответствующий корень характеристического уравнения;

$$A_p = (-1)^{p+1} \left(\sum_{i_s=i_{s-1}-1}^{n-(p-1)} \Pi_{ci_s} \right)_{s=1}^{p-1} \cdot \frac{\Pi_{ix}}{\Pi_{nx}} \cdot \prod_{r=0}^{p-2} \left(\sum_{i_{r+1}}^{i_{r-1}} \frac{1}{\Pi_{ix}} \right),$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^{n-1} \left(a_j \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{\Pi_{ix}} \right) + \sum_{i=1}^n N_{i0}, \quad (7)$$

$$p = 1, \dots, n, \quad -i_0 = 0, \quad -i_p = n.$$

Касательные напряжения в клеевых прослойках определяются из уравнений равновесия элементов деталей (1).

$$Q_{ix} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{dN_{ix}}{dx} =$$

$$= \sum_{i=1}^{n-1} k_{ix} \left(\sum_{j=1}^i T_{it} \right) [C_{2j-1} \operatorname{ch}(k_{ix}x) + C_{2j} \operatorname{sh}(k_{ix}x)]. \quad (8)$$

Константы интегрирования C_j находятся из граничных условий:

$$N_{ix} = N_{i0} \quad \text{при } x = x_1$$

и

$$N_{ix} = N_{in} \quad \text{при } x = x_2, i = 1, \dots, n, \quad (9)$$

где $x_1 = 0, x_2 = L$ — это координаты начала и конца соединения.

Система (9) распадается на две и из (6) определяем константы:

$$C_{2i} = P_1|_{x=0},$$

$$C_{2i-1} = \frac{[P_1|_{x=L} + P_1|_{x=0} \cdot \operatorname{ch}(k_i L)]}{\operatorname{sh}(k_i L)}. \quad (10)$$

Для оценки несущей способности необходимы максимальные значения напряжений, которые в клеевом соединении наблюдаются по его краям

$$Q_{i\max} = \sum_{i=1}^{n-1} k_i \left(\sum_{j=1}^i T_{it} \right) C_{2j+1}. \quad (11)$$

Поскольку корни характеристического уравнения результирующего дифференциального уравнения не всегда имеют аналитическое решение, проведено их исследование для всего интервала жесткостных характеристик материалов. Показано, что корни действительные [3]. Это позволило представить решение в аналитическом виде.

Одномерная расчетная схема является наиболее упрощенной, так как она не учитывает влияние ширины соединения на НДС. Лучшим приближением к истинному результату представляется квазидвумерный подход, по которому поперечные напряжения не влияют на продольные, а каждая полоска соединения шириной dx рассматривается изолированно. Тогда, в одном направлении напряжения считаются по изложенной выше одномерной постановке, а для направления y аналогичным образом получим систему уравнений:

$$\Pi_{ci} \sum_{k=1}^i \left(\frac{d^2 N_{ky}}{dy^2} \right) + \Pi_{i+1,y} N_{i+1,y} - \mu_{i+1,xy} \Pi_{i+1,x} N_{i+1,x}$$

$$- \Pi_{iy} N_{iy} - \mu_{ixy} \Pi_{ix} N_{ix} = a_{iy}. \quad (12)$$

Основные соотношения для квазидвумерной модели приведены в работе [5].

Наиболее полно учитывает параметры соединения двумерная расчетная схема. В отличие от квазидвумерной модели, здесь принимаются в расчет оба коэффициента Пуассона. Однако ее решение возможно лишь для некоторых частных случаев, не рассматриваемых в этой работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В качестве иллюстрации применимости рассматриваемой расчетной модели для определения НДС СБ КА проведено определение и анализ НДС модельной структуры СБ производства КНР, а так же сравнение результатов данного расчета с результатами квазидвумерной модели [1] и давно используемого научно-обоснованного численного метода: метода конечных элементов (МКЭ). Структура тестовой модели СБ представлена на рис. 1. Исходные данные для исследования получены в ходе экспериментального определения физико-механических характеристик материалов СБ в эксплуатационном диапазоне температур.

Рассматривались два расчетных случая нагружения СБ: теневой и солнечный участок орбиты. В качестве температуры эксплуатации принимались: -100°C и $+100^\circ \text{C}$ соответственно. Для упрощения анализа не рассматривался случай теплового удара при переходе КА через терминатор, не учитывались процессы теплопроводности, а конструкция считалась равномерно прогретой.

Расчеты показали, что конструкция СБ максимально нагружена на теневом участке орбиты.

Вид распределения нормальных и касательных

напряжений по панели солнечной батареи иллюстрируется рис. 2.

Максимум нормальных напряжений наблюдается в средней части панели. Что касается распределения касательных напряжений, то максимум, полученный по одномерной и квазидвумерной методи-

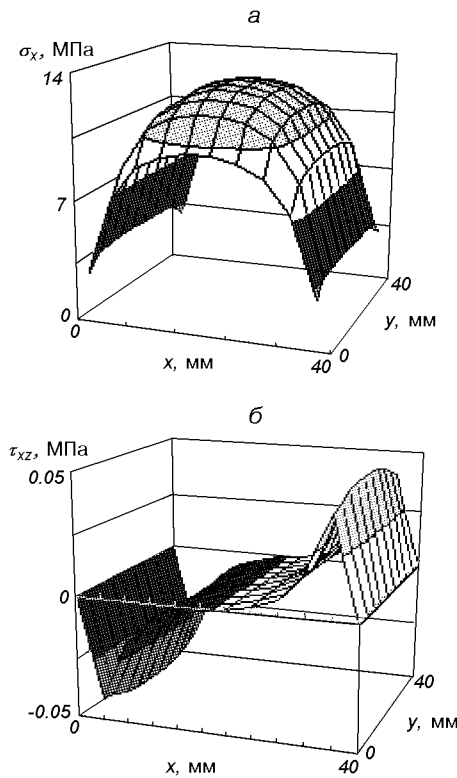


Рис 2. Распределение нормальных (а) и касательных (б) напряжений по панели СБ

кам наблюдается на краю соединения. МКЭ, в отличие от приведенных выше методик, позволяет удовлетворить граничным условиям на краю соединения. Соответственно и максимум находится на расстоянии порядка нескольких толщин слоя от края соединения, однако также в крайней области панели.

Результаты определения экстремальных нормальных напряжений в соединяемых слоях и касательных напряжений в клеевых прослойках проиллюстрированы на рис. 3.

Следует отметить, что нормальные напряжения не определяют прочность клеевого соединения. Связано это с существенно более низкой прочностью клеевых прослоек на сдвиг по сравнению с прочностью соединяемых деталей, и тем не менее они важны для полноты анализа НДС. Видим, что как для одного, так и для другого направления, максимальные напряжения наблюдаются в полиимидном слое и они намного меньше его предела прочности. А значит, разрушение панели СБ от нормальных напряжений если и возможно, то от факторов, не учитываемых в исследуемых методиках. Например от потери устойчивости слоя в момент действия импульсного или динамического механического нагружения при выведении КА на орбиту или в момент раскрытия створок СБ.

Максимальные касательные напряжения наблюдаются в клеевых прослойках, смежных с полиимидным слоем, однако они также намного меньше предела прочности клея на сдвиг. Разрушение конструкции если и возможно, то от сдвига при многоцикловом нагружении. Испытание данной СБ как на термоциклическое нагружение, эквивалентное году нахождения КА на геостационарной орби-

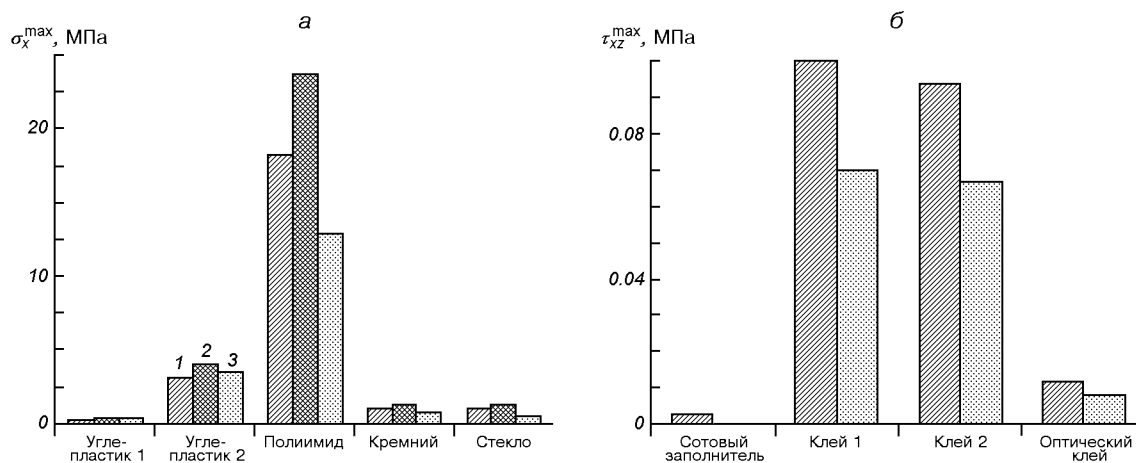


Рис 3. Максимальные значения нормальных σ_x (а) и касательных τ_{xz} (б) напряжений в соединяемых деталях и клеевых прослойках соответственно, полученные по трем рассматриваемым методикам: 1 — одномерная, 2 — двумерная, 3 — МКЭ

те, так и на термоудар, не привело не только к разрушению конструкции панели, но и к заметной деградации ее свойств. Эти факты, а также результаты математического моделирования говорят о высоком эксплуатационном ресурсе конструкции.

Хотелось бы отметить, что разница в значениях напряжений, полученных по исследуемым методикам и МКЭ достаточно велика. Однако, в данном случае, это не существенно, поскольку сравниваются достаточно малые значения напряжений, намного меньше предела прочности, а качественно характер распределения напряжений в конструкции остается тем же, что позволяет проводить оперативный анализ НДС конструкции. Кроме того, подобный факт может также быть связан с погрешностью конечно-элементной модели. В целом можно сделать вывод о применимости рассматриваемых моделей для определения и анализа НДС солнечной батареи.

Результаты расчетов по квазиплоской и одномерной моделям, несмотря на разницу в подходах, дают различные результаты лишь по нормальным напряжениям. Таким образом, для определения и анализа НДС слабонагруженной конструкции СБ КА рационально применять простую одномерную модель.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ БАТАРЕИ НА ЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Одной из основных задач для конструктора сложной техники являются вопросы оптимизации разрабатываемой конструкции, определения ее рациональных параметров. Задача многопараметрической оптимизации является достаточно сложной для существующего на данный момент уровня математического обеспечения, а в некоторых случаях эта проблема не решается математическими методами. Солнечная батарея в полной мере относится к такому классу конструкций, ввиду наличия большого количества физико-механических характеристик входящих в нее материалов и разнообразия геометрических параметров этого соединения. Для проведения процесса оптимального проектирования СБ необходимо предварительно определить степень влияния этих параметров на НДС и выработать ряд рекомендаций по подбору оптимальных параметров и характеристик СБ.

Проведено параметрическое исследование влияния геометрических и жесткостных характеристик материалов, входящих в СБ на ее НДС. В качестве основных геометрических параметров СБ принимаются: линейные размеры панели (ее длина и ширина) и толщины соединяемых слоев и клеевых

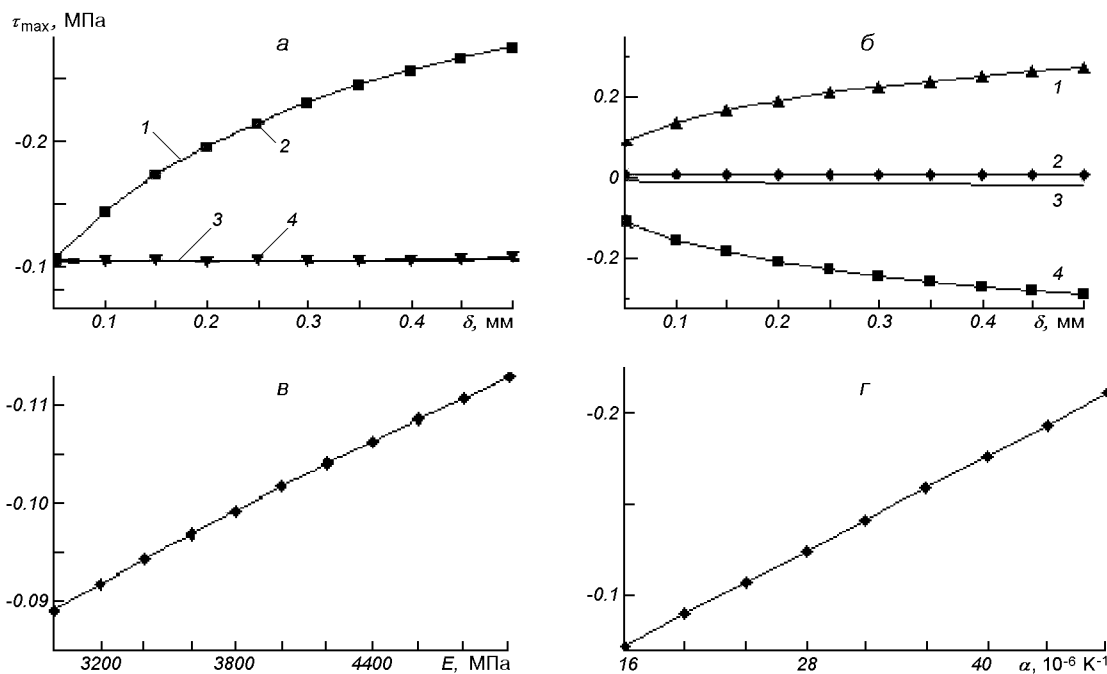


Рис. 4. Зависимости максимальных касательных напряжений τ_{max} СБ: а — от толщины δ углепластика (1), полиимида (2), кремния (3) и стекла (4); б — в каждом слое от толщины δ полиимида (1 — клей 2, 2 — оптический клей, 3 — сотовый наполнитель, 4 — клей 1); в, г — в нижнем клее от модуля упругости E и от коэффициента α термического расширения полиимида

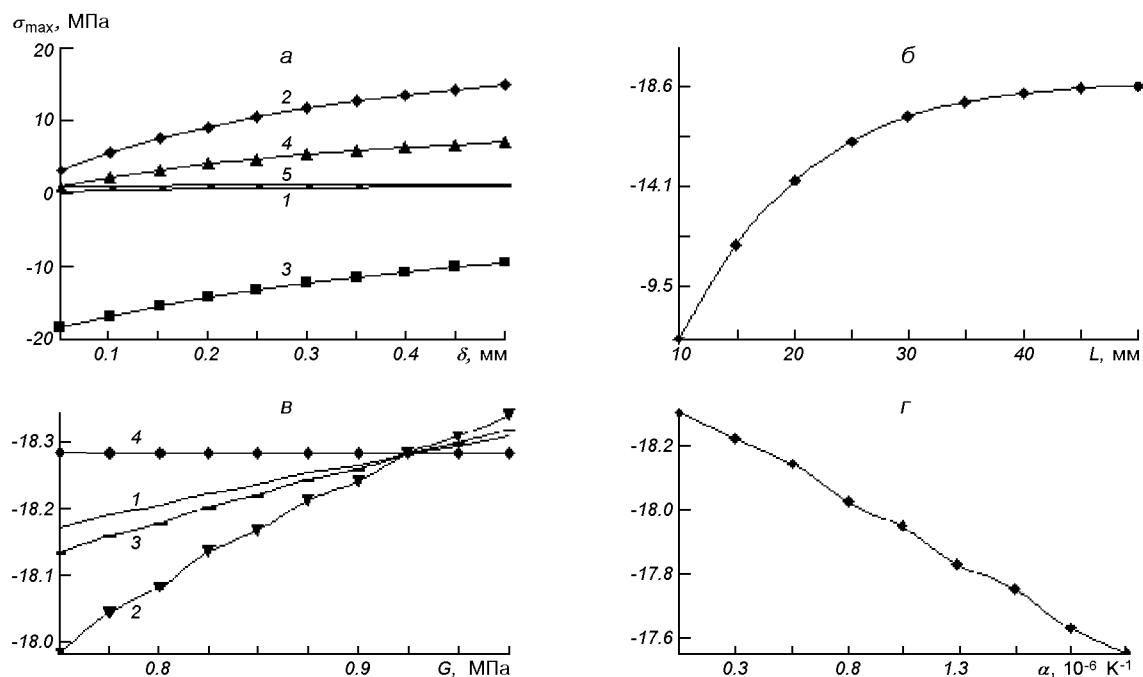


Рис. 5. Зависимости максимальных нормальных напряжений σ_{\max} : а — в каждом слое от толщины δ полиимида (1 — углепластик, 2 — углепластик, 3 — полиимид, 4 — кремний, 5 — стекло); б — от длины L соединения; в — в полиимиде от модуля сдвига G клеев (1 — нижний клей, 2 — нижний и верхний клей, 3 — верхний клей, 4 — оптический клей); г — в полиимиде от коэффициента термического расширения α углепластика

прослойк, а в качестве упругих характеристик: модуль упругости соединяемых деталей E , модуль сдвига клеевых прослойк G , КЛТР α и коэффициент Пуассона μ .

Результаты параметрического исследования показали, что максимальное влияние на сдвиговую прочность СБ оказывают геометрические и жесткостные характеристики полиимидного слоя и двух прилегающих к нему клеевых прослойк (рис. 4). При увеличении толщины полиимида наблюдается существенный рост уровня касательных напряжений. Такая же зависимость наблюдается и для углепластиковой обшивки сотовой панели, составляющей силовую основу батареи. Влияние же толщины кремния и особенно защитного стекла пренебрежимо мало, поэтому параметры этих слоев выбираются из технологических или других соображений (радиационной стойкости, например). Увеличение толщины клеевых прослойк приводит к уменьшению уровня действующих в них касательных напряжений, причем, в какой-то момент (в данном случае при 0.2 мм) максимум касательных напряжений переходит из одной клеевой прослойки в другую (из нижней в верхнюю). То же происхо-

дит и при одновременном изменении толщин соседних клеевых прослойк.

Повлиять на уровень нормальных напряжений в конструкции можно за счет некоторого увеличения толщины полиимидного слоя (до 0.3 мм) (рис. 5, а). Это приведет к некоторому уменьшению нормальных напряжений в нем. Однако это же ведет к увеличению касательных напряжений. Аналогичное влияние оказывает также толщина слоя углепластика, ближайшего к полиимидному слою. При $\delta = 0.3$ мм, происходит переход максимума напряжений из полиимидного слоя в слой углепластика.

При увеличении длины и ширины фотоэлемента, уровень напряжений в конструкции увеличивается асимптотически и после определенной длины практически не меняется (рис. 5, б). Это значение длины определяет область стабилизации напряжений. Для исследуемой батареи данное значение $L_{\text{кр}} = 40$ мм. Именно оно и бралось в качестве базового для исследования прочности батареи.

При увеличении толщины сотового заполнителя напряжения в конструкции уменьшаются, хотя и незначительно. Зависимость нормальных напряжений от толщины клеевых прослойк незначительна.

Существенное влияние на НДС СБ оказывают также упругие характеристики входящих в нее материалов соединяемых деталей клеевых прослоек.

В итоге были даны некоторые рекомендации конструкторам по созданию оптимальных с точки зрения прочности панелей СБ. Так, минимизировать уровень сдвиговых напряжений в клеевых прослойках СБ можно за счет постановки углепластиковых обшивок и полиимидной пленки минимальной толщины и минимально возможной жесткости (рис. 4, в). Уровень нагруженности конструкции от сдвиговых напряжений снижается также при подборе материалов с близкими КЛТР. Для всех деталей наблюдается повышение уровня касательных напряжений в клеевых прослойках с увеличением соответствующего параметра (рис. 4, г), причем наибольшее влияние оказывает КЛТР полиимидного слоя и кремния. Увеличение податливости клеевого слоя приводит к уменьшению уровня его нагруженности. Подобные зависимости наблюдаются и для нормальных напряжений.

Повлиять на геометрические характеристики клеевых прослоек сложно, да и их воздействие на НДС невелико. В то же время, увеличение модуля сдвига и предела прочности на сдвиг клеевых прослоек очень желательно, поскольку это позволит, с одной стороны, снизить уровень напряжений в СБ, а с другой стороны позволит создавать конструкции с большим сроком эксплуатации (рис. 5, в, г).

ВЫВОДЫ

1. На базе модели адгезионного соединения разработаны две унифицированные аналитические методики определения НДС СБ КА при термическом нагружении, основанные на расчетных схемах различного уровня точности.

2. Проведено определение и анализ НДС модельной конструкции СБ. Конструкция СБ максимально нагружена на теновом участке орбиты. Максимальные напряжения наблюдаются в клеевых прослойках, совместных с полиимидным слоем, однако они намного меньше предела прочности клея на сдвиг, что говорит о работоспособности рассматриваемой конструкции. Натурные испытания, проводившиеся в СКТБ ФТИНТ НАНУ подтвердили это. Сравнение с результатами тестового моделирования, проводимого по МКЭ и квазиплоской модели, даст основание сделать вывод о применимости рассматриваемой модели для определения и анализа НДС тонкопленочных структур СБ КА.

3. Максимальное влияние на сдвиговую прочность СБ оказывают геометрические и жесткостные

характеристики полиимидного слоя и двух прилегающих к нему клеевых прослоек. При увеличении толщины полиимида наблюдается существенный рост уровня касательных напряжений. Увеличение же толщины клеевых прослоек приводит к уменьшению уровня действующих в них касательных напряжений. Повлиять на уровень нормальных напряжений в конструкции можно за счет некоторого увеличения толщины полиимидного слоя (до 0,3 мм). Это приведет к некоторому уменьшению нормальных напряжений в нем. Однако это же ведет к увеличению касательных напряжений. Аналогичное влияние оказывает также толщина слоя углепластика, ближайшего к полиимидному слою. При увеличении длины соединения напряжения в СБ асимптотически увеличиваются, стремясь к определенному значению.

4. Минимизировать уровень сдвиговых напряжений в клеевых прослойках СБ можно за счет постановки углепластиковых обшивок и полиимидной пленки минимальной толщины и минимально возможной жесткости. Уровень нагруженности конструкции от сдвиговых напряжений снижается также при подборе материалов с близкими КЛТР.

Повлиять на геометрические характеристики клеевых прослоек тяжело, да и их воздействие на НДС невелико. В то же время, увеличение модуля сдвига и предела прочности клеевых прослоек на сдвиг очень желательно, поскольку это позволит, с одной стороны, снизить уровень напряжений в СБ, а с другой стороны, позволит создавать конструкции с большим сроком эксплуатации.

Надо заметить, что представляет интерес не только оптимизация рассматриваемой конструкции по критерию снижения температурных напряжений, но и по способности конструкции панели выдерживать механическое нагружение, возникающее в процессе эксплуатации КА. Механическое нагружение, как было сказано ранее, возникает при выведении КА на орбиту и при раскрытии панелей СБ. Несмотря на кратковременность данного воздействия, оно во многом определяет дальнейшую работоспособность конструкции. Однако в данной работе механическое нагружение не рассматривается. Подобное исследование представляет интерес в отдельности и может быть проведено при дальнейшем совершенствовании представленных моделей.

1. Безручко К. В., Гайдуков В. Ф., Губин С. В. и др. Солнечные батареи автоматических космических аппаратов. — Харьков: Харьков. авиац. ин-т, 2001.—С. 165—171.
2. Белан Н. В., Безручко К. В., Елисеев В. Б. и др. Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей. Учеб. пособие. — Харьков: Харь-

- ков. авиац. ин-т, 1998.—Ч. 1.—192 с.
3. Карпов Я. С., Коваль К. В. Методика определения напряженно-деформированного состояния многослойных адгезионных соединений // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов.—1999.—Вып. 16 (3).—С. 85—91.
 4. Карпов Я. С., Кривенда С. П., Рябков В. И. Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов. — Харьков: ХАИ, 1997.—200 с.
 5. Коваль К. В. Учет ширины при определении напряженно-деформированного состояния многослойных адгезионных соединений. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов.—2001.—Вып. 27 (4).—С. 106—112.

**CALCULATIONS FOR STRESS-STRAINED STATE
OF A PANEL OF A SOLAR ARRAY UNDER THERMAL
LOADING CONDITIONS**

Wang Xiaoyan, Yu. A. Pokhyl, K. V. Koval',
He Shiyu, R. V. Gavrylov

We developed two unified analytical methods for stress-strained state (SSS) determination of panels of solar arrays of spacecrafts at thermal loading. A determination and an analysis of SSS for solar array testing model are made and the results of the analysis are compared with ones from the finite element method. Some recommendations for panel optimal structure determination are developed on the basis of our parametrical investigation.

УДК 658.5.011.46

Ю. В. Коломзаров, С. Л. Кравченко, В. П. Маслов, В. В. Забудський

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України, Київ

Тепловізійний неруйнівний метод дослідження
прозорих тонкоплівкових нагрівачів

Надійшла до редакції 14.10.04

Представлено результати дослідження розподілу температури по поверхні тонкоплівкових прозорих нагрівачів твіст-нематичних рідкокристалічних екранів за допомогою безконтактного тепловізійного методу.

ВСТУП

У сучасному літакобудуванні та космічній галузі для відображення інформації використовуються рідкокристалічні дисплеї (РКД): твіст-нематичні статичні, пасивно-матричні, активно-матричні та інші, які повинні безвідмовно працювати у жорстких умовах, зокрема при температурах до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6]. При таких низьких температурах рідкокристалічна речовина стає дуже в'язкою, тому для підтримання працездатності РКД потребує підігрівання. Через це конструкція РКД повинна передбачати використання прозорих тонкоплівкових нагрівачів. Контроль якості виготовлення цих нагрівачів полягає в оперативному дослідженні розподілу теплових полів у плівці нагрівача та у РКД, для чого найприйнятнішим видається тепловізійний метод.

Як відомо, тепловізор є безконтактним приладом для вимірювання та реєстрації температурних полів [3]. Він реєструє ІЧ-випромінювання від досліджуваних об'єктів та може визначати їхню температуру або розподіл теплових полів по поверхні об'єкта. Тепловізійні неруйнівні методи контролю композиційних та шаруватих матеріалів, зварних швів та інших елементів конструкції мають цілий ряд переваг у порівнянні з іншими методами [4]: дистанційність (безконтактний метод), висока продуктивність, можливість реєстрації картини розподілу теплових полів. Це особливо важливо для контролю прозорих та багатопарових об'єктів [1].

Наша робота присвячена питанням практичного дослідження та контролю однорідності тонкоплівкових нагрівачів розроблених в Інституті фізики

напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України твіст-нематичних РКД для вітчизняного літакобудування та застосуванню для цього дослідного зразка малогабаритного тепловізора.

КОНСТРУКЦІЯ ТВІСТ-НЕМАТИЧНОГО РІДКОКРИСТАЛІЧНОГО ДИСПЛЕЯ

Деклараційним патентом України на корисну модель [2] була запропонована конструкція твіст-нематичного РКД з додатковим нагрівачем (рис. 1).

Конструктивно твіст-нематичний РКД складається з двох герметично склеєних клеєм 3 прозорих підкладок 1 та 2 з нанесеними прозорими електродами, орієнтуючими шарами та контактними площадками з зовнішніми виводами 8. Простір між скляними підкладками заповнений рідкокристалічною речовиною 4. На фронтальну поверхню, обер-

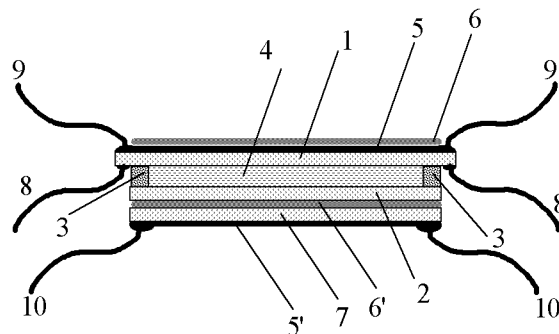


Рис. 1. Конструкція твіст-нематичного рідкокристалічного дисплея з додатковим нагрівачем

нену до спостерігача, наклеєно плівковий поляризатор *b* з антивідблисковим покриттям. На зовнішню поверхню підкладки 2 наклеєно напівпрозорий-напіввідбивний плівковий поляризатор *b'*. Для забезпечення працездатності РКД при низьких температурах використовується нагрівач [7, 8], конструкція якого передбачає надійність, можливість передачі тепла рідкокристалічній речовині якомога швидше та без втрат. Крім того, нагрівач не повинен заважати системі підсвічування та спостерігачу. Аналіз різних конструктивних рішень, викладених у роботі [5], показав, що найефективнішою є конструкція, у якій прозорий тонкоплівковий нагрівач вбудований у середину РКД та має безпосередній тепловий контакт з рідкокристалічною речовиною. Однак така конструкція технологічно дуже складна, тому що потребує використання товстих прозорих електроізоляційних покриттів. Тому прийнятнішою є конструкція, у якій нагрівач створюється вакуумним розпорощенням прозорого струмопровідного шару 5 товщиною 100 нм на фронтальну поверхню скляної підкладки 1. Струмопровідний шар цього нагрівача має високу адгезію до скла, і на нього можна наклеювати плівковий поляризатор. Для рівномірнішого та швидшого нагрівання конструкція РКД передбачає додатковий нагрівач, який складається зі скляної підкладки 7 та напорошеного прозорого струмопровідного шару 5'. Фронтальний та додатковий прозорі нагрівачі мають зовнішні виводи 9 та 10 для прикладання електричної напруги. При температурах вище 0 °С напруга на нагрівачі не подається. Для нижчих температур на нагрівачі подається необхідна електрична потужність та здійснюється нагрівання РКД до температури 0 °С, після чого він готовий до роботи.

Зі зниженням температури без підігрівання час перемикання РКД суттєво збільшується. При температурі – 40 °С та нижче РКД замерзає та перестає відображати інформацію. При нагріванні працездатність екрана відновлюється.

Головним недоліком РКД, виготовлених із традиційних скляних матеріалів, є необхідність їхнього повільного довготривалого нагрівання. При швидкому нагріванні вони руйнуються. Використання склокерамічних прозорих композиційних матеріалів з ультранизьким коефіцієнтом термічного розширення ($-0.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} < \text{КТР} < 0.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) дозволяє суттєво підвищити надійність РКД, збільшити електричну потужність нагрівачів та зменшити час нагрівання РКД при низьких температурах. Прикладом таких матеріалів можуть слугувати склокерамічні композиційні матеріали типу «Zerodur» та «Ceram» виробництва фірми «Шотт»

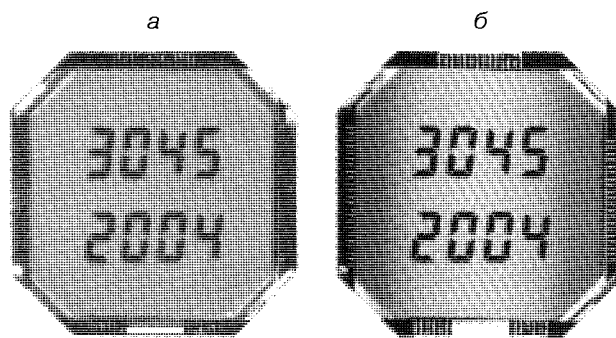


Рис. 2. РКД зі склокерамічних матеріалів: *a* — у режимі на відбивання світла, *b* — у режимі на пропускання світла (підсвічування лампою денного світла)

(Німеччина), або аналогічні з КТР у межах $\alpha = (0 \pm 0.3) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у діапазоні температур від –100 до +500 °С.

Низькі значення КТР у цих матеріалах обумовлені тим, що у порівнянні з відомим оптичним склом склокерамічні матеріали у своєму складі мають мікрокристалічний компонент β -свекрепит, КТР якого має від'ємне значення ($-100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), і тому склокерамічні прозорі композиційні матеріали витримують швидко охолодження чи нагрівання на сотні градусів без механічного руйнування.

Зовнішній вигляд РКД з відображуваною інформацією, виготовлених зі склокерамічних матеріалів, у режимах на відбивання світла та на пропускання світла представлено на рис. 2.

ТЕПЛОВІЗІЙНИЙ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ НАГРІВАЧІВ

Дослідження якості виготовлення тонкоплівкових прозорих нагрівачів провадилися за допомогою дослідного зразка малогабаритного тепловізора, розробленого та створеного в Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України спільно з Фізико-технічним інститутом низьких температур НАН України (Харків). Тепловізор має достатньо високу роздільну здатність по температурі (0.2 К) та високу продуктивність. Його програмне забезпечення дозволяє візуалізувати термограми у реальному масштабі часу, визначати абсолютну та відносну температуру у будь-якій точці, будувати термопрофілі уздовж визначеної ділянки та автоматично визначати максимальну, мінімальну та середню температури.

У першому експерименті до додаткового нагрі-

вача розміром 52×52 мм з напорошеним прозорим струмопровідним шаром була прикладена електрична потужність 1.2 Вт впродовж 10 хв. Після цього були отримані термограми нагрівача з двох протилежних боків: з боку тонкоплівкового покриття (рис. 3, а) та з боку скляної підкладки (рис. 3, б). Отримано також профілі температури вздовж

вертикальної осі (крива 1) та вздовж діагоналі (крива 2). З порівняння термограм можна зробити висновок, що товщина підкладки 1.1 мм є достатньою, щоб суттєво вирівняти температурне поле по поверхні нагрівача. Тому додатковий нагрівач необхідно розташовувати так, щоб він був обернений підкладкою до РКД, як показано на рис. 1.

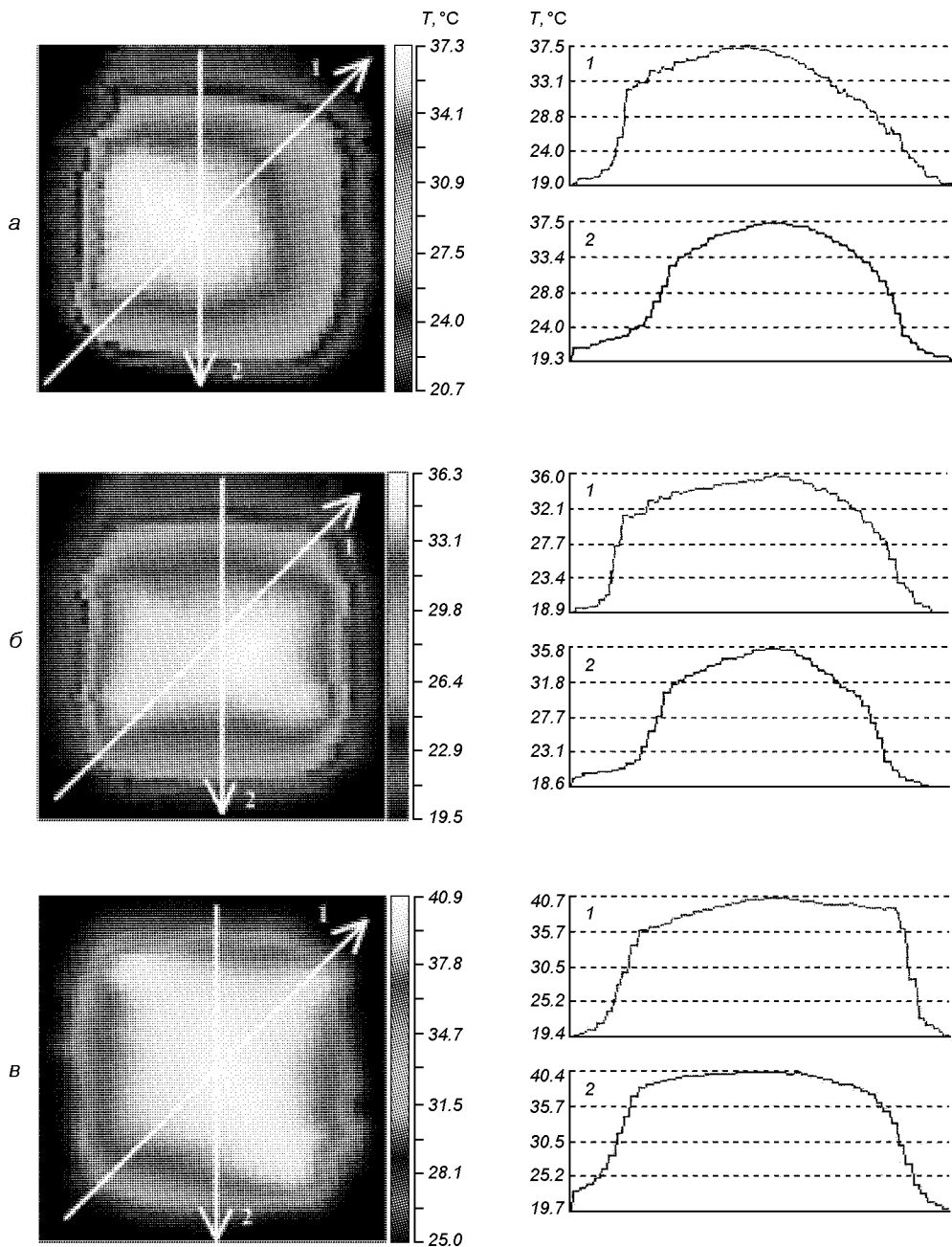


Рис. 3. Термограми та температурні профілі уздовж ліній 1 та 2: а — додаткового нагрівача з боку тонкоплівкового покриття, б — додаткового нагрівача з боку скляної підкладки, в — рідкокристалічного екрана з боку тонкоплівкового покриття

У другому експерименті досліджувалось температурне поле рідкокристалічного екрана розміром 58×58 мм зі сторони тонкоплівкового нагрівача (див. рис. 2) з напиленим прозорим струмопровідним шаром, до якого була прикладена електрична потужність 2 Вт впродовж 4 хв. З аналізу отриманої термограми (рис. 3, в) можна зробити висновок, що нагрівач у зоні спостереження інформації (коло радіусом 25 мм у центрі РКД) нагрітий досить рівномірно (від 36 до 40 °С). Враховуючи те, що вимірювання проводились на відкритому повітрі при кімнатній температурі (тобто йшло ефективне конвекційне охолодження зразка РКД), можна з великим ступенем імовірності стверджувати, що РКД, поміщений у корпус, буде прогріватися ще рівномірніше та швидше. На жаль, отримати термограми РКД у корпусі неможливо, оскільки його конструкція передбачає наявність зовнішнього захисного скла, яке є непрозорим у досліджуваному діапазоні довжин хвиль.

ВИСНОВКИ

1. Експеримент показав, що додатковий нагрівач досліджуваного рідкокристалічного дисплея у зоні спостереження інформації (коло радіусом 25 мм у центрі РКД) нагрівається досить рівномірно. Це значить, що товщини підкладки 1.1 мм достатньо, щоб суттєво вирівняти температурне поле по поверхні нагрівача. Тому додатковий нагрівач необхідно розташовувати так, щоб він був обернений підкладкою до РКД.

2. Результати проведених досліджень свідчать, що тепловізор може ефективно застосовуватися для експресного неруйнівного контролю рівномірності нагрівання РКД тонкоплівковими прозорими нагрівачами. Тепловізор також може виявитися дуже ефективним засобом для контролю якості та однорідності композиційних та шаруватих матеріалів, зварних швів та інших конструктивних елементів. Крім того, унікальні можливості тепловізора дозволяють широко застосувати його у всіх галузях

народного господарства, де потрібний оперативний безконтактний контроль: будівництві, медицині, зондуванні земної поверхні тощо.

Роботи зі створення дослідних зразків РКД та тепловізійні дослідження були проведені у рамках виконання проекту № 3045 за сприяння Українського науково-технологічного центру.

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с фран. — М.: Мир, 1988.—416 с.
2. Декларацийний патент України № 4517 на корисну модель. Рідкокристалічний дисплей / Ю. В. Коломзаров, В. П. Маслов, Ю. Г. Толстих, Ю. Я. Циркунов. — Опубл. 17.01.05, Бюл. № 1.
3. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1983.—237 с.
4. Стороженко В. А., Вавилов В. П., Волчек А. Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. — Киев: Техніка, 1988.—189 с.
5. Comparison of Thin-film and Wire-element Heaters for Transparent Applications. Application Aid \#30, Minco, 07.31.2001 (Minco Products, Inc. Main Office). 7300 Commerce Lane Minneapolis, MN 55432-3177 U.S.A. (www.minco.com).
6. Kalluri R. Sarma AMLCD Manufacturing for Avionics Application // Inform. Display.—2001.—17, N 8.—P. 14.
7. Pat. N US2002/0089638 A1 USA. ITO heater / K. P. Ho, Richard C. H. Lee, Y. L. Law, C. C. Leung. — Publ. 11.07.02.
8. Pat. N US2004/0036834 A1 USA. Liquid crystal display device, image shifting device, and image display apparatus / Noriaki Ohnishi, Yasuhiro Kume. — Publ. 26.02.04.

THERMAL IMAGING NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR INVESTIGATIONS OF TRANSPARENT THIN FILM HEATERS

Y. V. Kolomzarov, S. L. Kravchenko, V. P. Maslov,
V. V. Zabudsky

In present-day industry more and more problems on quality testing are solved by thermal imaging method. Modern thermal imagers can not only measure object temperature but also convert it to picture that represents thermal field distribution along the investigated object surface. There are great benefits, especially in the case of transparent thin film heaters quality testing. In this paper some results of temperature distribution investigations by thermal imaging method are discussed. This non-destructive remote testing method is characterized by satisfactory temperature resolution (0.2 K), high productivity and possibility to store and compare obtained results in easy for perception form. The suitability of this method is shown on the example of TN LCDs heater testing.

УДК 547.454+581.1.083; 576.6.043

В. В. Сарнацька, Г. О. Гладун, С. Ф. Падалко

Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Київ

Трансформація рослинних клітин за допомогою *Agrobacterium tumefaciens* в умовах клиноостатування

Надійшла до редакції 11.07.05

Подано результати дослідження впливу мікрогравітації (клиноостатування) на ефективність трансформації рослинних клітин під впливом *Agrobacterium tumefaciens* з використанням моделі індукції корончатогазових пухлин на експлантах запасальних органів рослин в умовах *in vitro*. Обговорюється можливість використання умов мікрогравітації для підвищення ефективності трансформації клітин за допомогою *Agrobacterium tumefaciens* у генно-інженерних дослідженнях.

ВСТУП

Мікрогравітація, як і інші стресові агенти, виявляє значний вплив на процеси росту та метаболізму живих організмів, зокрема рослин. Сучасна космічна ботаніка включає не тільки дослідження функціонування автотрофної ланки в контрольованих системах життєзабезпечення в умовах космічного польоту і розробку нових технологій вирощування рослин у космосі [8], але й використання умов невагомості як фактору впливу на біомолекулярні процеси генної інженерії з метою їхньої оптимізації, зокрема для підвищення ефективності трансформації клітин і переносу генів [7]. Феномен трансформації рослинної клітини за допомогою *Agrobacterium tumefaciens*, утворення корончатогазових пухлин, і зокрема відтворення цього процесу в умовах *in vitro*, широко використовується для дослідження фундаментальних проблем сучасної біологічної науки: для дослідження взаємодії рослинної клітини з патогеном, для вивчення початкових етапів канцерогенезу і первинного скринінгу протипухлинних препаратів [4], оскільки корончатогазові пухлини є найпростішою моделлю злоякісного росту. В останній час трансформація рослинних клітин за допомогою *A. tumefaciens* інтенсивно використовується для створення трансгенних рослин, оскільки для переносу нової генетичної інформації в рослинну клітину використовують переважно Ті-плазмід агробактерій [2]. Для багатьох видів рослин розроблено ефективні методи пере-

носу генів в геном рослинних клітин. Регенерація таких модифікованих клітин дає змогу отримати трансгенні рослини з новими ознаками. Однак для багатьох видів рослин істотні обмеження відносно регенерації і переносу генів, тому рутинна техніка генної модифікації не може бути застосована для багатьох важливих культур, у першу чергу злакових [12]. Необхідними умовами ефективною трансформації рослинних клітин є не тільки наявність вірулентного штаму агробактерії але й певний фізіологічний стан рослинних клітин у період активації ділення, яке настає після поранення. Для дослідження фізіологічного стану клітин у момент найбільшої готовності до включення Ті-плазмиди ми вперше використали культуру первинних експлантів запасальних органів рослин — бульб топінамбуру і картоплі, клітини яких в умовах *in vitro* починають ділитися синхронно протягом перших двох циклів [4]. Нами встановлено, що трансформація рослинної клітини пов'язана з дією агробактерії на клітини в G_1 -фазі клітинного циклу. Підвищення ступеня синхронності ділень приводить до збільшення кількості трансформованих клітин. Так, нами встановлено, що при введенні до складу середовища комплексу фітогормонів (нафтилоцтової і абсцизової кислот у концентрації 1 і 2 мг/л відповідно) який на 50—60 % збільшує популяцію клітин, що вступають в 1-й клітинний цикл, різко підвищується інтенсивність пухлиноутворення [4]. Короткочасна дія низьких позитивних температур на експланти топінамбуру також виявляє синх-

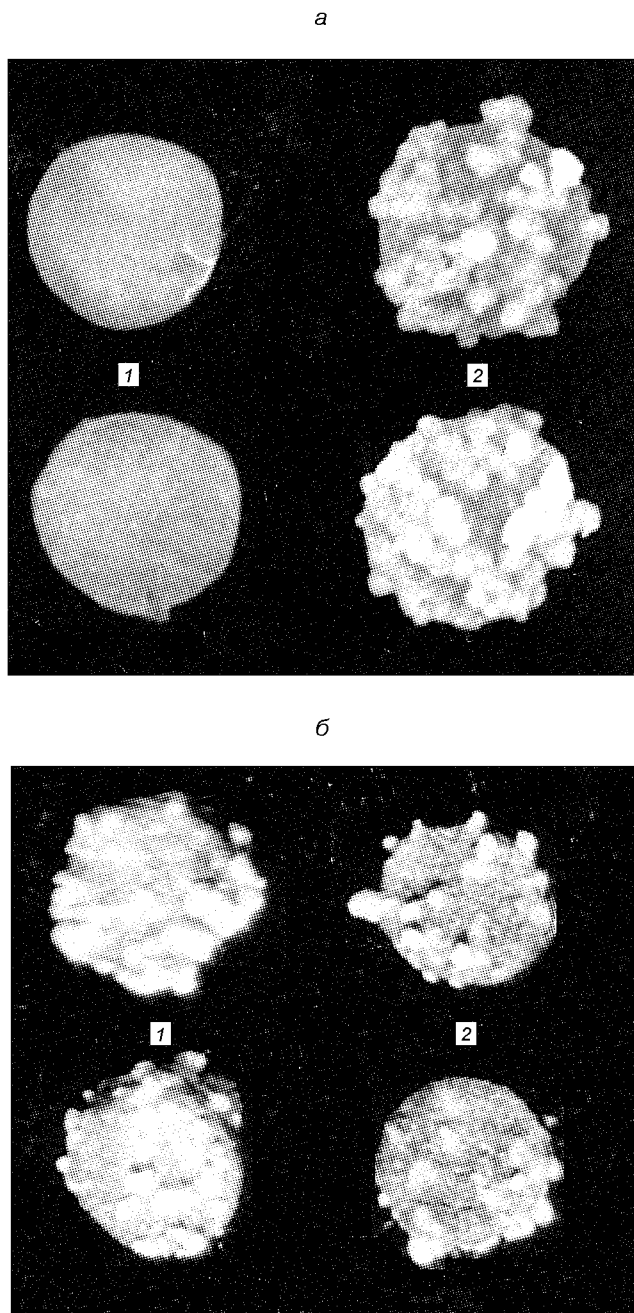


Рис. 1. Утворення корончостогогалових пухлин на експлантах картоплі: *а* — експлант картоплі, контроль (1), інокуляція експлантів культурою *Agrobacterium tumefaciens* (2); *б* — в стаціонарних умовах (1), клиностакування експлантів (2)

ронізуючий вплив на проходження клітинного циклу, збільшує пул клітин у фазі найбільшої чутливості до трансформуючого агента і призводить до збільшення кількості трансформованих клітин та інтенсивного утворення пухлин. Все це свідчить

про те, що значною мірою ефективність трансформації залежить також від умов навколишнього середовища. Оскільки мікрогравітація як стресовий агент виявляє значний вплив на процеси ділення клітин [5, 9, 11], безперечно можна очікувати змін у процесах індукції і розвитку корончостогогалових пухлин в умовах зміненої сили тяжіння. Відомі поодинокі повідомлення про зміни росту і метаболізму культур тканин корончостогогалових пухлин в умовах космічного польоту [3], але немає досліджень впливу мікрогравітації на процеси індукції пухлин. Дослідження впливу мікрогравітації на індукцію і розвиток пухлин корончастих галів під впливом *A. tumefaciens* дозволить отримати інформацію відносно дії зміненої сили тяжіння на молекулярні процеси клітин у період найбільшої чутливості до трансформуючого агента та на особливості трансформації клітини в цих умовах. Висловлювалось припущення, що в умовах зміненої сили тяжіння можна чекати активнішого переносу генів, оскільки встановлено, що в умовах космічного польоту в оболонках рослинних клітин зменшується вміст лігніну, і ці умови можна використати для полегшення переносу генів у видах, які не піддаються трансформації [7]. У зв'язку з цим ми досліджували вплив мікрогравітації (клиностакування) на трансформацію за допомогою *A. tumefaciens* клітин первинних експлантів запасальних органів рослин — бульб картоплі і топінамбуру в умовах культури *in vitro*. Оскільки трансформація рослинних клітин відбувається в період активації метаболізму при індукції проліферації клітин при пораненні, об'єктом дослідження була активація хроматину і ферментів транскрипції-РНК-полімерази I і II в період найбільшої чутливості до агробактерій в умовах клиностакування.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ми використовували як об'єкт дослідження культуру *in vitro* первинних експлантів бульб картоплі і топінамбуру, на яких легко утворюються корончостогогалові пухлини при інокуляції експлантів культурою *A. tumefaciens* [4], (рис. 1). В досліді з експлантами картоплі визначали середню кількість пухлин на експлант, в досліді з експлантами топінамбуру визначали вагу зрізаних пухлин і кількість клітин на одиницю ваги експланта і на один експлант. Всі досліді проводили з експлантами рослин одного генотипу. Для дослідів з експлантами картоплі використовували бульби сорту Чарівниця; в досліді з експлантами топінамбуру використовували бульби сорту Білий ранній. Для

визначення інтенсивності розвитку пухлин на експлантах картоплі підраховували кількість (долю) експлантів із інтенсивним, середнім та слабким розвитком пухлин. Вичленені у стерильних умовах експланти картоплі переносили для культивування в чашки Петрі з 0.7 % агару («голодний агар»). Експланти бульб топінамбуру культивували на агаризованому поживному середовищі Уайта, доповненому сумішшю вітамінів по Уайту, 0.3 мг/л індолилоцтової кислоти, 4 % цукрози і 0.7 % агару. Для експлантів картоплі враховували умови фізіологічної полярності, і тому клали їх на поверхню агаризованого середовища апікальною поверхнею. Циліндри тканини бульб топінамбуру, з яких отримували експланти, видокремлювали перпендикулярно до поздовжньої осі бульб. У варіантах з індукцією пухлинної трансформації експланти інокулювали 72-годинною культурою *Agrobacterium tumefaciens*, причому експланти картоплі інокулювали одразу після перенесення експлантів в умови культури, а топінамбуру — через 4 год після початку культивування, оскільки саме в ці періоди індукції проліферації *in vitro* клітини були найчутливіші до трансформуючого агента — агробактерії [4]. В даному дослідженні вивчалась дія мікрогравітації, яка створювалась при клиностагуванні експлантів на горизонтальному клиностаті із швидкістю обертання 2 об/хв на відстані приблизно 50 см від осі. Тривалість експериментів складала 21 добу. Для перевірки статистичних гіпотез використовувався критерій Пірсона (χ^2).

Для визначення матричної доступності хроматину ядра та активності РНК-полімерази з експлантів топінамбуру виділяли ядра, використовуючи охоложене середовище такого складу: 0.01M тріс-НCl, рН 7.6; 1.14 M цукрози, 0.005M MgCl₂, 0.005M β -меркаптостанолу. Для визначення інтенсивності зв'язування ядрами акридиноранжу (АО) ядра фіксували протягом 2 год при температурі $t = 4^\circ\text{C}$ в суміші етанолу та ацетону (1:1), відмивали від

фіксуючої суміші розчином АО в концентрації 10^{-5} M у фосфатно-цитратному буфері рН 4.1, після чого ядра фарбували у новій порції того ж розчину протягом 30 хв. Інтенсивність флуоресценції ядер вимірювали на мікрофлуориметрі при довжині хвилі збудження $\lambda = 400\text{--}420$ нм, інтенсивність флуоресценції ядер реєстрували при $\lambda = 530$ нм. РНК-полімеразна активність визначалась в середовищі з нуклеозид-фосфатами, з яких один був міченим. До складу інкубаційного середовища загальним об'ємом 0.250 мл входили такі компоненти: 50mM тріс-НCl, рН 8, по 0.3 mM ГТФ, ЦТФ, АТФ та 2 мікроюрі ³H-УТФ (питома активність $4.48 \cdot 10^{11}$ Бк/мМ), 0.2 mM β -меркаптоетанолу. До середовища з низькою іонною силою для роботи каріоплазматичної РНК-полімерази I хроматину вносили 10 mM MgCl₂, а до середовища з високою іонною силою для роботи каріоплазматичної РНК-полімерази II вносили 10 mM MgCl₂ та 250 mM (NH₄) SO₄. Крім того, РНК-полімеразу II тестували додаванням в середовище інкубації ядер 10 мкг/мл α -аманітину. В кожену пробу вносили такий об'єм суспензії ядер, що містив 20—30 мкг ДНК. Після інкубації 25 хв при $t = 30^\circ\text{C}$ проби осаджували трихлороцтовою кислотою з пірофосфатом натрію, промивали цим же розчином і спиртом. Осади ядер із включеною міткою переносили у флакони із сцинтиляційною рідиною і вимірювали радіоактивність проб за допомогою сцинтиляційного лічильника.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

У дослідях з культурами первинних експлантів бульб картоплі і топінамбуру (табл. 1 і 2) клиностагування експлантів призводило до значного зменшення утворення пухлин корончастих галів і до пригнічення їхнього росту. Найбільше пригнічення пухлиноутворення було у випадку, коли

Таблиця 1. Вплив клиностагування експлантів бульб картоплі на інтенсивність утворення корончастогалових пухлин під впливом *A. tumefaciens*

| Варіанти | Середня кількість пухлин на 1 експлант | Доля від контролю, % | χ^2 | Доля експлантів з різним розвитком пухлин, % | | | |
|------------------------------|--|----------------------|----------|--|-------------------|------------------|------------------|
| | | | | Інтенсивний розвиток | Середній розвиток | Слабкий розвиток | Пухлини відсутні |
| Дослід I | | | | | | | |
| Контроль (стаціонарні умови) | 32.26 | 100 | | 68 | 32 | 0 | 0 |
| Клиностагування експлантів | 27.36 | 78 | 11.2 | 29 | 71 | 0 | 0 |
| Дослід II | | | | | | | |
| Контроль (стаціонарні умови) | 17.02 | 100 | | 0 | 98 | 2 | 0 |
| Клиностагування експлантів | 10.06 | 62 | 28.8 | 0 | 42 | 58 | 0 |

Таблиця 2. Вплив клинонстатування на інтенсивність утворення корончатогалових пухлин на експлантах топінамбуру

| Варіанти | Вага експланта, г | | Вага пухлин, г | | Кількість клітин в 1 г тканини, 10 ⁵ | | Кількість клітин в 1 експланті, 10 ⁵ | |
|--------------------------------------|-------------------|---------|----------------|---------|---|---------|---|---------|
| | | | | | | | | |
| Нормальна тканина, стаціонарні умови | 0.523±0.034 | (100 %) | | | 54.67±1.980 | (100 %) | 28.60 | (100 %) |
| Нормальна тканина, клинонстатування | 0.394±0.0115 | (75 %) | | | 28.06±0.728 | (51 %) | 11.06 | (39 %) |
| Пухлинна тканина, стаціонарні умови | 0.634±0.020 | (100 %) | 0.140±0.021 | (100 %) | 63.96±1.932 | (100 %) | 40.55 | (100 %) |
| Пухлинна тканина, клинонстатування | 0.416±0.0256 | (66 %) | 0.031±0.007 | (22 %) | 41.63±0.333 | (65 %) | 17.33 | (25 %) |

Таблиця 3. Вплив тривалого клинонстатування бульб картоплі, що знаходяться в спокої, на утворення корончатогалових пухлин на виділених із них експлантах

| Варіанти | Середня кількість пухлин на 1 експлант | Доля від контролю, % | χ^2 | Доля експлантів з різним розвитком пухлин, % | | | |
|----------------------------------|--|----------------------|----------|--|-------------------|------------------|------------------|
| | | | | Інтенсивний розвиток | Середній розвиток | Слабкий розвиток | Пухлини відсутні |
| Дослід I | | | | | | | |
| Контроль (стаціонарні умови) | 15.5 | 100 | | 0 | 85 | 15 | 0 |
| 3-добове клинонстатування бульб | 12.5 | 80 | 17.08 | 0 | 40 | 53 | 0 |
| 5-добове клинонстатування бульб | 11.11 | 73 | 11.2 | 0 | 52 | 39 | 0 |
| Дослід II | | | | | | | |
| Бульби в стаціонарних умовах | 17.03 | 100 | | 0 | 98 | 2 | 0 |
| 19-добове клинонстатування бульб | 4.33 | 25 | 38.7 | 0 | 12 | 38 | 50 |

клинонстатування експлантів починалося одразу після початку їхнього культивування *in vitro* та інокуляції агробактерією. Інтенсивність пухлиноутворення на контрольних експлантах змінювалась від часу (сезону) проведення дослідів (від 15 до 36 пухлин на експлант). У різних дослідах змінювалась також інтенсивність пригнічення пухлиноутворення, але у всіх дослідах отримана емпірично χ^2 -статистика Пірсона значно вища за теоретичну, що свідчить про достовірну різницю між контрольним і дослідним варіантами. У всіх випадках на клинонстатованих експлантах спостерігалось пригнічення розвитку пухлин — зменшувалась доля експлантів з інтенсивним розвитком пухлин і збільшувалась доля експлантів із слабким розвитком пухлин.

В дослідях з експлантами топінамбуру вивчався вплив клинонстатування на ріст нормальних тканин (нормальна дедиференціація в умовах *in vitro*), на ріст експлантів і розвиток пухлин на них після інокуляції їх агробактерією. При клинонстатуванні експлантів топінамбуру зменшувалась їхня середня вага. Пригнічення росту експлантів відбувалось швидше за рахунок пригнічення ділення клітин, ніж за рахунок їхнього розтягнення, оскільки в умовах зміненої сили тяжіння різко зменшується

число клітин на одиницю ваги тканин. Набагато більш виражене зменшення кількості клітин, ніж зменшення ваги експланта свідчить про пригнічення мітотичної активності і стимуляцію розтягнення клітин в умовах мікрогравітації. Таке явище було відмічено в численних експериментах [6]. Клинонстатування пригнічувало ріст як нормальних експлантів топінамбуру, так і експлантів з індукованим пухлинним ростом. При клинонстатуванні інокульованих агробактерією експлантів вага пухлинної тканини, що росла на поверхні експлантів, різко зменшувалась. Відомо, що проліферуючі активно метаболізуючі рослинні клітини та тканини найчутливіші до мікрогравітаційного стресу. Але відомо також, що і органи рослин, що перебувають у стані спокою (насіння, бульби) чутливі до змін гравітації. Так, в цих об'єктах спостерігали збільшення хромосомних аберацій після завершення польоту в космосі і повернення на Землю [10, 11]. В зв'язку з цим ми вивчали вплив мікрогравітації, створюваної під час клинонстатування, на ефективність трансформації клітин експлантів, виділених із клинонстатованих бульб картоплі і топінамбуру. Контрольні бульби знаходились в умовах нормальної гравітації. Результати, представлені в табл. 3, свідчать, що клинонстатування бульб кар-

Таблиця 4. Вплив однодобового клиностакування бульб картоплі, що перебували у спокої, на утворення корончатогалових пухлин на виділених із них експлантах

| Варіанти | Середня кількість пухлин на 1 експлант | Доля від контролю, % | χ^2 | Доля експлантів з різним розвитком пухлин, % | | | |
|--|--|----------------------|----------|--|-------------------|------------------|------------------|
| | | | | Інтенсивний розвиток | Середній розвиток | Слабкий розвиток | Пухлини відсутні |
| Контроль (стаціонарні умови) | 16.92 | 100 | | 4 | 92 | 4 | 0 |
| Клиностакування експлантів бульб, що знаходилися в стаціонарних умовах | 11.43 | 68 | 25.5 | 0 | 52 | 48 | 0 |
| Однодобове клиностакування бульб, експланти в стаціонарних умовах | 27.98 | 165 | 19.0 | 38 | 52 | 10 | 0 |
| Однодобове клиностакування бульб, клиностакування експлантів | 18.75 | 111 | 20.1 | 20 | 50 | 30 | 0 |

топлі протягом 3, 5, або 19 діб викликають значне пригнічення пухлиноутворення на виділених із них і культивованих *in vitro* експлантах. Однак, нами встановлено, що при клиностакуванні бульб протягом 1 доби перед виділенням із них експлантів (табл. 4) і подальшому їхньому культивуванні в умовах звичайного земного тяжіння спостерігається підвищення інтенсивності трансформації клітин під впливом *A. tumefaciens*, про що свідчить збільшення кількості пухлин на експлант і підвищення інтенсивності їхнього розвитку. У випадку подальшого клиностакування експлантів, виділених із клиностакованих одну добу бульб, спостерігалось зниження ефекту стимуляції трансформації.

Використання культури *in vitro* первинних експлантів запасальних органів рослин, зокрема бульб топінамбуру із синхронним переходом клітин із стану спокою у перший клітинний цикл, дозволило нам не тільки визначити період найбільшої чутливості до агробактерії, але й визначити його місце в клітинному циклі, а саме у певному періоді G_1 -фази, як це відбувається при пухлинній трансформації тваринних клітин. Визначення періоду найбільшої чутливості до трансформації клітин на перших етапах індукції проліферації *in vitro* дозволило нам дослідити особливості метаболізму клітин в цей період. Встановлено, що найбільш ранні події при переході диференційованої тканини із стану спокою до проліферації — ранній синтез білка (або білків), зміни структурно-функціонального стану хроматину, зміни активності ферментів транскрипції РНК-полімераз I та II — необхідні також і для пухлинної трансформації. Відомо, що перехід клітин із стану спокою до синтезу ДНК і проліферації супроводжується індукцією генної активності. Нами було встановлено, що період найбільшої чутливості до агробактерії експлантів топінамбуру — 4-та година культивування *in vitro* — збігається з піком збільшення інтенсивності зв'язування хроматину з лігандами — АО і актиноміцином Д. [4]. Є

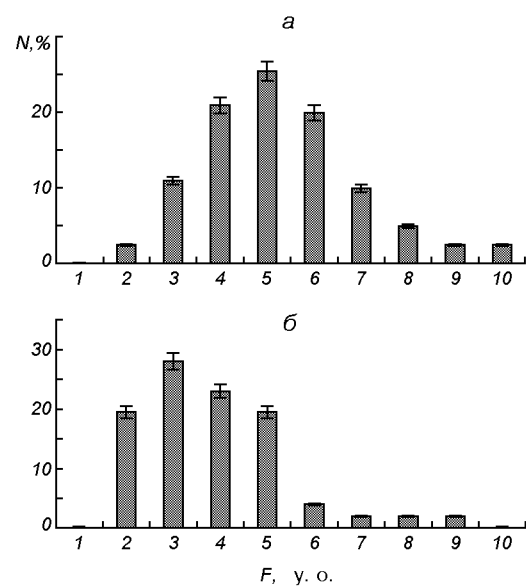


Рис. 2. Вплив клиностакування на інтенсивність зв'язування акридиноранжу клітинами експлантів топінамбуру. F — інтенсивність флуоресценції (умовні одиниці); a — 4-та година культивування *in vitro*, стаціонарні умови; b — 4-та година культивування *in vitro*, клиностакування (N — доля клітин)

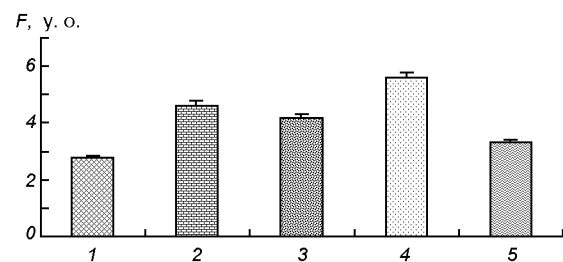


Рис. 3. Вплив клиностакування на зв'язування акридиноранжу (АО) ядрами топінамбуру: 1 — вихідна тканина бульб топінамбуру; 2 — 4-та година культивування експлантів *in vitro*; 3 — клиностакування культивованих *in vitro* експлантів протягом 4 год; 4 — однодобове клиностакування бульб; 5 — 4-та година культивування експлантів, виділених із клиностакованих одну добу бульб

Таблиця 5. Активність РНК-полімераз ізольованих ядер бульб та експлантів топінамбуру

| Варіанти досліджу | Активність двох форм РНК-полімераз, імп./хв на 100 мкг ДНК | | | |
|---|--|---------------|-------------------|---------------|
| | РНК-полімераза I | % до контролю | РНК-полімераза II | % до контролю |
| Контроль, бульби в стаціонарних умовах | 1322 | 100 | 780 | 100 |
| Однодобове кліностакування бульб | 1666 | 126 | 1052 | 134 |
| Контрольні експланти, 4 год росту <i>in vitro</i> | 1000 | 100 | 200 | 100 |
| Кліностазовані 4 години експланти | 940 | 94 | 160 | 90 |

відомості про те, що при кліностауванні або в умовах космічного польоту спостерігається збільшення кількості конденсованого хроматину, що може бути ознакою зниження його функціональної активності, зменшення його доступності до ендогенних РНК-полімераз [1, 5, 9]. В наших дослідах, при дослідженні впливу зміненої сили тяжіння на стан хроматину в ядрах топінамбуру було встановлено, що кліностакування експлантів протягом 4 год культивування значно пригнічує здатність ядер до зв'язування АО (рис. 2, 3), і в період найбільшої чутливості до агробактерії переважають клітини з низькими значеннями інтенсивності флуоресценції.

Подібне явище спостерігалось при дослідженні дії кліностакування на конформаційний стан хроматину при проростанні насіння гороху [1]. В той час, як уже через 3 год після індукції проростання відбувалось підвищення зв'язування АО, у кліностазованому варіанті упродовж 6 год проростання інтенсивність флуоресценції ядер не збільшувалась, а навіть зменшувалась. На цій основі було зроблено висновок, що в умовах кліностакування відбувається затримка процесу ранньої деконденсації хроматину. Зменшення доступності хроматину в ядрах експлантів у період найбільшої чутливості до агробактерії може бути перешкодою до інсерції Ті-плазмиди і трансформації клітин. Так, ми спостерігали різке зниження інтенсивності зв'язування хроматину з іншим лігандом — ³Н-актиноміцином Д при витримуванні експлантів в умовах підвищеної температури (33° С), коли не відбувається трансформація, а також при застосуванні протипухлинного препарату нітрофурилу, який майже повністю пригнічує пухлиноутворення на експлантах [4]. Як свідчать наші дані, короткочасне (протягом однієї доби) кліностакування бульб, що знаходяться в стані спокою, викликає значне зростання зв'язування хроматину з АО (рис. 3) і активності ферментів транскрипції — РНК-полімераз I і II (табл. 5).

Таке підвищення функціональної активності хроматину під впливом короткого однодобового кліностакування бульб може бути причиною більш ін-

тенсивної трансформації клітин експлантів, виділених із цих бульб. Різке зниження ефективності трансформації клітин кліностазованих експлантів обумовлено істотними порушеннями метаболізму, зокрема змінами метаболічних процесів ядер клітин, що знаходяться на початкових етапах індукції проліферації, в період найбільшої чутливості до трансформуючого агента. Як свідчать наші дані, короткочасне (протягом однієї доби) витримання органів рослин, що знаходяться в спокої, в умовах мікрогравітаційного стресу, викликає деконденсацію хроматину і активацію ферментів транскрипції, а це, в свою чергу, може створювати умови для ефективнішої трансформації. Для тканин, що перебувають в стані спокою, характерна репресія геному і обмежена доступність матриці. Явище активації геному тканин, що знаходяться в стані спокою, після короткочасного кліностакування заслуговує більш детального вивчення з використанням видів рослин, стійких до трансформації. Отримані нами результати вказують на можливість використання цього феномену для отримання або підвищення ефективності трансформації у рослин, які у природних умовах не піддаються трансформації, що є перешкодою для використання модифікованих Ті-плазмид для переносу генів і отримання трансгенних рослин.

Роботу виконано за підтримки НАСА (УНТЦ, проект NN-11).

1. Артеменко О. А., Троян В. М., Азаркова М. В. Вплив кліностакування на конформаційний стан хроматину та кінетику першого клітинного циклу під час проростання насіння гороху // Укр. бот. журн.—2005.—62, № 1.— С. 122—130.
2. Родригес Р. Л., Денхарт Д. Т. Сельскохозяйственная биотехнология: векторные системы молекулярного клонирования. — М.: Агропромиздат, 1991.—534 с.
3. Рубин Б. А., Ладыгина М. Е., Воронков и др. Физиологическое состояние опухолевой ткани, индуцированной *Agrobacterium tumefaciens* // Биологические исследования на биоспутниках «Космос». — М., 1979.—С. 126—130.
4. Сарнацкая В. В. Физиологические аспекты опухолевого роста растений. — Киев: Наук. думка, 1993.—150 с.

5. Сытник К. М., Кордюм Е. Л., Недуха Е. М. Растительная клетка при изменении геофизических факторов. — Київ: Наук. думка, 1984.—135 с.
6. Halstead T. W., Dutcher F. R. Plants in space // *Ann. Rev. Plant Physiol.*—1987.—38.—P. 317—345.
7. Klaus D. M. Gravitational influence on biomolecular engineering processes // *Proceedings of 19th ASGSB Annual Meeting.*, Huntsville, Alabama, November 12—16, 2003, N 48.
8. Kordyum E. L. Plant growth and development in microgravity // *Proc. of the International Conf. on Plant Ontogenesis in Natural and Transformed Environments*, Lviv, July 1—4, 1998.—P. 11—13.
9. Kordyum E. L., Sytnik K. M. Biological effects of weightlessness at cellular and subcellular levels // *Physiologist.*—1983.—26, N 6 Suppl.—P. 141—142.
10. Krikorian A. D., O'Connor S. A. Kariological observations // *Ann. Bot.*—1984.—54.—P. 49—63.
11. Levin H. G., Krikorian A. D. Chromosomes and plant cell division in space environmental conditions and experimental details // *Adv. Space Res.*—1992.—12.—P. 73—82.
12. Wordragen M. F., Dons H. J. *Agrobacterium tumefaciens*-mediated transformation of recalcitrant crops // *Plant Molecular Biology Reporter.*—1992.—10, N 1.—P. 12—36.

PLANT CELL TRANSFORMATION WITH *AGROBACTERIUM TUMEFACIENS* UNDER CLINOROTATION

V. V. Sarnatska, H. O. Hladun, S. F. Padalko

To investigate microgravity (clinorotation) effect on plant cell transformation with *Agrobacterium tumefaciens* and crown gall tumor formation, the culture of primary explants of potato and Jerusalem artichoke tubers was used. It is found that the efficiency of tumor formation and development in clinorotated explants are considerably reduced. When using the explants isolated from potato tubers clinorotated for 3, 5 and 19 days, drastic reduction of formation and development of crown gall tumors was observed. Conversely, the tumor number and their development were increased when potato tubers were clinorotated for one day. Four-hour clinorotation of explants inhibits chromatin activation (increase in availability of nuclei to acridine orange) and did not induce any appreciable effect on RNA-polymerase I and II. At one-day clinorotation of potato tubers a considerable increase in template accessibility of chromatin and in activity of RNA-polymerase I and II occurred. We discuss the possibility to use short-term clinorotation of plant organs, from which explants for the transformation with *A. tumefaciens* will be isolated, for the increase in transformation efficiency of recalcitrant plants.

Академіку НАН України
Віктору Васильовичу Пилипенку
70 років



15 листопада 2005 року виповнилося 70 років від дня народження Віктора Васильовича Пилипенка, видатного вченого в галузі механіки та ракетно-космічної техніки, талановитого організатора науки, одного із засновників Інституту технічної механіки НАН України і НКА України, Заслуженого діяча науки і техніки України, академіка НАН України, голови Придніпровського наукового центру НАН України і МОН України, Почесного директора Інституту технічної механіки НАН України і НКА України.

У 1959 р. В. В. Пилипенко закінчив фізико-технічний факультет Дніпропетровського державного університету і почав працювати у Конструкторському бюро «Південне», де пройшов шлях від інженера до начальника сектора динаміки рідинних ракетних двигунних установок (РРДУ). Під час роботи в Конструкторському бюро він активно займається науково-дослідною роботою. В 1961 р. В. В. Пилипенко захистив кандидатську дисертацію. В 1962 р. він організував і очолив групу, а в 1964 р. — сектор динаміки рідинних ракетних двигунних установок. Під керівництвом і при без-

посередній участі Віктора Васильовича ці підрозділи брали участь у створенні й експериментальному відпрацюванні низки зразків ракетної техніки бойового і космічного призначення.

У 1966 р. з ініціативи академіка М. К. Янгеля в м. Дніпропетровську для вирішення фундаментальних проблем ракетно-космічної техніки було створено Сектор проблем технічної механіки Дніпропетровської філії Інституту механіки АН України (з 1968 р. — Дніпропетровське відділення Інституту механіки АН України). Для організації роботи в Секторі за розпорядженням М. К. Янгеля було направлено низку перспективних фахівців КБ «Південне» серед яких був В. В. Пилипенко. У відділі теплових процесів у двигунах літальних апаратів він розробляє теорію кавітаційних коливань (автоколивань) в системах живлення рідинних ракетних двигунів з насосною системою подачі компонентів палива. В 1968 р. В. В. Пилипенко був затверджений вченому званні старшого наукового співробітника. В тому ж році він захищає докторську дисертацію, яка стала основою для подальших наукових досліджень. Вона присвячена вирішенню проблем динаміки РРДУ.

У 1970 р. В. В. Пилипенко створює і очолює відділ динаміки двигунних установок літальних апаратів. Цей відділ було створено при підтримці Міністерства загального машинобудування СРСР після успішного впровадження на одному із його підприємств результатів науково-дослідних робіт, виконаних В. В. Пилипенком.

Наукову і науково-організаційну роботу В. В. Пилипенко поєднує з викладацькою діяльністю на кафедрі двигунобудування фізико-технічного факультету Дніпропетровського державного університету. В 1971 р. йому було присвоєно вчене звання професора. Майже 20 років він навчав майбутніх інженерів-механіків, які успішно працюють в наукових організаціях та різних галузях промисловості.

У 1978 р. В. В. Пилипенка призначають керівником Дніпропетровського відділення Інституту

механіки АН України, яке у 1980 році одержало статус самостійного інституту — Інституту технічної механіки АН України (у даний час — Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Національного космічного агентства України). Віктор Васильович брав безпосередню активну участь в організації і становленні інституту. З дня заснування інституту і протягом більш ніж 20 років В. В. Пилипенко — беззмінний його директор. Під його керівництвом інститут став одним з провідних інститутів НАН України, головним інститутом ракетно-космічної галузі України.

Плідна наукова діяльність Віктора Васильовича Пилипенка здобула йому заслужений авторитет і повагу наукової спільноти: в 1979 р. його обирають членом-кореспондентом, а в 1982 р. — дійсним членом НАН України.

Наукові результати, отримані В. В. Пилипенком в галузі динаміки рідинних ракетних двигунних установок і складних гідромеханічних систем, є суттєвим внеском в розвиток сучасної науки і техніки. Він запропонував нові методи розрахунку теплових режимів в елементах конструкцій літальних апаратів. Розробив методологію теоретичного аналізу аварійних ситуацій у РРДУ. Виконав теоретичні й експериментальні дослідження динаміки кавітаційних явищ у шнековідцентрових насосах рідинних ракетних двигунів, що дозволило йому сформулювати нове бачення динамічних процесів в РРДУ. Створив теорію низькочастотних кавітаційних автоколивань у насосних системах живлення РРДУ і розробив ефективні способи і засоби усунення таких автоколивань. Вирішив ряд проблемних питань динаміки РРДУ, у тому числі зв'язаних з математичним моделюванням процесу запуску двигуна з урахуванням кавітаційних явищ у шнековідцентрових насосах. Розвинув лінійну теорію поздовжньої стійкості рідинних ракет-носіїв (РН) і створив нелінійну теорію поздовжніх коливань рідинних РН. Розробив теоретичні методики аналізу динамічної сумісності РРДУ з конструкцією РН. Запропонував нові ефективні демпфуючі пристрої для забезпечення поздовжньої стійкості рідинних РН і пневматичні системи віброзахисту космічних апаратів. Розробив і впровадив до практики нові перспективні кавітаційні імпульсні установки для обробки поверхонь металевих виробів та інтенсифікації низки технологічних процесів.

Результати фундаментальних та прикладних досліджень ученого дали змогу створити найдосконаліші методики аналізу динаміки рідинних ракетних двигунів та поздовжньої стійкості потужних

РН, розробити та впровадити в практику ракетобудування високоефективні засоби стабілізації відносно кавітаційних коливань в системі живлення ракетного двигуна та поздовжніх коливань в системі «РРДУ — корпус ракети».

В. В. Пилипенко — визнаний авторитет у питаннях, пов'язаних з динамікою кавітаційних явищ, автор понад 300 наукових праць, у тому числі трьох монографій і 90 винаходів.

Велику увагу учений приділяє підготовці наукових кадрів. Серед його учнів — 2 доктори та 18 кандидатів наук.

У 1983 р. В. В. Пилипенко став лауреатом премії НАН України імені М. К. Янгеля за цикл робіт з динаміки, стійкості та міцності двигунних установок, у 1988 р. — лауреатом Державної премії СРСР за роботи зі створення РН «Зеніт», а у 1997 р. — лауреатом Державної премії України в галузі науки і техніки за комплекс досліджень з гідрогазоплазmodинаміки для забезпечення розробки та експлуатації об'єктів ракетно-космічної техніки.

Протягом 10 років (1993—2004) В. В. Пилипенко був академіком-секретарем Відділення механіки НАН України.

Нині Віктор Васильович — член Президії НАН України, голова Придніпровського наукового центру НАН України і МОН України, який він очолює понад 20 років, президент Українського товариства інженерів-механіків, головний редактор наукового журналу «Технічна механіка», член редколегії науково-практичного журналу «Космічна наука і технологія».

Під керівництвом В. В. Пилипенка Придніпровський науковий центр розвивається як ефективно діючий територіальний центр науки, який використовує науково-технічний потенціал Дніпропетровської, Запорізької та Кіровоградської областей для вирішення найбільш важливих регіональних проблем.

Наукова та науково-організаційна діяльність В. В. Пилипенка отримала міжнародне визнання. Він — дійсний член Європейської академії наук, Міжнародної академії астронавтики, Російської академії космонавтики ім. К. Е. Цюлковського, почесний член Міжнародної академії авторів відкриттів та винаходів, член Американського товариства інженерів-механіків.

Плідна діяльність ученого відзначена урядовими нагородами — орденами Трудового Червоного Прапора, Жовтневої революції, Ярослава Мудрого V і IV ступенів та медалями.