

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 18
2 + 2012

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК + КИЇВ

ЗМІСТ

Лялько В. І., Сахацький О. І., Костюченко Ю. В., Артеменко І. Г., Жолобак Г. М., Левчик О. І., Мовчан Д. М. Космічний моніторинг балансу парникових газів з метою уточнення їхньої інвентаризації

Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М., Дугін С. С., Воробйов А. І. Дослідження змін вегетаційних індексів для пшениці над газовим родовищем (підземним газосховищем) за даними гіперспектральної зйомки

Каблак Н. І., Савчук С. Г. Дистанційний моніторинг атмосфери

Федоренко А. К., Захаров І. В. Специфічний коливальний режим у полярній термосфері

Козак Л. В., Івченко В. М., Одзимек А., Клоков І. С., Козак П. М., Лапчук В. П. Оцінка енергії світіння атмосфери над грозовими розрядами

Козак Л. В., Савін С. П., Луї А. Т., Цупко О. О. Особливості турбулентних процесів у магнітосфері Землі за вимірами місії «Кластер»

CONTENTS

3 Lyalko V. I., Sakhatsky A. I., Kostyuchenko Yu. V., Artemenko I. G., Zholobak G. M., Levchik E. I., Movchan D. M. Space monitoring of balance of greenhouse gases to clarify their inventory

15 Lyalko V. I., Shportjuk Z. M., Sibirtseva O. N., Dugin S. S., Vorobiev A. I. An investigation of changes in vegetation indices for wheat over a gas field (underground gas storage facility) on the basis of hyperspectral data

20 Kablak N. I., Savchuk S. G. Distant monitoring of the atmosphere

26 Fedorenko A. K., Zakharov I. V. Specific oscillatory mode in the polar thermosphere

33 Kozak L. V., Ivchenko V. M., Odzymek A., Klovov I. S., Kozak P. M., Lapchuk V. P. Estimation of atmosphere glow energy over storm discharges

43 Kozak L. V., Savyn S. P., Lui A. T., Tsupko O. O. Some features of turbulent processes in the Earth's magnetosphere from CLUSTER mission measurements

Білінський А. І., Вовчик Е. Б., Благодир Я. Т. Теоретичні аспекти модернізації супутникового чотиривісного монтування ЛД-2

Дегтярев А. В. 50 лет на космических орбитах

ДІЯЧІ КОСМІЧНОЇ ГАЛУЗІ

До 60-річчя від дня народження доктора технічних наук професора В. О. Пуляєва

НАШІ АВТОРИ

55 Bilinsky A. I., Vovchyk Ye. B., Blagodyr Ya. T. Theoretical aspects of the modernization of the satellite four-axis mounting LD-2

59 Degtyarev A. V. 50 years in space orbits

81 FIGURES OF SPACE INDUSTRY

60th birthday of Professor V. A. Pulyayev

83 OUR AUTHORS

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

Підписано до друку 23.03.11. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет.
Ум. друк. арк. 8,82. Обл.-вид. арк. 9,26. Тираж 100 прим. Зам. № 3238.

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України,
01004, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

**В. І. Лялько, О. І. Сахаський, Ю. В. Костюченко, І. Г. Артеменко,
Г. М. Жолобак, О. І. Левчик, Д. М. Мовчан**

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України», Київ

КОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ БАЛАНСУ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ З МЕТОЮ УТОЧНЕННЯ ЇХНЬОЇ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ

В Україні впродовж 2006—2011 рр. спеціалісти Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України працюють над створенням методики моніторингу балансу парникових газів з метою уточнення обсягів їхніх викидів та поглинання на основі використання даних супутникових зйомок. Запропоновані супутникові методи дозволяють проводити незалежний моніторинг балансу вуглекислого газу в атмосфері. За експертними оцінками кількість CO_2 перевищує 75 % від загальної кількості викидів парникових газів у межах території України. За даними супутникової зйомки пропонується здійснювати оцінку балансу антропогенних викидів та природного поглинання вуглекислого газу рослинним покривом за рахунок фотосинтетичної активності на значних територіях та забезпечити моніторинг вмісту CO_2 в атмосфері в різних ландшафтно-кліматичних зонах та територіальних одиницях України.

ВСТУП

Кругообіг вуглецю в природі є важливим елементом функціонування природних екосистем. На сьогоднішній день антропогенна діяльність часто призводить до значного порушення цього балансу. Це може чинити вплив на інші елементи земної системи, зокрема на елементи кліматичної системи. А подібні зміни, як правило, призводять до негативних наслідків в соціально-економічній сфері нашого суспільства.

Попередні результати досліджень, в яких бере участь і Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, свідчать, що за вмістом CO_2 в атмосфері, станом змін рослинного покриву та викидів в атмосферу CO_2 промисловими підприємствами є підстави вважати, що антропогенний вплив на вуглецевий баланс має місце, в тому числі і для території України.

При оцінках карбонового циклу, балансу парникових газів і їхнього впливу на клімат ще є значні труднощі та невизначеності, які призводять до суттєвих розбіжностей в розрахунках па-

раметрів природних процесів та у їхніх прогнозах. Наявність супутникових даних кардинально змінює ситуацію на краще.

При обробці космічних знімків з метою вирішення поставлених задач можуть застосовуватись різні підходи. В першу чергу може використовуватись класифікація земних покривів на основі космічних знімків та наземних даних.

В результаті класифікації багатоспектральних космічних зображень досить успішно можуть виділятися різні класи земного покриття. Вдало виділяються лісові рослинні угруповання, трав'яниста рослинність, агрофітоценози. Відомо, що у межах названих типів рослинного покриву процеси енергомасообміну, включаючи карбоновий та водний цикли, та процеси газообміну мають специфічні ознаки та певні межі змін своїх кількісних характеристик. Аналіз класифікованого космічного зображення з використанням накопичених теоретико-експериментальних баз знань дозволяє виконати обґрунтовану трансформацію класифікованих даних в інші карти з метою оцінки параметрів вказаних природних процесів.

По-друге, дані космічної зйомки дозволяють проводити прямі вимірювання концентрації пар-

© В. І. ЛЯЛЬКО, О. І. САХАСЬКИЙ, Ю. В. КОСТЮЧЕНКО,
І. Г. АРТЕМЕНКО, Г. М. ЖОЛОБАК, О. І. ЛЕВЧИК,
Д. М. МОВЧАН, 2012

никових газів в атмосфері та виконувати розрахунки їхнього поглинання рослинним покривом шляхом визначення кореляції спектральних характеристик космічних знімків з параметрами інтенсивності процесів фотосинтезу. Крім того, використання матеріалів космічних зйомок різних років дозволяє говорити про стан навколишнього середовища у попередні роки і про зміни, зокрема в ландшафтах, які відбулися за час, що минув.

Таким чином, застосування супутникових зйомок дозволяє здійснювати незалежну оцінку балансу антропогенних викидів та природного поглинання вуглекислого газу і надає можливість проводити такі розрахунки більш обґрунтовано та надійно.

ФОТОСИНТЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ОСНОВНИХ ВИДІВ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ

Розглядаючи задачу про тенденції змін клімату, перш за все, виходячи з панівної наразі концепції про причини глобальних змін, слід проаналізувати ключові параметри вуглецевого циклу та визначити основні змінні, що характеризують базові джерела і стоки парникових газів.

Сучасний глобальний цикл вуглецю складається з двох менших циклів. *Перший* з них зумовлений взаємодією двоокису вуглецю атмосфери і природних вод. *Другий цикл* (рис. 1) зумовлений двома фундаментальними біологічними процесами в біосфері — фотосинтезом і диханням. Він полягає у зв'язуванні двоокису вуглецю в ході фотосинтезу та новому утворенні його у процесі життєдіяльності рослин і тварин, а також при розкладанні органічних залишків.

Фотосинтез є основною і контрольною ланкою глобальних біогенних циклів вуглецю, азоту і води. Сукупна маса рослин не тільки формує основний активний резервуар органічного вуглецю, але і відіграє роль значного глобального кліматичного фактора. Рослинний покрив виступає одним з провідних претендентів на роль демпфера наслідків парникового ефекту. Річний результат фотосинтезу становить 120 Гт CO_2 , з яких близько половини є первинною продукцією суходолу [2].

Валова первинна продуктивність (GPP) за рік — це маса вуглецю, яка пройшла через фотосин-

тетичне карбоксилування. **Чиста первинна продуктивність (NPP)** — різниця між GPP та всіма емісійними втратами вуглецю рослинного покриву за рік. **Фотосинтетичний «стік» вуглецю (Ph)** — це вуглецевий баланс фотосинтетичного вуглецю поточного періоду вегетації.

Поняття чистої первинної продуктивності фотосинтезу і фотосинтетичного «стоку» вуглецю тотожні тільки у однорічних рослин. Структура фотосинтетичного стоку вуглецю обумовлена газообміном автотрофної (донорної) і гетеротрофної (акцепторної) частин рослин, а також втратами вуглецю при переносі від першої до другої протягом періоду вегетації. Так, для хвойних деревостанів *Ph* становить 1.07 *NPP* [2].

Для процесу фотосинтезу характерна значна варіабельність, тому що на нього впливає комплекс взаємопов'язаних зовнішніх і внутрішніх факторів (рис. 1). Деякі зовнішні фактори, такі як світло і CO_2 , безпосередньо впливають на фотосинтез, інші (наприклад, вода і мінеральні речовини) нерідко діють опосередковано. Протягом дня обмежувальним може бути спочатку один, а потім інший фактор. Спостерігається також сезонна заміна одного обмежувального фактора іншим: узимку і навесні фотосинтез обмежує температура, влітку — опір продихів, концентрація двоокису вуглецю і світло. Найважливішими внутрішніми факторами, що впливають на фотосинтез, є видова належність, вік і структура листків, розмір, кількість і реакція продихів, вміст хлорофілу, внутрішній водний дефіцит, використання і нагромадження вуглеводів. На організмовому і ценотичному рівні до цього додаються архітектоніка і взаєморозташування рослин, щільність насадження тощо, внаслідок чого спостерігається варіювання листового і хлорофільного індексів рослинного покриву.

Використання індексних показників: значень у проекції на поверхню землі сукупної площі листів (**листовий індекс LI**), маси хлорофілу (**хлорофільний індекс XI**) рослинного покриву є способом кількісної оцінки середнього для даних кліматичних умов результату фотосинтезу, що виражається в кількості зв'язаного за рік атмосферного вуглецю у фітомасі. Накладення на цю оцінку обмежень, які диктуються конкрет-

ними умовами довкілля, дозволяє оцінити результат поточного продукційного процесу.

На загальну величину фотосинтезу безпосередньо зв'язана з площею асимілювальних органів, тобто з листовою поверхнею фітоценозу, що у свою чергу визначається забезпеченістю вологою. Відповідно і площа листової поверхні фітоценозу в умовах крайньої нестачі вологи мінімальна і наростає зі збільшенням вологості, досягаючи максимуму при оптимальній вологозабезпеченості. Зростання листового індексу супроводжується ростом сумарної продукції фотосинтезу, що при збільшенні щільності листової маси і посиленні взаємного затінення листків досягає насичення, і її подальший ріст припиняється. Таке насичення, наприклад, у сільськогосподарських культурах зазвичай настає при листовому індексі, який дорівнює 4–6 [3].

Між різними групами рослин (у тому числі різними життєвими формами) спостерігаються великі розбіжності значень параметрів фотосинтетичної активності (таблиця). Відомо, що більшість дикорослих трав'янистих квіткових рослин значно інтенсивніше, ніж деревні, асимілюють вуглець (світлолюбні трави 20–50 мг CO_2 на 1 дм^2 листової поверхні за годину, світлові листки листопадних дерев — 10–20 мг $\cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Разом з тим злаки, що складають основу степових фітоценозів, значно поступаються деревам за цим показником (6–12 мг $\cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$).

Як відомо, в Україні найбільші площі займає степова рослинність та агрозони, на яких вирощуються переважно зернові та технічні культури. Лісами вкрито близько 15 відсотків площі

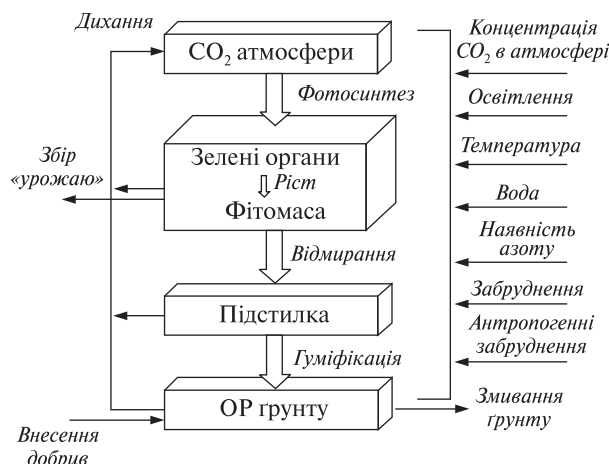


Рис. 1. Загальна структурна модель [1] кругообігу вуглецю в екосистемі

нашої держави. Звісно, зустрічаються і інші типи рослинності, які теж беруть участь в процесі засвоєння вуглецю. Для того щоб вирахувати вклад основних типів рослинного покриву у всеукраїнський «стік» вуглецю на основі інтегративного підходу, який поєднує дистанційні інструментальні методи та велику кількість наземних вимірювань, нами було проаналізовано широкий спектр наукових робіт, присвячених вивченню екофізіології фотосинтетичної активності окремих груп рослинності.

В табл. 1 на основі аналізу літературних джерел зокрема [2, 3], приведено деякі важливі параметри, що характеризують процес фотосинтезу стосовно основних ботаніко-географічних формацій (зон рослинності), які розміщені на території України.

Таблиця 1. Середні фотосинтетичні показники основних ботаніко-географічних формацій (адаптовано для умов України)

Формація	Питомий хлорофіл, $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$	Нетто поглинання CO_2 , $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	Листковий індекс (ЛІ), $\text{м}^2 \cdot \text{м}^{-2}$	Первинна нетто-продуктивність NPP , $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$	Питомий річний стік Ph , $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$
Болота	20.0—30.0	20—40	7	30	2
Хвойні ліси	20.0—40.0	4—15	12	8—13	2—4
Листяні ліси (літньозелені)	20.0—40.0	5—20	5	12	5
Луки	13.0—20.0	20—50	3.6	6	2.7
Лісостеп	13.0—15.0	5—15	4	7	4.5
Степ	13.0—24.0	6—12	3.6	6	4
Водойми	2.0—5.0	4—6		4	0.6
Агрозони	15.0—24.0	6—12	4	6.5	4

**РЕЗУЛЬТАТИ ПОПЕРЕДНІХ ПІДРАХУНКІВ ЗМІН
ПЛОЩ ЛАНДШАФТІВ ЗА ПЕРІОД 1990—2000 рр.
ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗНІМКІВ
«LANDSAT TM/ETM+» ЗА 1990—2000 рр.
У МЕЖАХ ЗАХІДНИХ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ**

В контексті викладеного вище постає задача адекватного інтегрального моніторингу стану рослинних угруповань, і в першу чергу, змін ландшафтів. Як показує світовий досвід останніх 30 років, важливим інструментом такого моніто-

рингу є космічні спостереження. В табл. 2 наведено результати класифікації знімків «Landsat TM/ETM+» за 1990—2000 рр. в межах західних регіонів України, яку було проведено для визначення зміни площ класів ландшафтів (див. рис. 2).

Ці попередні дані потребують уточнення. За даними оцінки сигнатур помилка визначення площ окремих класів становить 20 %. Найбільша неузгодженість та помилки можуть бути пов'язані з віднесенням класу долин річок, лу-

Таблиця 2. Попередні дані про зміни площ класів ландшафтів за результатами класифікації знімків «Landsat TM/ETM+» за 1990—2000 рр. у межах західних регіонів України

Клас	Площа S (км ²) та її доля (%)				Приріст, %
	1990 р.		2000 р.		
Карпатський регіон					
Хвойні ліси	6671.5	(22.8 %)	4669.9	(17.1 %)	–5.7
Листяні ліси, змішані, сади, парки, групи дерев	6128.9	(20.9 %)	8515.8	(29.3 %)	8.4
Агрозони	9994.1	(34.1 %)	9086.8	(31.3 %)	–2.9
Долини рік, луки, чагарники	4300.3	(14.7 %)	4414.3	(16.4 %)	1.7
Вирубки	1042.4	(3.6 %)	283.6	(1.0 %)	–2.6
Населені пункти	889.3	(3.0 %)	937.1	(3.2 %)	0.19
Вода	239.1	(0.9 %)	491.8	(1.7 %)	0.8
Хмари	—	0	665.8	(2.3 %)	2.3
Всього	29265.6	(100 %)	29065.0	(100 %)	
Полісся					
Хвойні ліси	17688.5	(19.4 %)	17524.7	(19.2 %)	–0.18
Листяні ліси, змішані, сади, парки, групи дерев	13128.6	(14.4 %)	10232.97	(11.2 %)	–3.2
Агрозони	27774.1	(30.5 %)	27481.5	(30.2 %)	–0.32
Долини рік, луки, чагарники	20502.2	(22.5 %)	19702.2	(21.6 %)	–0.9
Болота	3429.6	(3.8 %)	9898.9	(10.9 %)	7.1
Населені пункти	6574.6	(7.2 %)	2927.0	(3.2 %)	–4.0
Вода	1987.4	(2.2 %)	2883.9	(3.2 %)	1.0
Хмари	—	0	435.2	(0.5 %)	0.5
Всього	91085.1	(100 %)	91086.7	(100 %)	
Південно-західний регіон					
Хвойні ліси	6455.1	(5.5 %)	5879.5	(5.1 %)	–0.4
Листяні ліси, змішані, сади, парки, групи дерев	25417.5	(21.8 %)	36217.7	(31.3 %)	9.5
Агрозони	63738.1	(54.6 %)	55407.1	(47.8 %)	–6.8
Долини рік, луки, чагарники	15732.7	(13.5 %)	12694.8	(11.0 %)	–2.5
Населені пункти	3508.4	(3.0 %)	2261.2	(2.0 %)	–1.0
Вода	1883.7	(1.6 %)	2618.5	(2.3 %)	0.7
Хмари	—	0	719.3	(0.5 %)	0.5
Всього	116735.4	(100 %)	115798.0	(100 %)	

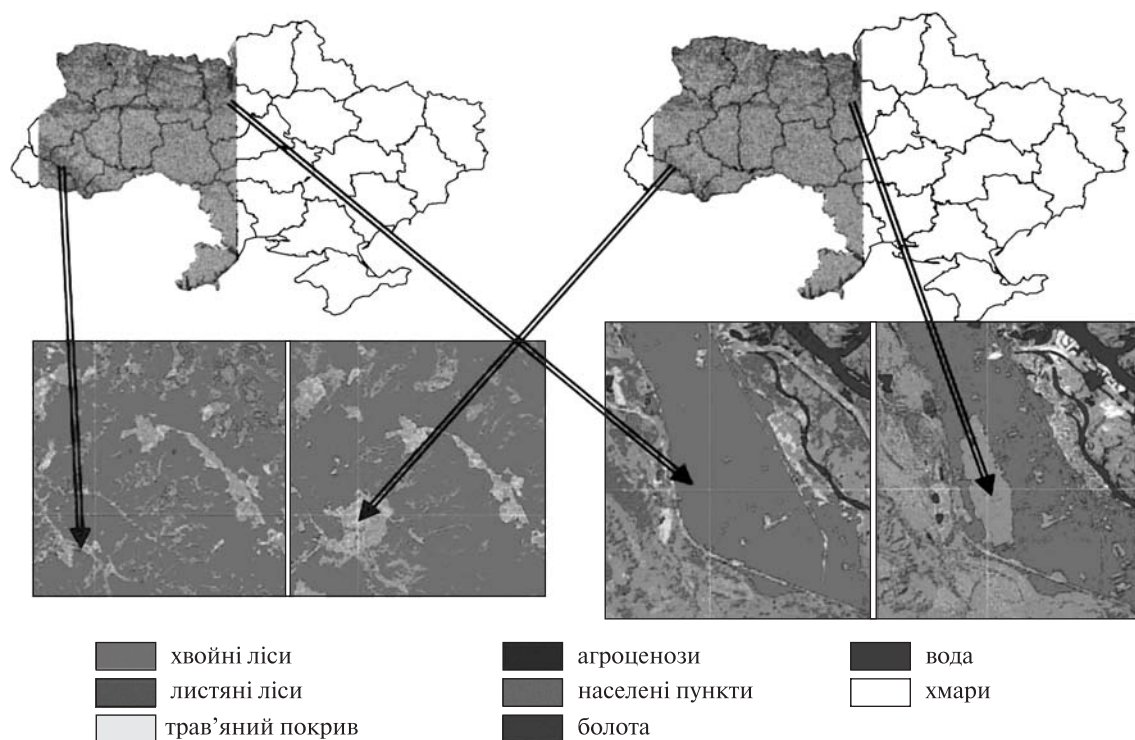


Рис. 2. Результати попередньої класифікації знімків «Landsat TM» за 1990 р. (зліва) та 2000 р. (справа)

ків та чагарників до агроценозів і навпаки. Крім того, листяні ліси, сади та парки іноді помилково займають площі луків та чагарників. Населені пункти часто класифікуються як листяні ліси та парки, а тіні від хмар — як водна поверхня.

Враховуючи вищезгадане, наведені дані будуть уточнюватись для більш якісної оцінки природних змін за період 1990—2000 рр.

ПРЯМІ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ В АТМОСФЕРІ ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

В рамках досліджень ЦАКДЗ вирішувалася задача оцінки інформативності даних спеціалізованих космічних зйомок з метою визначення вмісту CO_2 в атмосфері, в першу чергу над територією України. Для вирішення даної задачі були проаналізовані наявні дані. На основі аналізу було визначено, що дані інструмента SCIAMACHY, встановленого на супутнику «Envisat», є найбільш перспективними. Перш за все слід зазначити, що SCIAMACHY — це перший вста-

новлений на супутнику сенсор, що має змогу вимірювати глобальний розподіл вуглекислого газу в атмосфері [University of Bremen: IUP/IFE SCIAMACHY WFM-DOAS: http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/index.html]. Принцип дії цього приладу ґрунтується на вимірюваннях лінії поглинання молекул CO_2 в ІЧ-діапазоні. Більш детальний опис приладу міститься в роботі [7].

На основі даних SCIAMACHY вчені Інституту фізики навколишнього середовища (Institute of Environmental Physics — IUP, Бременський університет у Німеччині), отримали перші карти глобального розподілу CO_2 в атмосфері [European space Agency: http://www.esa.int/esaCP/SEM1DUQ08ZE_index_0.html]. Необхідно зазначити, що саме IUP був головним виконавцем проекту SCIAMACHY, тобто мав право першим обробити дані про глобальну концентрацію парникових газів у атмосфері. На основі отриманих карт було виконано розрахунки, що демонструють щомісячний розподіл вуглекислого



Рис. 3. Збільшення середньорічної концентрації CO₂ з 2003 по 2005 рр.

Таблиця 3. Зміна середньорічного вмісту CO₂ (%) в атмосфері

Області	2003–2004 р.	2004–2005 р.	2003–2005 р.
Закарпатська	0.554	0.51	1.064
Львівська	0.755	0.6	1.355
Івано-Франківська	0.465	0.487	0.952
Чернівецька	0.443	0.486	0.929
Тернопільська	0.443	0.486	0.929
Рівненська	0.465	0.509	0.974
Хмельницька	0.465	0.509	0.974
Житомирська	0.442	0.465	0.907
Вінницька	0.398	0.509	0.907
Полтавська	0.509	0.62	1.129
Харківська	0.598	0.643	1.241
Дніпропетровська	0.532	0.709	1.241
Київська	0.465	0.509	0.974
Черкаська	0.509	0.532	1.041
Кіровоградська	0.509	0.62	1.129
Миколаївська	0.509	0.62	1.129
Одеська	0.443	0.619	1.062
Херсонська	0.509	0.709	1.218
Крим	0.465	0.775	1.24
Чернігівська	0.731	0.399	1.13
Сумська	0.687	0.465	1.152
Запорізька	0.576	0.709	1.285
Донецька	0.576	0.709	1.285
Луганська	0.665	0.62	1.285

газу в атмосфері з січня 2003 по грудень 2005 рр. включно.

На основі даних була оцінена придатність даних SCIAMACHY для оцінки вмісту CO₂ в атмосфері над територією України. З цієї метою з даних IUP було виділено характеристики щомісячного розподілу вуглекислого газу в атмосфері над Україною з січня 2003 по грудень 2005 рр. Аналіз даних дозволив отримати усереднені дані щомісячного розподілу концентрації CO₂ в атмосфері над територією адміністративних областей України. На цій основі було розраховано загальне зростання концентрації CO₂ в атмосфері (рис. 3) з січня 2003 по грудень 2005 рр. та розраховано тенденції міжрічного зростання концентрації CO₂ в атмосфері (табл. 3).

Слід зазначити, що аналіз даних про переважні напрями вітрів [5] над територією України підтверджує відповідність наведених на рис. 2 даних щодо можливого переносу забруднювальних речовин та промислової активності.

На основі отриманих даних було визначено розподіл змін концентрацій вуглекислого газу по місяцях в межах адміністративних областей України за вказаний період (рис. 4). Видно, що вміст CO₂ в атмосфері залежить від сезонів вегетаційного розвитку рослинного покриву (максимум CO₂ — в холодний період, мінімум — в теплий період року). Іншими словами, спостереже-

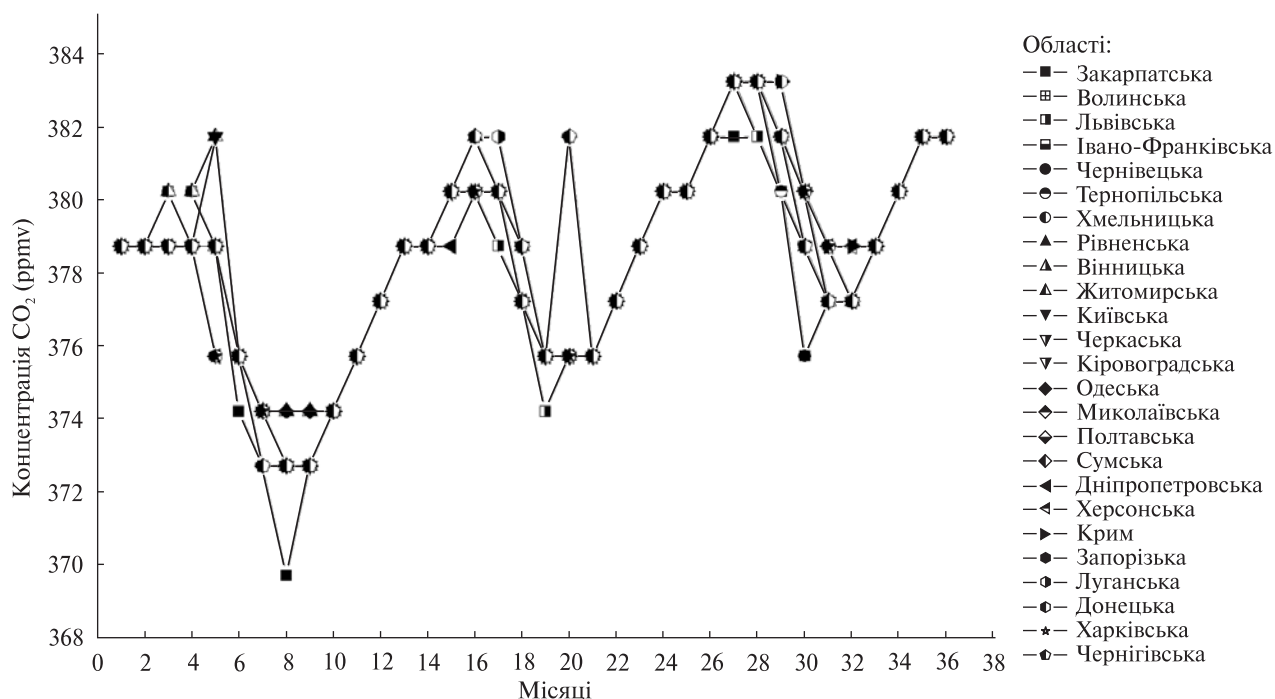


Рис. 4. Зміна концентрації CO₂ з 2003 по 2005 рр. в межах адміністративних областей

на динаміка вмісту вуглецевих газів відповідає періодам вегетації основних ландшафтних угруповань в межах України та загальним уявленням про природні процеси обміну між землею поверхнею і атмосферою.

З рис. 4 можна також зробити очевидний висновок, що розподіл концентрацій CO₂ в атмосфері над територією України не проходить по адміністративних кордонах областей. В цьому контексті необхідно застосовувати інформацію про фізико-географічне районування, у першу чергу про розподіл рослинного покриву та структуру землекористування [5].

Висновком аналізу стало підтвердження того, що концентрація CO₂ в атмосфері над територією України за три роки зросла. Найбільше зростання зафіксоване на заході та промисловому сході України. Над більшою частиною Львівської області зріст склав 5.083 ppmv, а над такими промисловими областями, як Донецька, Запорізька і Луганська — 4.834 ppmv. Найменший зріст концентрації CO₂ в атмосфері зафіксовано у Поліській зоні — 3.417 ppmv. Для 2005 р. найбільша се-

редньорічна концентрація атмосферного CO₂ зафіксована над територією Кримського півострова (381 ppmv при 376.333 ppmv у 2003 р.), Донецька, Запорізька і Луганська області мають також високі показники середньорічної концентрації (380.917 ppmv при 376.083 ppmv у 2003 р.). Найменший середній рівень концентрації атмосферного CO₂ за 2005 р. зафіксовано над Закарпатською областю (379.917 ppmv при 375.333 ppmv у 2003 р.). Слід зазначити, що отримані результати відповідають оцінкам фахівців IUP, в яких зазначено середньорічний глобальний зріст вмісту CO₂ з 2003 по 2005 рр. від 0.5 до 1.5 % [University of Bremen: IUP/IFE SCIAMACHY WFM-DOAS: http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/index.html] (наприклад, зріст CO₂ над більшою частиною Львівської області склав 0.755 % з 2003 по 2004 рр. і 0.6 % з 2004 по 2005 рр.).

Аналіз розподілу вмісту CO₂ в атмосфері дозволяє зробити припущення щодо можливих причин розбіжностей регіональних показників. Так, враховуючи багаторічні «рози вітрів» [5],

можна припустити, що на атмосферну концентрацію CO_2 в західних областях впливає перенесення забруднювачів (вуглецевих газів і аерозолів) з індустріальних районів центральної Європи (зокрема Сілезького басейну, промислового вузла Кошице тощо). Додатково слід зазначити, що пов'язані із зазначеними змінами зміни земних покривів та невизначене навантаження від промислових басейнів західних областей потребує додаткової уваги. В цьому контексті зростає роль наземних полігонів у західних регіонах України, зокрема у Волинській, Рівненській, Закарпатській і Львівській областях.

В центральних і частково причорноморських областях, переважно сільськогосподарських, зміни концентрації вуглецевих газів можна пояснити змінами у структурі землекористування, зокрема змінами у структурі посівів. Також важливою складовою є зміна структури опадів, викликана глобальною зміною тенденцій у взаємодії прибережної зони суходолу і моря. Крім того, слід враховувати антропогенний вплив у цих регіонах.

Східні області знаходяться під переважним впливом антропогенних факторів, і додатково — під впливом транскордонних факторів, відповідно до структури вітрів в цьому регіоні.

Узагальнюючи отримані результати, можна зробити припущення, що зростання атмосферної концентрації парникових газів над Україною пояснюється насамперед поглибленням загального антропогенного забруднення територій країни. Під впливом цього забруднення та змін основних кліматичних показників у глобальному масштабі [INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: <http://www.ipcc.ch/>] змінюються і структура землекористування на території України, що у свою чергу також змінює баланс CO_2 в атмосфері.

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ДЗЗ ДЛЯ ОЦІНКИ ФОТОСИНТЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ПОТОКІВ CO_2 В ЕКОСИСТЕМАХ

Велика кількість проведених досліджень [6, 8, 9, 10] показала, що зміни коефіцієнта відбивання рослинного покриву у смузі $\lambda = 531$ нм пов'язані зі змінами у ксантофільному циклі рослин та за-

лежать від активності тилакоїдів, які безпосередньо беруть участь у процесі фотосинтезу.

Помічено, що індекс фотохімічного відбивання *PRI* певним чином залежить від коефіцієнта ефективності використання світла *LUE*. Цю залежність можна використати для покращення оцінки процесів фотосинтезу за допомогою даних дистанційного зондування [6, 8, 10].

Індекс *PRI* є індексом нормалізованої різниці коефіцієнта відбивання у двох вузьких смугах ($\lambda\lambda$ 531 та 570 нм), на який впливає вміст пігментів ксантофільного циклу [8]. При зміні потоку випромінювання в рослинному покриві відбуваються зміни у пігментному складі. Пігменти ксантофільного циклу можуть переходити з епоксидного стану (віолаксантин) до депоксидного стану (антераксин та зеаксантин), що впливає на розсіювання надлишку енергії.

Такі зміни в пігментному складі призводять до змін коефіцієнта відбивання в смузі $\lambda = 531$ нм, проте майже не впливають на нього у смузі $\lambda = 570$ нм. Розрахунок коефіцієнта *PRI* проводиться за формулою [10]

$$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}, \quad (1)$$

де ρ_{531} , ρ_{570} — коефіцієнти відбиття листя відповідно у смугах $\lambda\lambda$ 531 та 570 нм. Для того щоб отримати масштабоване значення індексу *PRI*, для відображення його як величини ефективності, потрібно провести алгебраїчне перетворення:

$$sPRI = \frac{PRI + 1}{2}. \quad (2)$$

Також для оцінки потоків вуглецю між рослинністю та атмосферою широко використовується вегетаційний індекс нормалізованої різниці (*NDVI*) [13]. Індекс *NDVI* може розглядатися як частина фотосентитично активної радіації (f_{PAR}), що була поглинута зеленою рослинністю. Даний індекс розраховується за формулою

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad (3)$$

де ρ_{NIR} , ρ_{RED} — відповідно коефіцієнти відбивання поверхні у ближньому інфрачервоному та червоному діапазонах.

Оскільки *NDVI* може безпосередньо виражатися як функція *FPAR*, то за допомогою *NDVI* та

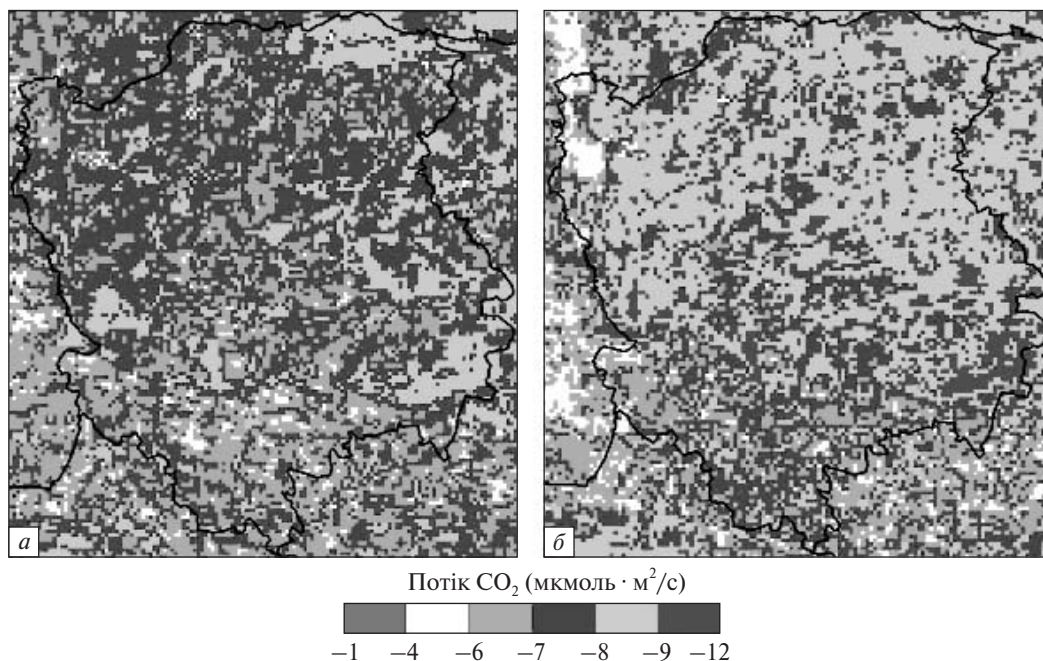


Рис. 5. Розподіл ефективності поглинання CO_2 рослинним покривом Волинської області, побудований на основі інтерпретації знімків MODIS від 19 серпня 2004 р. (а) та 22 серпня 2009 р. (б)

PRI можна оцінити швидкість фотосинтезу [11, 12]:

$$\begin{aligned} \text{Швидкість поглинання } \text{CO}_2 &= \\ &= f(sPRI \cdot NDVI). \end{aligned} \quad (4)$$

При зіставленні даних потоків CO_2 з індексами $sPRI$ та $NDVI$ було отримано емпіричну залежність [12]

$$\text{Потік } \text{CO}_2 = -4.3833 - 15.018 \cdot (NDVI \cdot sPRI). \quad (5)$$

Дана залежність дає можливість оцінювати ефективність фотосинтетичних процесів у рослинному покриві на основі багатоспектральних космічних знімків, що може використовуватися для порівняння ефективності поглинання CO_2 рослинним покривом у різні періоди та виявлення динаміки продуктивності рослинного покриву певної території. На рис. 5 наведено результат подібної інтерпретації для Волинської області.

Важливим для оцінки стоку вуглецю в рослинний покрив також є використання інформаційного продукту MOD17 [14], що дає змогу оцінити загальну річну чисту первинну продук-

тивність (NPP) рослинного покриву над дослідною територією.

З використанням отриманих даних про поглинальну здатність різних типів рослинного покриву, площі відповідних типів рослинного покриву та дані відносно промислових викидів CO_2 для території України був розрахований баланс вуглецю для території України.

На рис. 6 представлено графічне відображення співвідношення промислових викидів CO_2 до його поглинання рослинністю для областей України. Як видно з результатів, в 14 областях України спостерігається незначне переважання поглинання CO_2 над його промисловими викидами. Це переважно області західного та північного регіонів України, які мають значну площу заліснення та низький рівень розвитку промисловості. Так, «лідерами» у поглинанні CO_2 можна назвати Житомирську, Волинську та Чернігівську області, де спостерігається переважання поглинання над викидами на рівні 174, 162 та 160 $\text{т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1}$ відповідно. Промислово розвинені Донецька, Дніпропетровська і Луганська

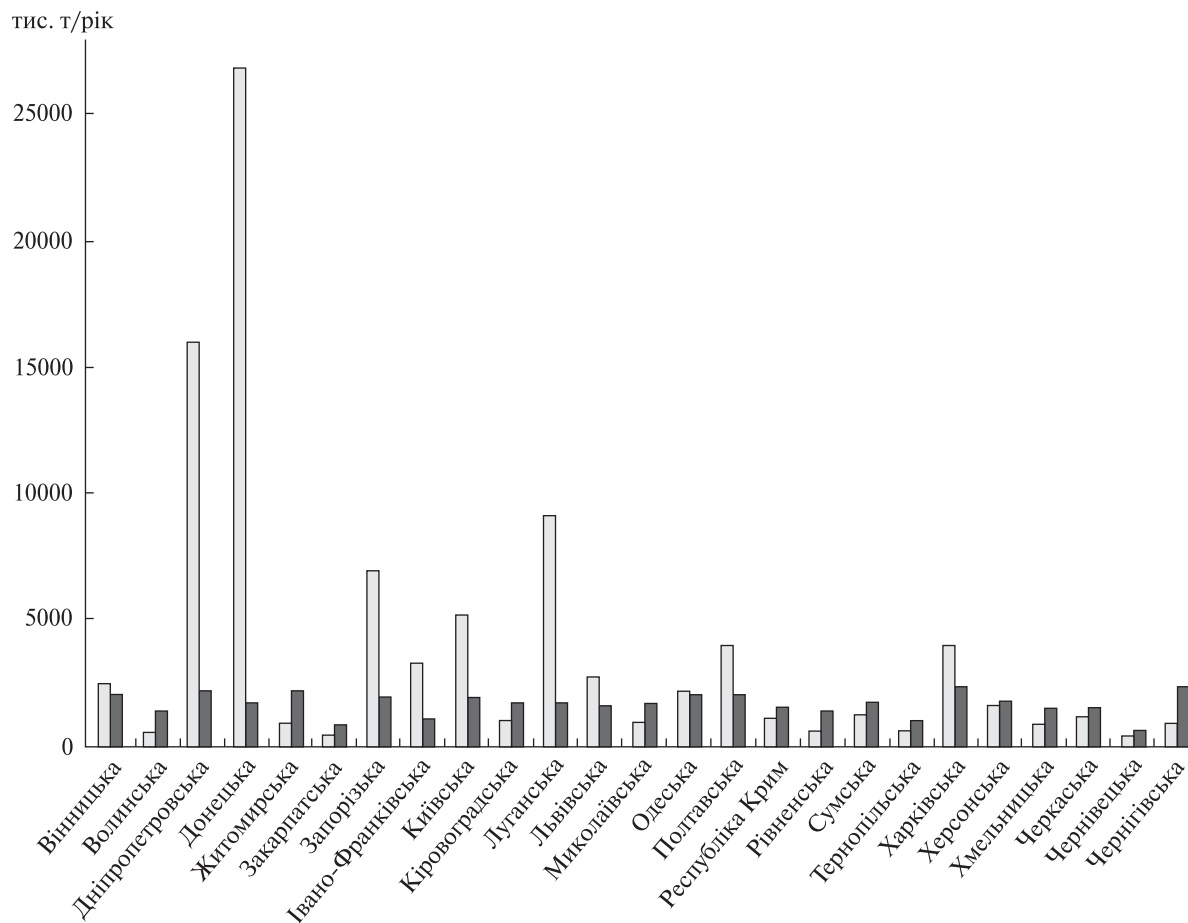


Рис. 6. Співвідношення річних об'ємів промислових викидів (світлі стовпці) та поглинання CO₂ рослинністю (темні стовпці) для областей України у 2000 р.

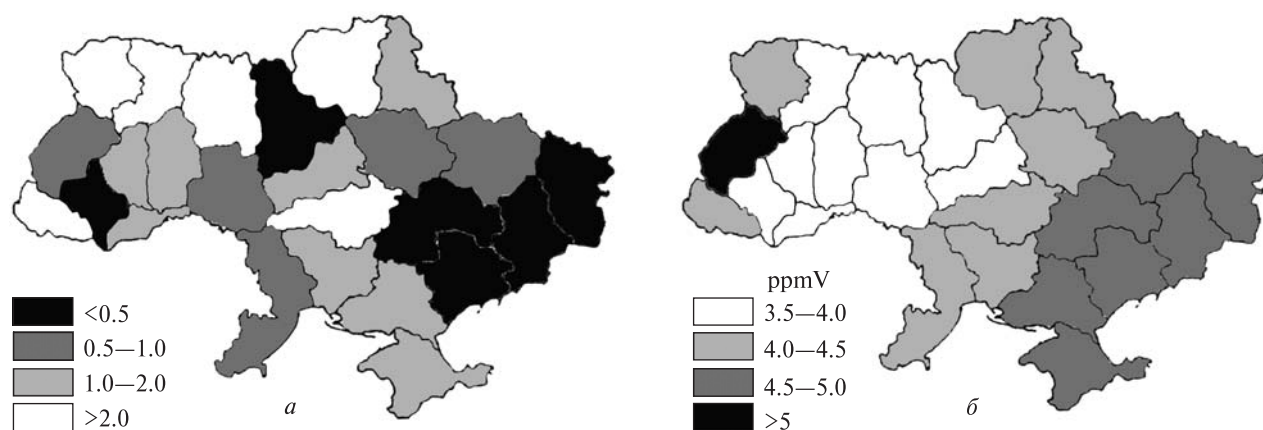


Рис. 7. Співвідношення поглинальної здатності CO₂ рослинності до промислових викидів (а) та зростання концентрації CO₂ в атмосфері в період 2003—2005 рр. за даними приладу SCIAMACHY (б)

області лідирують за промисловими викидами CO_2 (відповідно 3477, 1586, 1016 $\text{т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1}$). Сумарне ж значення для України в цілому вказує на переважання промислових викидів над поглинанням CO_2 приблизно удвічі, що становить 319 $\text{т} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1}$.

Ці результати були зіставлені з фактичними даними зростання концентрації CO_2 в атмосфері над Україною, які були отримані за допомогою приладу SCIAMACHY [4] (рис. 7). Порівнюючи рис. 7, а та б, можна побачити, що над областями, які є найбільшими джерелами промислового CO_2 , в останні роки спостерігається більш інтенсивне зростання концентрації CO_2 в атмосфері. Зокрема це стосується південно-східного промислового регіону, де надзвичайно розвинена гірничо-та металургійна промисловість, а також західного промислового регіону (Львівська та Івано-Франківська області) де розвинена нафто-газопереробна промисловість. Звичайно, також потрібно враховувати і особливості переносу та перемішування повітряних мас, внаслідок чого частина викидів переноситься на інші регіони. Так, стрімке зростання концентрації CO_2 в атмосфері над Львівською областю важко пояснити лише кількістю промислових викидів, оскільки вона в цьому регіоні значно менша, ніж, наприклад, у Донецькій чи Дніпропетровській областях, де зростання концентрації CO_2 в атмосфері проходить не так інтенсивно. Не виключено, що ця аномалія більш високої концентрації CO_2 над західними областями викликана вітровим привнесенням повітряних мас з промислових територій західних країн, оскільки річна роза вітрів тут сприяє формуванню подібного ефекту.

ВИСНОВКИ

На сьогодні моніторинг та прогнозування кліматичних та інших природних змін, як у глобальному, так і у регіональному масштабах, є однією з найбільш важливих проблем сталого розвитку людства. Для ефективного рішення цієї задачі було запропоновано використання даних супутникових зйомок. Так, для оцінки змін концентрації CO_2 в атмосфері можна використовувати дані спектрометра SCIAMACHY та інших подіб-

них сенсорів. Для оцінки балансу CO_2 в екосистемах ефективним методом є аналіз багатоспектральних знімків таких сенсорів, як «Landsat», SPOT, MODIS та ін.

Проведений аналіз дозволив визначити кілька важливих тенденцій у змінах земної поверхні, які суттєво впливають на вуглецевий баланс території України.

У першу чергу підтверджено наявність тенденції до змін ландшафтних комплексів та складу рослинних угруповань. Зафіксовано зміни на близько 10 % площ. Враховуючи дані про роль різних типів рослинності у формуванні вуглецевого балансу, можна припустити, що тенденція накопичення вуглецю в атмосфері зберігається.

Отримані дані ENVISAT/SCIAMACHY вказують на сезонні коливання концентрації CO_2 в атмосфері, що пов'язано з впливом рослинного покриву, а також мають тенденцію до зростання в міжрічному розрізі. В західній частині України це відбувається, скоріш за все, за рахунок трансграничного перенесення повітряних мас з індустріальних районів Європи, а на сході — найбільший вплив має вугільна промисловість.

В загальному ж для території України, за попередніми даними, які потребують уточнення, характерне переважання антропогенної емісії CO_2 над поглинанням його рослинним покривом більш ніж у два рази. Основними джерелами викиду CO_2 в атмосферу є південно-східний та західний індустріальні регіони України.

1. Бунь Р. А., Густі М. І., Дачук В. С. та ін. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України / Під ред. Р. А. Буны. — Львів: Укр. академія друкарства, 2004. — 376 с.
2. Воронин П. Ю. Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода на территории Северной Евразии // Физиология растений. — 2006. — 53, № 5. — С. 777—785.
3. Лархер В. Экология растений. — М.: Мир, 1978. — 384 с.
4. Лялько В. І., Артеменко І. Г., Жолобак Г. М. та ін. Дослідження впливу змін CO_2 та CH_4 в атмосфері на клімат за матеріалами космічних зйомок // Геологічний журн. — 2007. — № 4 — С. 7—16.
5. Руденко Л. Г., Чабанюк В. С. Бочковська А. І. та ін. Атлас України: Інтелектуальні системи ГЕО. 1999—2000.

6. Barton C. V. M., North P. R. J. Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index. Model and sensitivity analysis // *Remote Sens. Environ.* — 2001. — **78**. — P. 264–273.
7. Buchwitz M., de Beek R., Noël S., et al. Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: version 0.5 CO and CH₄ and impact of calibration improvements on CO₂ retrieval // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2006. — **6**. — P. 2727–2751.
8. Drolet G. G., Huemmrich K. F. A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest // *Remote Sens. Environ.* — 2005. — **98**. — P. 212–224.
9. Gamon J. A., Huemmrich K. F., Peddle D. R., et al. Remote sensing in BOREAS: Lessons learned // *Remote Sens. Environ.* — 2004. — **89**. — P. 139–162.
10. Penuelas J., Filella I., Gamon J. A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance // *New Phytologist*. — 1995. — **131**. — P. 291–296.
11. Rahman A. F., Gamon J. A., Fuentes D. A., et al. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery // *AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, California, 2000*.
12. Rahman A. F., Gamon J. A., Fuentes D. A., et al. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery // *J. Geophys. Res.* — 2001. — **106D**, N 24. — P. 33,579–33,591.
13. Ruimy A., Kergoat L., Bondeau A. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of differences in light absorption and light-use efficiency // *Global Change Biology*. — 1999. — **5**. — P. 56–64.
14. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products. Version 2.0 – MODIS Land Team, 2003. — 57 p.

Надійшла до редакції 01.10.11

*V. I. Lyalko, A. I. Sakhaty, Yu. V. Kostyuchenko,
I. G. Artemenko, G. M. Zholobak, E. I. Levchik,
D. M. Movchan*

SPACE MONITORING OF BALANCE OF GREENHOUSE GASES TO CLARIFY THEIR INVENTORY

In Ukraine, during 2006–2011, workers from the Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the IGS of NAS of Ukraine have been elaborating a method for the monitoring of the balance of the greenhouse gases to clarify the amount of their emission and absorption using satellite data. The proposed methods allow one to carry out an independent monitoring of the balance of carbon dioxide in the atmosphere on the basis of information from different satellites. According to expert estimates the CO₂ component is over 75 % of the total greenhouse gas emissions within the territory of Ukraine. We propose to use satellite data for the estimation of the balance of natural and anthropogenic emissions of carbon dioxide and its absorption by vegetation photosynthetic activity of large areas and for the monitoring of the CO₂ content in the atmosphere in different landscapes of various climatic zones and territorial units of Ukraine.

УДК 528.813:(633.1:553.981)(477)

В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін, А. І. Воробйов

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ ПШЕНИЦІ НАД ГАЗОВИМ РОДОВИЩЕМ (ПІДЗЕМНИМ ГАЗОСХОВИЩЕМ) ЗА ДАНИМИ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНОЇ ЗЙОМКИ

Досліджено зміни вегетаційних індексів позиції червоного краю REP та мерсієвського наземного хлорофільного індексу TCI під впливом просочування природного газу за даними польової зйомки пшениці над Глібовським газовим родовищем (Крим) та за його межами з 27 травня по 29 травня 2010 р. з метою виявлення газопошукових індексів. Встановлено зменшення величин REP і TCI над газовим родовищем щодо їхніх середніх значень за межами родовища та сильну кореляцію між REP і TCI з коефіцієнтом $r = 0.987$, що свідчить про потенційну можливість TCI слугувати одним із газопошукових індексів.

ВСТУП

Аномальні концентрації природного газу в ґрунті можуть бути наслідком просочування із газових родовищ та газосховищ, так і витіканням із підземних трубопроводів. Встановлено, що у розвитку рослин, які ростуть у місцях із підвищеним вмістом газу в ґрунті, відбуваються зміни, які впливають на спектри відбиття рослинності: зменшується відбиття у ближній інфрачервоній зоні та збільшується відбиття у червоній зоні спектру, що призводить до зміни нахилу спектральної кривої в області червоного краю $\lambda\lambda$ 650–760 нм. Гіперспектральне дистанційне зондування рослинного покриву над газовими родовищами та газопроводами може бути використане для виявлення цих змін за допомогою різноманітних вегетаційних індексів [1, 4–11], визначених в області червоного краю, які є характеристиками вегетаційного стресу.

Так, в роботі [8] досліджувався вплив підвищених концентрацій природного газу на траву, озиму пшеницю та біб, які росли на дослідних ділянках в польових умовах, з використанням відношення похідних спектру на довжинах хвиль $\lambda\lambda$ 725 та 702 нм. При цьому встановлено [8], що

відношення похідних спектрів відбиття для рослин, що росли на загазованій ділянці, були меншими, ніж на контрольній.

В роботах [4–7] досліджувався вплив просочування підземних газоподібних вуглеводнів на позицію червоного краю REP [2, 3] спектрів відбиття рослин, який проявлявся у зменшенні величини REP. Результати цих досліджень використано в роботах [5, 10] для встановлення місць витікання газу із підземного трубопроводу за даними гіперспектральної аерозйомки сенсора НуМар рослинного покриву над трубопроводом. Роботи [9, 11] присвячені розробці методів візуалізації даних гіперспектральної аерозйомки для моніторингу стану рослинності над трубопроводом, забезпечуючи газові компанії інформацією про місця можливих витоків газу із підземних трубопроводів.

Вплив просочування природного газу (метану) із газового родовища на спектри відбиття пшениці за польовими даними спектрометричної зйомки вперше досліджувався авторами в роботі [1]. Вивчалися варіації індексів червоного краю: мерсієвського наземного хлорофільного індексу TCI [2] та позиції червоного краю REP над газовим родовищем та за його межами на одному з маршрутів польової зйомки, де встановлено, що у спектрах відбиття пшениці над газовим родови-

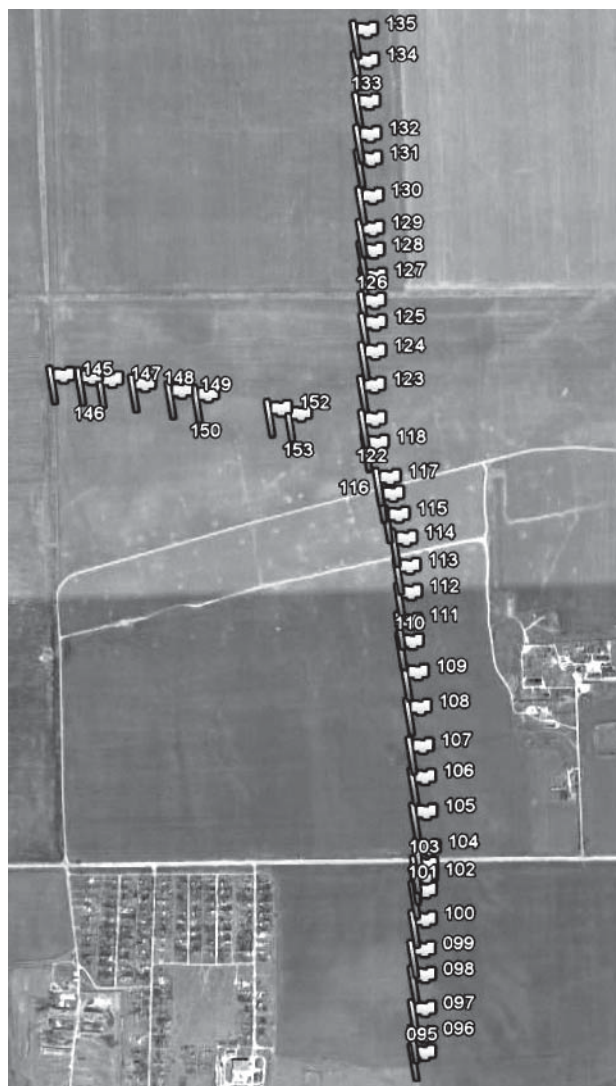


Рис. 1. Схема маршрутів проведення спектрометричної зйомки на Глібовському газовому родовищі в травні 2010 р.: маршрут від 27 травня 2010 р. (22 точки з номерами 95—116); маршрут від 28 травня 2010 р. (15 точок з номерами 118, 123—135); маршрут від 29 травня 2010 р. (8 точок з номерами 145—150, 152, 153)

щем величини *REP* і *TCI* зменшуються порівняно із їхніми значеннями за межами родовища.

В даній роботі продовжується дослідження характеру змін індексів червоного краю *TCI* та *REP* на розширеній множині даних спектрометричної зйомки пшениці над Глібовським газовим родовищем (газосховищем) спектро радіометром FieldSpec® 3 FR на трьох маршрутах зйомки від

27 травня по 29 травня 2010 р. Крім того, в роботі досліджуються також кореляційні зв'язки між *REP* і *TCI* з метою виявлення можливостей індексу *TCI* слугувати одним із пошукових індексів при розвідуванні родовищ вуглеводнів.

ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ТА АНАЛІЗ ДАНИХ СПЕКТРОМЕТРУВАННЯ

Відомо, що більші високі об'єми міграції вуглеводнів із родовищ нафти і газу спостерігаються в зонах розломів, а найбільш активно ці процеси відбуваються над газовими родовищами. Тому оцінювання використання дистанційних методів зондування для прогнозу нафтогазоперспективних об'єктів проведено на ділянці Глібовського газового родовища.

Глібовське підняття — це субширотна брахіантикліналь, яка виділяється у палеогенових відкладах. Розміри її по ізогіпсі 1090 м становлять 5.5 на 2.0 км, а амплітуда підняття — 210 м. Поклади газоконденсату знаходяться у карбонатних породах нижнього і верхнього палеоцену. Більшість запасів газу приурочена до органогенно-детритових вапняків нижнього палеоцену потужністю до 140 м. Товщина покрівлі, яка залягає над покладами газу, приблизно дорівнює 70 м. Розробка родовища проводилась з 1966 по 1986 рр., а у 1993 р. воно було переведене у сховище газу із запасами близько 388.6 млн кубічних метрів.

Спектрометрування пшениці над Глібовським газовим родовищем проводилося дистанційно в сонячну погоду протягом трьох днів з 27 травня по 29 травня 2010 р. портативним спектро радіометром FieldSpec® 3 FR. Вимірювання приладу охоплює діапазон $\lambda\lambda = 350\text{—}2500$ нм. Схему маршрутів наземної спектрометричної зйомки з номерами точок, в яких здійснювалось вимірювання спектрів відбиття озимої пшениці, наведено на рис. 1.

Маршрут наземної зйомки в перший день охоплював фонову ділянку [1] за межами покладу (точки 95—105) і ділянку над покладом (точки 106—116). Його протяжність приблизно 2000 м. На другий день проведено спектрометрування пшениці в 15 точках маршруту протяжністю приблизно 1500 м, який за напрямком був продовженням попереднього. Третій маршрут зйомки

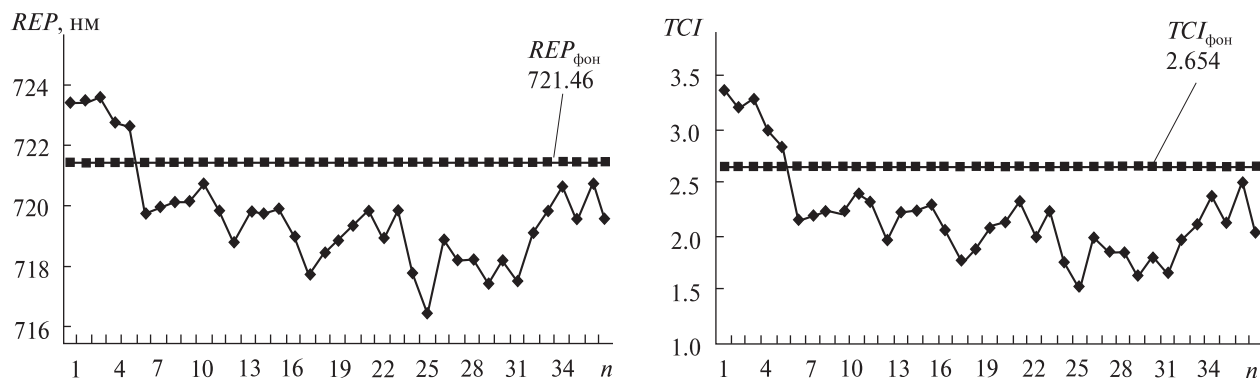


Рис. 2. Значення вегетаційних індексів REP і TCI , обчислені за даними спектрометрування озимої пшениці у 37 точках зйомок n (від 95-ї до 135-ї) маршрутів зйомки від 27 і 28 травня 2010 р. над Глібовським газовим родовищем

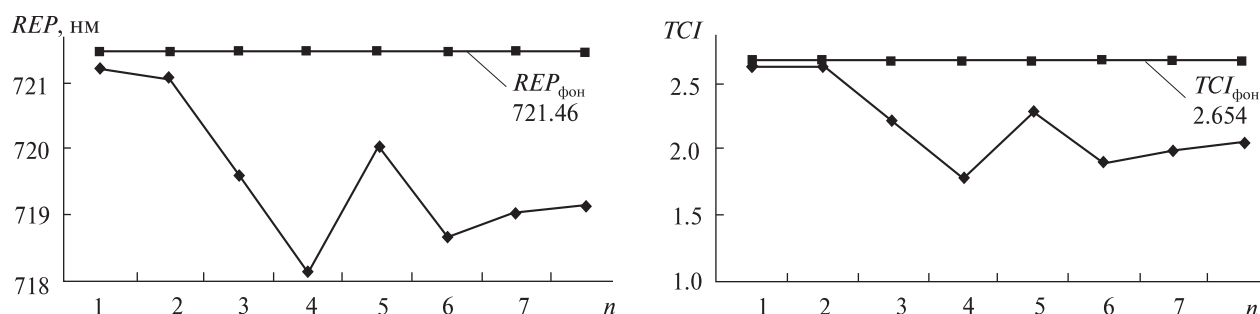


Рис. 3. Те ж для восьми точок (від 145-ї до 153-ї) маршруту зйомки від 29 травня 2010 р.

від 29 травня 2010 р. протяжністю приблизно 800 м охоплював вісім точок і проходив в напрямку, майже перпендикулярному до перших двох, перетинаючи їх в околі 122-ї точки. Вимірювання спектрів відбиття пшениці здійснювалося в 45 точках. В кожній точці обчислювалось значення вегетаційних індексів REP і TCI за формулами

$$REP = 701 + 41 \frac{(\bar{R} - R(701))}{(R(742) - R(701))}, \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R(671) + R(783)}{2},$$

$$TCI = \frac{R(754) - R(708)}{R(708) - R(681)}. \quad (2)$$

де $R(\lambda)$ — значення спектрометричного коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ .

Графіки вегетаційних індексів на маршрутах наведено на рис. 2 і 3. Надалі в тексті при посиланні на номер n точки на рис. 2—3 відповідний номер на схемі маршруту зйомки (рис. 1) вказується

в дужках. Зауважимо, що на рис. 2 і 3 віддалі між точками не відповідає віддалі між ними на місцевості. Згідно з даними обчислень значення REP змінюються від 716.43 нм в точці 25 (123) до 723.57 в точці 3 (97). Різниця між максимальним і мінімальним значеннями становить 7.14 нм. Фонове значення $REP_{\text{фон}}$, обчислене як середнє арифметичне на перших 11 точках маршруту зйомки від 27 травня 2010 р. (рис. 2), становить $REP_{\text{фон}} = 721.46$ нм. Різниця між фоновим і мінімальним значеннями в точці 25 (123) дорівнює 5.03 нм. Максимальна величина синього зсуву дорівнює 5.03 нм. Характерною особливістю точок зйомки на маршруті від 29 травня 2011 р. (рис. 3) є те, що значне зменшення REP щодо фонових значень спостерігається у всіх точках, за винятком точок 1 (145) і 2 (146), де значення REP близькі до фонових, що може свідчити про межу газової аномалії, яка пролягає між точками 2 (146) і 3 (147). Найбільша величина голубого зсуву зафіксована в точці 4 (148) і дорівнює 3 нм.

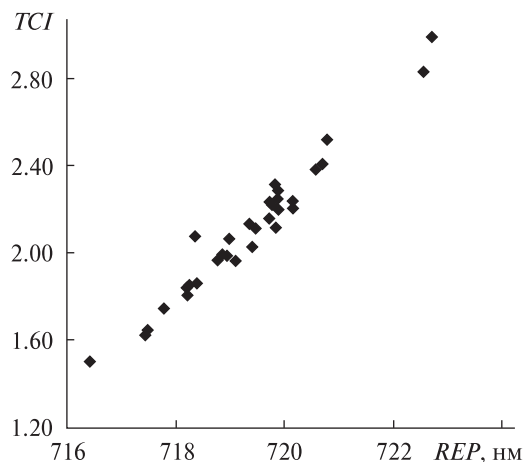


Рис. 4. Корелятивний зв'язок між величинами TCI і REP за даними обчислень в 37 точках маршрутів зйомки (див. рис. 2)

Згідно з даними обчислень наземного хлорофільного індексу TCI його значення змінюються від 1.505 в точці 25 (123) до 3.378 в точці 1 (95) на рис. 2. Фонове значення $TCI_{\text{фон}}$, обчислене як середнє арифметичне на перших 11 точках маршруту від 27 травня 2010 р., становить 2.654. Різниця між мінімальним і фоновим, а також максимальним і фоновим значеннями дорівнює -1.049 і 0.724 відповідно. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями TCI дорівнює 1.873. Щодо значень TCI в точках зйомки на маршруті від 29 травня 2010 р. (рис. 3), то характерними для них є, як і для значень REP , відхилення від фонового значення (зменшення) в усіх точках, за винятком точок 1 і 2 (145 і 146 на рис. 1), де значення TCI збігаються із фоновим з точністю до другого знаку після коми.

Як впливає із наведених вище результатів, індекси REP і TCI в умовах вегетаційного стресу, спричиненого просочуванням природного газу над газовим родовищем, мають зменшені значення, ніж за межами родовища, причому обидва індекси досягають глобального мінімуму в одній і тій же 25 (123) точці на рис. 2. Локальні мінімуми двох індексів теж досягаються в одних і тих же точках. Аналізуючи зміни індексів REP і TCI (рис. 2), можна чітко виділити піки двох аномалій, які характеризуються значеннями зсувів REP , величина яких перевищує 3 нм, в синю зону спек-

тру та зменшенням значень TCI щодо фонового значення 2.654 на величину, яка перевищує 0.79. Ці аномалії мають місце (рис. 2) в точках 17 (111), 18 (112) та в околі точки 25 (123), де аномалії мають місце в точках від 24-ї (122) до 31-ї (112).

На рис. 4 показано корелятивну залежність величин TCI і REP в 37 точках маршрутів зйомки (рис. 2). Як видно із проведених обчислень та рис. 2–4 між цими індексами є явна кореляційна залежність. Значення коефіцієнта кореляції між REP і TCI для всіх точок спектрометричної зйомки за формулою Пірсона становить

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{45} (REP_i - \overline{REP})(TCI_i - \overline{TCI})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{45} (REP_i - \overline{REP})^2 \sum_{i=1}^{45} (TCI_i - \overline{TCI})^2}} = 0.987, (3)$$

де REP_i , TCI_i — значення індексів в точці з порядковим номером i ($i = 1, 45$), $\overline{REP} = 719.66$, $\overline{TCI} = 2.1960$ — середні арифметичні значення.

Високе значення r свідчить про майже лінійну залежність між цими величинами і можливість використання індексу TCI як індикатора вегетаційного стресу, спричиненого просочуванням природного газу над газовим родовищем. Зауважимо, що дослідження змін вегетаційного індексу TCI під впливом просочування природного газу та корелятивного зв'язку з індексом REP проведено вперше. Воно є важливим ще і тому, що встановлює потенційну можливість індексу TCI слугувати також одним із газопошукових індексів, який можна використовувати у тому випадку, коли в області червоного краю є відповідні значення коефіцієнтів відбиття лише на трьох довжинах хвиль, а для обчислення REP інформації не вистачає.

На нашу думку, це може дозволити використання з газопошуковою метою сенсорів, які мають у зоні червоного краю необхідні три канали та відповідну просторову розрізненість, як наприклад RapidEye (<http://www.rapideye-satellite.ru/satellite.ru/satellites.html/>).

ВИСНОВКИ

Проведено дослідження наявності аномалій індексів червоного краю REP та TCI , обчислених за гіперспектральними даними спектрометрування

пшениці над покладом вуглеводнів Глібовського родовища спекторадіометром FieldSpec® 3 FR.

Досліджено характер змін індексів червоного краю: позиції червоного краю *REP* та наземного хлорофільного індекса *TCI* спектрів відбиття пшениці з метою виявлення пошукового сигналу над покладами вуглеводнів. Встановлено, що в місцях аномально високих концентрацій газоподібних вуглеводнів у ґрунті значення *REP* та *TCI* зменшуються порівняно із їхніми значеннями для фонові ділянки за межами родовища.

Таким чином, гіперспектральне дистанційне зондування рослинного покриву над родовищами газу може бути використане для визначення цих змін. Особливо ефективним є метод комплексного використання двох вегетаційних індексів *REP* та *TCI*. Реагуючи на зміну вмісту хлорофілу в рослинах, ці величини мають менші значення, ніж фонові величини за межами покладу. Вони можуть виявляти вегетаційні стреси у місцях збільшених концентрацій природного газу в ґрунті та слугувати нафтогазопошуковими індексами. Через сильну кореляцію між *REP* та *TCI* ($r = 0.987$) індекс *TCI* може слугувати потенційним газопошуковим індексом. Його можна використовувати у тому випадку, коли в області червоного краю є відповідні значення коефіцієнтів відбиття лише на трьох довжинах хвиль, а для обчислення *REP* інформації не вистачає.

На нашу думку, це може дозволити використання з газопошуковою метою сенсорів, які мають в зоні червоного краю необхідні три канали та відповідну просторову розрізненність, як наприклад RapidEye.

1. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М. та ін. Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем // *Космічна наука і технологія*. — 2010. — **16**, № 6. — С. 5—10.
2. Dash J., Curran P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index // *Int. J. Remote Sens.* — 2004. — **25**. — P. 5403—5413.
3. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance // *Int. J. Remote Sens.* — 1983. — **4**. — P. 273—288.
4. Noomen M. F. Hyperspectral reflectance of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage: Ph.D. Dissertation. — Enschede, the Netherlands: International Institute for Geo — International Science and Earth Observation, 2007. — N 145. — 167 p.
5. Noomen M. F., Skidmore A. K., van der Meer F. D. Detecting the influence of gas seepage on vegetation using hyperspectral remote sensing // 3-th EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy. Herrsching 13—16 May, 2003. — P. 252—256.
6. Noomen M. F., Skidmore A. K., van der Meer F. D., et al. The influence of gas pipeline leakage on plant development and reflectance // *Remote Sens. Applications.* — 2004. — P. 637—642. — (25-th ACRS 2004, Thailand).
7. Noomen M. F., van der Meer F. D., Skidmore A. K. Hyperspectral remote sensing for detecting the effects of three hydrocarbon gases on maize reflectance // *Proc. of the 31-st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment: Global monitoring for sustainability and security*; Saint-Petersburg, 20—24 June, 2005. — ICRSE International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2005. — 4 p.
8. Smith K. L., Steven M. D., Coils J. J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks // *Remote Sens. Environ.* — 2004. — **92**, N 2. — P. 2007—2017.
9. Van der Meijde, van der Werff H., Jansma F., et al. A spectral-geophysical approach for detecting pipeline leakage // *Int. J. Applied Earth observation and Geoinformation.* — 2009. — **11**, N 1. — P. 77—82.
10. Van der Werff H. M. A., Noomen M. F., van der Meijde M., et al. Use of hyperspectral remote sensing to detect hazardous gas leakage from pipelines // *New developments and challenges in remote sensing* / Ed. by Z. Bochenek. — Rotterdam: Millpress, 2007. — P. 707—714.
11. Van der Werff H., van der Meijde M., Jansma F., et al. A spatial-spectral approach for visualization of vegetation stress resulting from pipeline leakage // *Sensors.* — 2008. — **8**. — P. 3733—3743.

Надійшла до редакції 21.11.11

V. I. Lyalko, Z. M. Shportjuk, O. N. Sibirtseva,
S. S. Dugin, A. I. Vorobiev

AN INVESTIGATION OF CHANGES IN VEGETATION INDICES FOR WHEAT OVER A GAS FIELD (UNDERGROUND GAS STORAGE FACILITY) ON THE BASIS OF HYPERSPECTRAL DATA

Some changes in values of vegetation indices for the red edge position (REP) and MERIS terrestrial chlorophyll index (TCI) affected by natural gas leakage are investigated. The study is made on the basis of the field survey of wheat crops over the Hlibovske gas field (Crimea) and beyond its boundaries from 27 May to 29 May 2010 which was aimed to reveal gas searching indices. Some decrease in REP and TCI values over the gas field relative to their mean ones beyond the gas field boundaries is found and some strong correlation between REP and TCI with $r = 0.987$ is detected. This testifies that the TCI is potentially one of the gas searching indices.

УДК 528.3

Н. І. Каблак¹, С. Г. Савчук²

¹ Ужгородський національний університет, Ужгород

² Національний університет «Львівська політехніка», Львів

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ АТМОСФЕРИ

Система дистанційного моніторингу атмосфери призначена для отримання інформації про стан атмосфери. Принцип роботи дистанційного моніторингу атмосфери базується на реєстрації і обробці радіосигналів GNSS. Сучасні мережі активних референціальних станцій дають змогу розв'язувати не тільки практичні задачі з геодезії та навігації, але й суто наукові задачі, що мають важливе значення у науках про Землю.

ВСТУП

Атмосфера Землі переважно поділяється на дві основні оболонки — тропосферу та іоносферу, оскільки умови поширення супутникових сигналів в цих двох частинах різні:

- тропосфера (нейтральна атмосфера) є більш низькою частиною атмосфери і простягається від поверхні Землі до висоти 20 км. Поширення сигналу залежить головним чином від температури, тиску та вмісту водяного пару в атмосферних шарах. Для мікрохвильової довжини хвилі нейтральна атмосфера не є дисперсною.

- іоносфера — верхня частина атмосфери. Розташована між 70 та 1000 км над поверхнею Землі. Поширення сигналу переважно затримують вільно заряджені частинки. Іоносфера є дисперсним середовищем для мікрохвильових сигналів. Тому є можливість виключення впливу іоносфери на поширення радіосигналу, проводячи спостереження на двох частотах.

Виникнення затримки сигналу у тропосфері пов'язано з наявністю в тропосфері молекул азоту, кисню, вуглекислого газу і водяної пари. Під дією зовнішньої радіохвилі ці молекули поляризуються і створюють додаткові електричні струми в тропосфері. В результаті сумарні струми вже відрізняються від струмів у вакуумі, що призводить до зменшення фазової швидкості радіохвилі, яка

безпосередньо залежить від концентрації молекул. Отже, виміри додаткової затримки радіосигналу при поширенні в тропосфері дають інформацію про інтегральні властивості атмосфери уздовж траєкторії поширення радіосигналу. При обробці даних спостережень із космічних апаратів отримують додаткову інформацію у вигляді файлів тропосферних затримок радіосигналів, що реєструються GNSS-приймачами. Через сильну кореляцію між вмістом водяної пари в атмосфері і тропосферною затримкою поширення GNSS-сигналу, можна оцінити інтегровану осаджену водяну пару (IPWV — Integrated Precipitable Water Vapor) в атмосфері із GNSS-вимірювань. Як відомо, цей параметр має вирішальне значення для синоптиків (метеорологів), оскільки вміст водяної пари в атмосфері є ключовим параметром у моделі погоди.

Сучасні GNSS-мережі забезпечують істотне доповнення до інших геофізичних мереж (наприклад сейсмічних, геодинамічних, гравіметричних), оскільки мають високу точність, чутливість до тривалості періоду спостереження, простоту розгортання, а також здатність виконувати вимірювання змішень від місцевих до глобальних масштабів.

В даний час дослідження тропосфери із використанням GNSS-спостережень спрямовані у бік глибшого розуміння погодних і кліматичних процесів, і в кінцевому рахунку — поліпшення прогнозування погоди [2–6]. На сьогодні най-

більшим проектом у Центральній Європі, у рамках якого визначаються у майже реальному часі зенітні тропосферні затримки на регіональній мережі GNSS-станцій, є E-GVAP, а основний обчислювальний центр розміщується у Королівській обсерваторії Бельгії (ROB, <http://egvar.dmi.dk>). Мережа охоплює близько 160 станцій, більшість з яких належать перманентній мережі EPN від EUREF та Міжнародній GNSS-службі IGS. Розвинута інфраструктура даних мереж дозволяє використовувати GNSS-вимірювання для потреб метеорології. Неперервність визначення водяної пари на значних територіях дає інформацію про динаміку зміни водяної пари в атмосфері та опадів в реальному часі.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Ми передбачаємо використовувати діючу інфраструктуру національних мереж активних референсних GNSS-станцій для дистанційного зондування атмосфери з метою визначення вмісту водяної пари в атмосфері як одного із основних погодуєтворювальних факторів.

Небезпечні та стихійні гідрометеорологічні явища (зливи, шквали, річкові повені, різкі зміни погоди, снігопади, град, снігові лавини, селі тощо) завдають значної шкоди економіці та населенню України. Зростання господарського освоєння прибережних і підвладних повеням районів, нераціональна господарська діяльність людини призводять до того, що дедалі більша кількість господарських об'єктів та населення наражається на ризик негативного впливу несприятливих гідрометеорологічних явищ.

За оцінкою експертів Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) за період з 1991 по 2010 рр. понад 70 % матеріальних втрат і до 90 % випадків уражень людей на земній кулі від природних лих, спричинених метеорологічними та гідрологічними чинниками. Україна є членом ВМО. Виконання зобов'язань щодо участі України у міжнародних організаціях та договорах неможливе без даних гідрометеорологічних спостережень і прогнозів, а також спостережень за забрудненням навколишнього природного середовища, які здійснює національна гідрометеорологічна служба.

Основою діяльності гідрометеорологічної служби є функціонування цілісної державної системи спостережень і прогнозування. Це комплексна багаторівнева спостережно-інформаційна система, призначена для систематичних інструментальних спостережень гідрометеорологічних явищ, стану атмосфери, забруднення довкілля під впливом природних і антропогенних факторів.

На жаль, за рівнем технічного та технологічного оснащення гідрометеорологічна служба України відстає від потреб сьогодення і значно поступається гідрометеорологічним службам не тільки розвинутих країн світу, а й своїх сусідів Польщі, Румунії, Словаччини.

Переважає більшість з 25 тисяч засобів вимірювальної техніки, що використовується у гідрометеорологічній службі, розроблена 30—40 років тому, морально застаріла і наразі не відповідає сучасним міжнародним стандартам, зокрема вимогам ВМО та Міжнародної організації цивільної авіації. Більш ніж 90 % засобів вимірювальної техніки працюють з продовженим строком експлуатації, а близько 50 % потребують термінові заміни [www.mns.gov.ua/laws/regulations/pub.../conception_gidromet.doc].

Такий стан технічного і технологічного оснащення гідрометеорологічної служби викликає особливе занепокоєння у зв'язку з посиленням в Україні повторюваності та інтенсивності стихійних гідрометеорологічних явищ, таких, наприклад, як катастрофічні паводки на річках Закарпаття.

Проте недостатньо застосовуються в гідрометеорологічній службі сучасні супутникові технології отримання інформації. Потребують істотного розвитку теоретично-прикладні аспекти гідрометеорологічного прогнозування на основі сучасних числових моделей з використанням комп'ютерно-інформаційних технологій.

Наявність мережі активних референсних GNSS-станцій, яка базується на найсучаснішій RTK-технології і є централізованою та максимально автоматизованою, та високотехнологічної інфраструктури допомагає розв'язувати не тільки практичні задачі з забезпечення координатною основою, але й суто наукові задачі, що

мають важливе значення у всіх науках про Землю. Основною метою нашої роботи є аналізування можливостей використання потенціалу мережі активних референцних GNSS-станцій для розв'язання задач метеорології.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для вивчення атмосферних явищ та для прогнозу погоди необхідно одночасно і систематично провадити різні спостереження у багатьох пунктах на значних територіях. На території США кожної години, в Україні кожні три години провадяться спостереження погоди. Характеризується хмарність (щільність, висота і вид); знімаються покази барометрів, до яких вводяться поправки для приведення отриманих величин до рівня моря; фіксуються напрям і швидкість вітру; вимірюються кількість рідких або твердих опадів, температура повітря і ґрунту; визначається вологість повітря; ретельно фіксуються умови видимості та інші атмосферні явища (гроза, туман і т. п.).

Атмосферні процеси розвиваються хаотично. Це означає, що для прогнозу різних явищ у різному просторово-часовому масштабі потрібні і різні підходи, зокрема для прогнозу поведінки великих циклонів помірних широт і локальних сильних дощів, а також для довгострокових прогнозів.

Оперативний прогноз погоди зазвичай базується на спостереженнях відносної вологості поряд з тиском і температурою, що визначаються за допомогою радіозондів і наземних метеорологічних приладів. Радіозонди запускаються два рази на добу і визначають профілі зміни атмосферного тиску, температури повітря та відносної вологості повітря в атмосфері. Один з головних недоліків радіозондів — це відносно низька точність датчиків в результаті їхнього забруднення під час запуску.

З іншого боку, кількість водяної пари може бути визначена радіометрами. Радіометри забезпечують зазвичай дуже точні дані, але прилад є надто дорогим, а його виміри ненадійні під час опадів. Крім того, радіозонди та наземні або космічні радіометри водяної пари розташовані на значних відстанях, і дискретність їхніх вимі-

рювань низька. Отже, просторова і часова роздільна здатність методів вимірювань дуже мала і залежить від погодних умов.

Таким чином, є необхідність подальшого розвитку методів і засобів дистанційного зондування атмосфери, які, з одного боку, давали б високу точність вимірювання вологості повітря, а з іншого боку, були б доступними, надійними, простими і економічними в експлуатації.

Перевагою дистанційного методу зондування атмосфери є можливість його реалізації на сучасній GNSS-інфраструктурі (мережі активних референцних станцій з єдиним центром управління), а також те, що дані вимірювання не залежать від погодних умов: падіння дощу та наявності хмар. Розвинута інфраструктура мереж референцних станцій на територіях України дозволяє визначати та прогнозувати динаміку змін водяної пари та опадів у реальному часі для вирішення проблеми своєчасного прогнозування стихійних явищ, екологічного та кліматичного моніторингу.

Використання оперативної інформації про вміст водяної пари в атмосфері в числових моделях прогнозу погоди дозволить поліпшити деталізацію даних і точність регіональних короткострокових прогнозів погоди. Адже можна вважати, що радіосигнал при GPS-спостереженнях проходить крізь атмосферу Землі миттєво. Тобто, враховується реальний стан нестабільної атмосфери. Завдяки щосекундним (неперервним) GPS-вимірюванням слід очікувати високу точність визначення осадженої водяної пари.

Закарпатська служба визначення положення — ZAKPOS (Transcarpathian Positioning Service) є місцевою ініціативою та проектом встановлення однорідної базової інфраструктури диференційного GNSS (DGNSS) на території Закарпатської області. За своєю суттю це регіональна GNSS-система наземного базування, що працює за європейськими стандартами, і забезпечує GNSS-даними спостережень та поправками до них в реальному часі (RTK) для високоточного визначення місцеположення. Така фундаментальна інфраструктура технічно базується на мережі активних референцних GNSS-станцій та відповідних лініях зв'язку. Реально робота

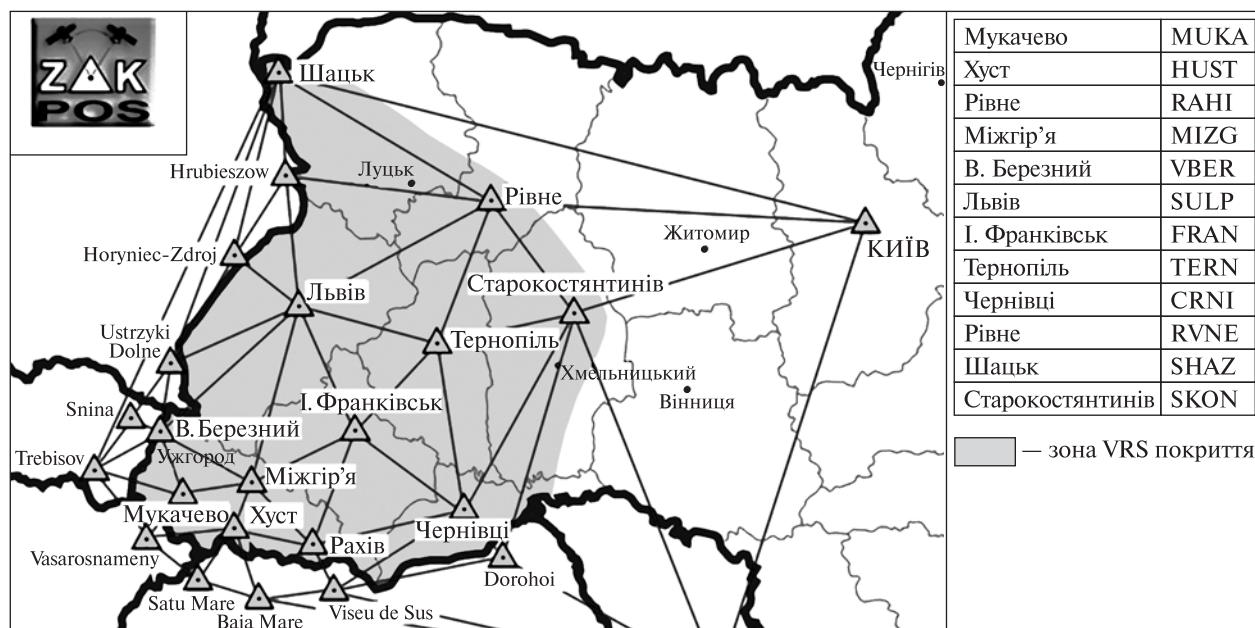


Рис. 1. Загальна схема GNSS мережі UA-EUPOS/ZAKPOS станом на травень 2011 р.

над створенням проекту мережі референсних станцій ZAKPOS на території Закарпаття розпочалася ще під час виконання госпдоговору № 0116/055-Н з Державним комітетом України із земельних ресурсів у 2006 р. На початку лютого 2009 р. було введено в дію мережу GNSS-станцій ZAKPOS, що складалася на той час із п'яти референсних станцій. На середину 2010 р. дана мережа об'єднувала 17 станцій, на кінець 2010 р. — 28 станцій, і в результаті вона стала мережею національного масштабу під новою назвою UA-EUPOS [1, 7]. На рис. 1 подано схему мережі активних референсних GNSS-станцій UA-EUPOS/ZAKPOS на травень 2011 р. (www.zakpos.zakgeo.com.ua).

Аналогічні мережі діють у багатьох країнах світу, найближчими до нас є активні мережі референсних станцій SKPOS (Словаччина), CZEPOS (Чехія), APOS (Австрія), SAPOS (Німеччина), ASG-EUPOS (Польща) тощо.

Розвинута інфраструктура мереж референсних станцій на територіях даних країн дозволяє визначати та прогнозувати динаміку зміни водяної пари в атмосфері, а отже опадів в реальному часі.

В результаті первинної обробки результатів GNSS вимірювань визначають відстані від стан-

ції спостережень до GNSS-супутників. Вторинна обробка GNSS-вимірювань полягає у вирішенні навігаційної задачі і дає інформацію про місцезнаходження станції. Для отримання метеорологічної інформації необхідна розробка спеціальних методів вторинної обробки даних, що базуються на розв'язуванні обернених задач.

Обробка отриманих даних методами розв'язку оберненої задачі моделювання стану атмосфери дозволить визначити висотні залежності температури та вміст водяної пари в атмосфері.

Сукупне об'єднання даних первинної та вторинної обробки разом із додатковою метеорологічною інформацією дозволить отримати глобальну модель атмосфери практично в режимі реального часу, що дасть можливість провадити:

- високоточний метеорологічний моніторинг розподілу температури, вологості і тиску, розподілу водних парів;
- спостереження розподілу турбулентних потоків різної природи в атмосфері;
- моніторинг стану атмосфери.

Подальше використання отриманих даних сприяє ефективнішим метеорологічним і кліматичним дослідженням, вивченню впливу сонячної активності та антропогенних чинників на

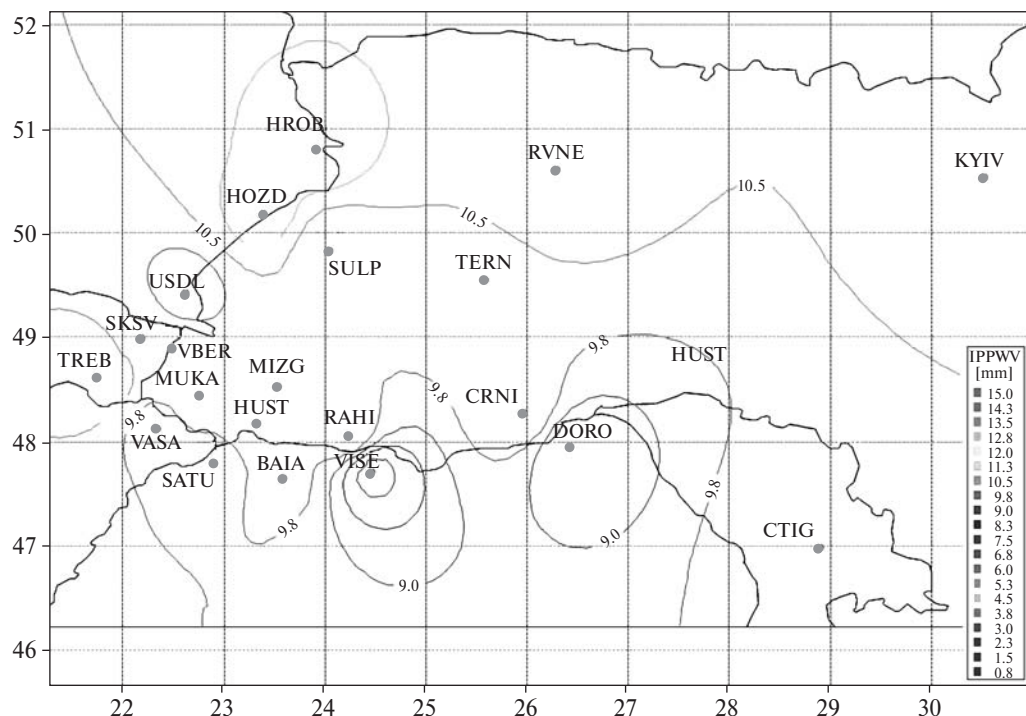


Рис. 2. Інтегрована осаджена водяна пара (IPWV) у Trimble Atmosphere App

стан атмосфери, аналізу зв'язків сейсмічної активності зі станом атмосфери. Сукупним результатом даної роботи є перехід на якісно вищий рівень розуміння фізичних процесів, досліджуваних багатьма областями знань, особливо метеорології.

В обчислювальному центрі мережі UA-EUPOS/ZAKPOS використовується мережеве програмне забезпечення від фірми Trimble (США), одного із світових лідерів у галузі GNSS-технологій.

GNSS інфраструктура від фірми Trimble на даний час має два нові програмні додатки:

- Trimble VRS³Net™ App
- Trimble Atmosphere App

Trimble VRS³Net™ App є останньою версією Trimble VRS³Net. Програмний продукт VRS³Net™ App забезпечує операторів активної мережі базових GNSS-станцій високо інтегрованим набором інструментів, необхідних для управління мережею.

Trimble Atmosphere App — нова інфраструктура App підтримує обчислення та аналіз інтегрованої

випадної водяної пари (IPWV) і повного вмісту електронів в іоносфері (TEC). Цей модуль може розраховувати атмосферні умови, базуючись на GNSS-спостереженнях, і даних метеорологічних приладів з метеостанцій, радіозондів тощо. *Atmosphere App* повністю підтримується поточною інфраструктурною стратегією Trimble і базується на технології VRS³Net.

Особливістю у *Atmosphere App* є те, що модуль дозволяє обчислювати значення як IPWV, так і TEC не з поодиноких GNSS-станцій, а з мережі перманентних станцій. При цьому IPWV обчислюється з використанням наземних метеорологічних даних, таких як температура і тиск, а також даних радіозондувань. Результати представляються в табличній формі, а також в різноманітних графічних формах. На рис. 2 подано значення IPWV, визначене на основі оперативного опрацювання GNSS-даних з мережі референційних станцій UA-EUPOS/ZAKPOS у вигляді ізоліній. Завдяки введенню в дію та постійній експлуатації української мережі активних референційних стан-

цій ZAKPOS/UA-EUPOS в даний час є можливість опрацювання GNSS IPWV-даних в режимі реального часу з дискретністю 1 хв.

Розробка методів отримання інформації про просторовий розподіл водяної пари в атмосфері за даними реєстрації GNSS-сигналів дозволить вийти на якісно новий рівень метеорологічного забезпечення, підвищити якість метеорологічних прогнозів погоди і поліпшити точність позиціонування користувачів навігаційних систем ГЛОНАСС і GPS.

ВИСНОВКИ

Оперативність даного підходу, повна автоматизація та відсутність витратних матеріалів при здійсненні дистанційного зондування відкривають можливості до широкого впровадження у практику неперервного та оперативного контролю за станом атмосфери з метою покращення деталізації даних і підвищення точності регіональних короткострокових прогнозів погоди.

На основі GNSS-спостережень у мережі станцій ZAKPOS/UA-EUPOS та даних транскордонної співпраці із Європейськими країнами, ми можемо мати точну, щільну і часту вибірку значень IWV на значних територіях, що дозволяє визначати і прогнозувати динаміку зміни водяної пари в реальному часі.

Дистанційний моніторинг атмосфери створює потужну систему та основу для розвитку транскордонного співробітництва у напрямку підвищення точності попередження складних метеоумов на транскордонній території (надмірні опади дощу, снігу, граду, виникнення обледеніння, сильних шквалів тощо), прогнозу виникнення небезпечних стихійних явищ (паводків, селевих потоків, зсувів, сходження снігових лавин у горах) та можливих екологічних загроз, до яких вони можуть призвести (потрапляння стічних вод у річки, джерела питної води, загрози виникнення небезпечних інфекцій, забруд-

нення атмосфери, екологічних катастроф), тому що чим більшою є територія вивчення, тим точнішим буде прогноз.

1. Гринишина-Полюга О. Я. Порівняльна характеристика визначення координат активних референсних станцій мережі ZAKPOS/UA-EUPOS за даними спостережень 2009—2010 рр. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 2010. — Вип. 73. — С. 7—13.
2. Каблак Н. І. Моніторинг осадженої водяної пари на основі обробки ГНСС-даних // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 4. — С. 65—73.
3. Каблак Н. І., Клімук В. У., Швалагін І. В., Каблак У. І. Моніторинг випадваючої водяної пари за допомогою GPS для прогнозування погоди // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 5/6. — С. 163—166.
4. Devis M., Businger S., Herring T. A., et al. GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // J. Geophys. Res. — 1992. — 97. — P. 15,787—15,801.
5. Elgered G., Plag H. P., Van der Marel H. Exploitation of groundbased GPS for operational numerical weather Prediction and Climate Applications. — EC/COST, EUR, 2005. — 234 p.
6. Mendes V. B., Langley R. B. Tropospheric zenith delay prediction accuracy for airborne GPS high-precision positioning // Proceedings of The Institute of Navigation 54th Annual Meeting, Denver, CO, USA., 1—3 June 1998. — Denver, 1998. — P. 337—347.
7. Savchuk S., Kalynych I., Prodanets I. Creation of ZAKPOS active network reference stations for Transcarpatian Region of Ukraine // Int. Symp. Global Navigation Satellite Systems, Spacebased and Ground-based Augmentation Systems and Applications, Berlin, 11—14 November 2008. — EUPOS Presentations.

Надійшла до редакції 01.10.11

N. I. Kablak, S. G. Savchuk

DISTANT MONITORING OF THE ATMOSPHERE

The distant monitoring of the atmosphere is designed to obtain some information on the atmosphere state. The principle of the distant monitoring of the atmosphere is based on the detection and processing of GNSS radio signals. Modern networks of active reference stations allow one to solve not only practical problems of surveying and navigation, but also scientific problems that are important for all the Earth sciences.

А. К. Федоренко, І. В. Захаров

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Київ

СПЕЦИФІЧНИЙ КОЛИВАЛЬНИЙ РЕЖИМ У ПОЛЯРНІЙ ТЕРМОСФЕРІ

На основі аналізу спостережень на супутнику «Dynatic Explorer 2» досліджено особливості поведінки акустико-гравітаційних хвиль над полярними шапками. Встановлено, що для цих хвиль коливання вертикальної складової швидкості V_z і концентрації $\delta n / n$ відбуваються синфазно. В інтервалі висот 250–350 км властивості акустико-гравітаційних хвиль над обома полярними шапками і в різні сезони подібні. Визначено фазову горизонтальну швидкість полярних хвиль, їхній період, істинну горизонтальну довжину хвилі, вертикальну довжину хвилі, напрямок поширення по вертикалі. Значення $k_z < 0$ свідчить про поширення хвиль знизу вгору від джерел, що знаходяться нижче рівня супутника. Фазова горизонтальна швидкість складає близько 700 м/с, а кут нахилу хвильового вектора до горизонту близький до 20° .

ВСТУП

Акустико-гравітаційні хвилі (АГХ) є важливою складовою енергетики та динаміки верхньої атмосфери. Ці хвилі спостерігаються вже понад 60 років переважно наземними методами у вигляді рухомих іоносферних збурень (РІЗ). Згідно з даними наземних спостережень РІЗ/АГХ поділяються за спектральними властивостями на дві групи [6]: великомасштабні і середньомасштабні. Великомасштабні РІЗ мають горизонтальні довжини хвиль $\lambda_x > 1000$ км, періоди 0.5–3 год, фазові горизонтальні швидкості 400–1000 м/с. Появу таких АГХ в основному пов'язують з геомагнітними бурями, вони добре корелюють з рівнем геомагнітної активності і, як правило, поширюються з полярних областей в напрямку до екватора [3, 7]. Середньомасштабні АГХ з довжиною λ_x порядку сотні км, горизонтальними фазовими швидкостями 100–250 м/с і періодами 15–60 хв спостерігаються в різних широтних регіонах, проте найчастіше їх пов'язують з тропосферними та літосферними джерелами. Аналіз даних вимірювань на супутнику «Dynamics Explorer 2» (DE2) показав, що у полярних регіонах обох півкуль на висотах F2-області іоносфери систематично спостерігаються АГХ з характерними просторовими масштабами 500–650 км

і періодами 12.5–14.0 хв [1, 9]. Спостережувані над полярними шапками АГХ цікаві тим, що вони не підпадають під цю класифікацію: мають великі фазові швидкості (близько 700 м/с), як великомасштабні АГХ, проте їхні довжини хвиль і часові періоди характерні для середньомасштабних хвиль.

У полярних регіонах вплив електричних полів і висипань частинок на стан іоносфери часто виявляється більш визначальним, ніж динаміка нейтральної атмосфери. Внаслідок цього поведінка високоширотної іоносферної плазми значно ускладнюється, і зв'язок АГХ-РІЗ стає неоднозначним. Тому полярні АГХ є важкодоступними для наземних іоносферних спостережень. Кількість супутникових даних щодо параметрів нейтральної атмосфери у високих широтах також обмежена. У зв'язку з цим на сьогоднішній день полярні середньомасштабні АГХ є недостатньо вивченими.

Поширення хвиль в атмосфері супроводжується узгодженими варіаціями всіх атмосферних параметрів: концентрації, температури, тиску, швидкості, при цьому характер поляризаційних співвідношень між цими параметрами залежить від спектральних властивостей АГХ. Тому порівняння теоретичних співвідношень з експериментальним ходом різних параметрів дозволяє встановити основні спектральні характеристики

хвилі. В даній роботі для дослідження полярних АГХ використано дані вимірювань нейтральної концентрації та вертикальної складової швидкості на супутнику DE2.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

На супутнику DE2 концентрації нейтральних компонентів: атомарного кисню O, молекулярного азоту N₂, аргону Ar та гелію He вимірюва-

лись за допомогою мас-спектрометра в експерименті NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) [4]. Розподіл сумарної концентрації вздовж витка 8257 DE2 показано на рис. 1, б. Переважають гази O і N₂, концентрації яких складають 10⁸–10⁹ см⁻³. Температура і швидкість нейтральних частинок вимірювалась на DE2 в експерименті WATS (Wind and Temperature Spectrometer) [10]. Розподіл вертикальної скла-

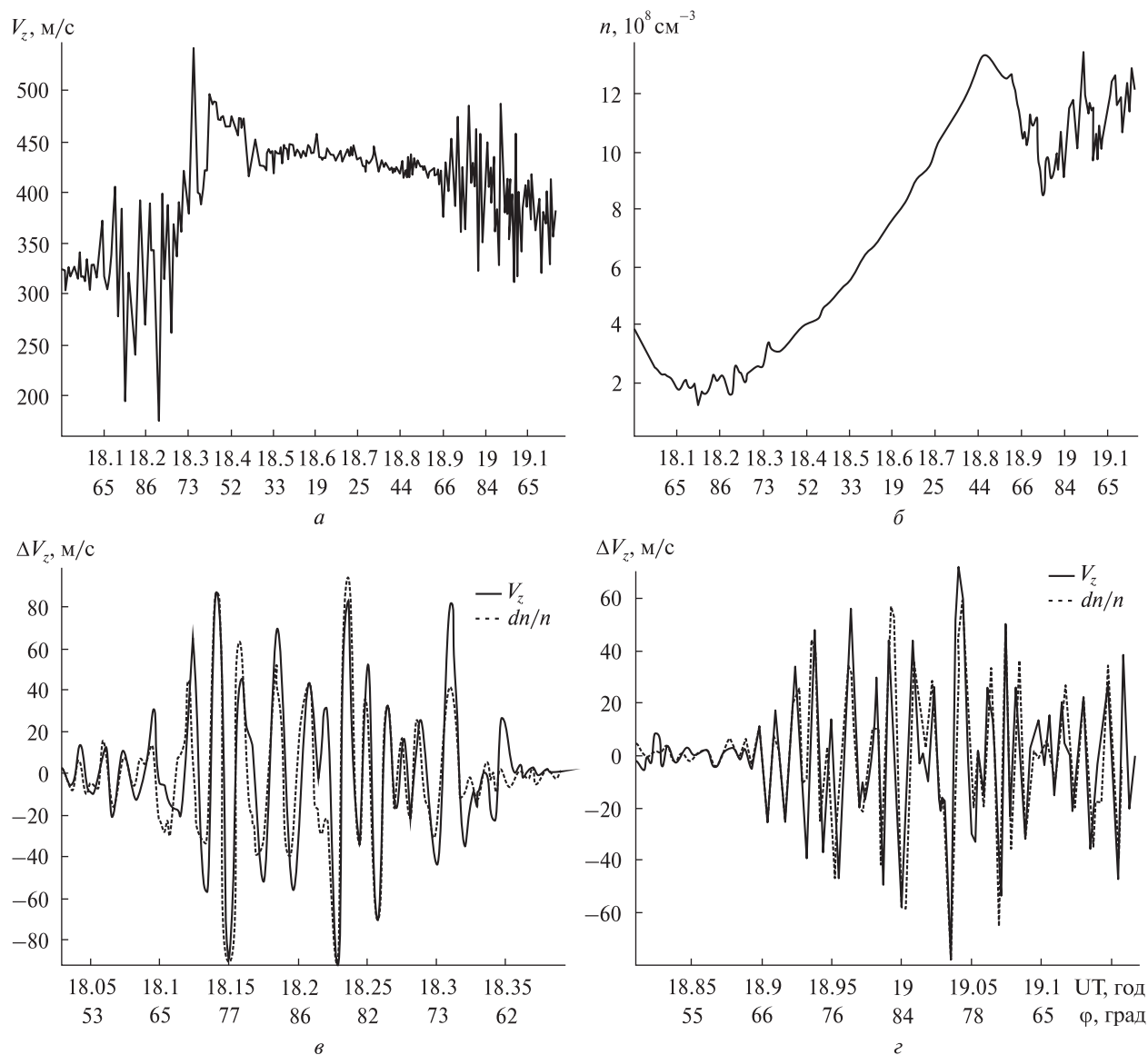


Рис. 1. Розподіл вертикальної складової V_z швидкості (а) і концентрації n нейтралів (б) вздовж витка 8257, а також порівняння варіацій V_z і n над північною (в) і південною полярними шапками (г) на цьому ж витку

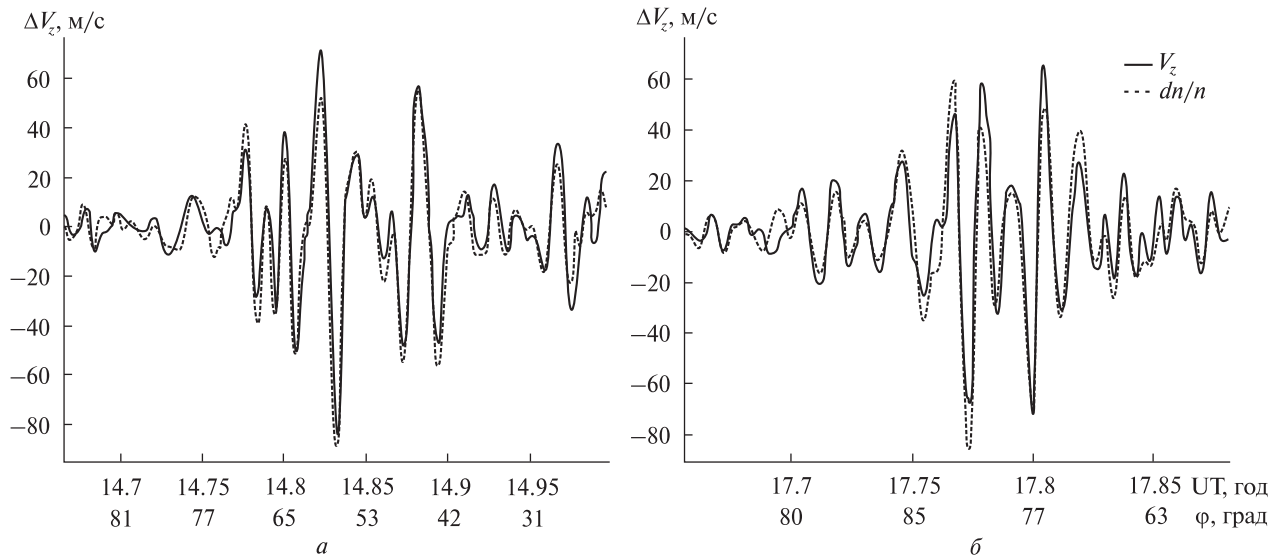


Рис. 2. Просторові профілі коливань вертикальної складової V_z швидкості та концентрації n (відносні одиниці) в полярних АГХ за даними вимірювань на DE2: *а* — північна півкуля, 20.06.82, виток 4820, *б* — південна півкуля, 21.01.83, виток 8129

дової швидкості вздовж цього ж витка показано на рис. 1, *а*. Одночасне зростання хвильової активності для обох атмосферних параметрів добре видно над обома полярними шапками. Хвильові варіації різних параметрів реєструються на фоні великомасштабних трендів іншого походження (добові зміни, висота орбіти та ін.). Як видно з рис. 1, *б*, в нейтральній концентрації найбільш наочною є зміна висоти супутника приблизно від 370 км над північною шапкою до 250 км над південною шапкою, а добові та широтні зміни менш відчутні. У складовій V_z тренд незначний, оскільки в атмосфері просто немає вертикальних рухів, швидкість яких значно перевищувала б амплітуду хвильових коливань. В даних вимірювань вертикальної швидкості тренд фізичного походження накладається на тренд інструментальний (300—400 м/с). Відокремлення хвильових змін від великомасштабного ходу параметрів здійснювалось за методом ковзного середнього, при цьому кількість точок фільтра вибиралась з умови максимальної кореляції варіацій концентрацій O і N_2 , описаною в роботі [1]. Відносні варіації концентрації $\delta n / n$ (нормування здійснюється на незбурене усереднене значення) одночасно з варіаціями вертикальної швидкості V_z на цьому ж витку показано на рис. 1,

в, г. Області підвищеної хвильової інтенсивності спостерігаються над полярними областями обох півкуль, простягаючись на кілька тисяч кілометрів, інколи — до 10 тис. км. Відносні амплітуди у варіаціях концентрації в полярних регіонах досягають 10 %, що на порядок перевищує амплітуду фонових коливань у середніх і низьких широтах (рис. 1). Подібна картина реєструвалася практично на всіх витках DE2, коли супутник опускався над полярними шапками досить низько (250—400 км). На основі зіставлення експериментальних залежностей з теоретичними поляризаційними співвідношеннями для різних параметрів ці хвильові варіації було ідентифіковано як АГХ [2, 5]. Як видно з рис. 1, коливання вертикальної швидкості і концентрації є приблизно синфазними. Подібний характер зв'язку цих параметрів спостерігається на різних витках над обома полярними шапками в різні сезони (рис. 2). Це відкриває можливості для встановлення багатьох їхніх властивостей.

ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛЯРНИХ АКУСТИКО-ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ

В основі методик визначення спектральних властивостей АГХ на базі одноточкових супут-

никових вимірювань лежить аналіз поляризаційних співвідношень між різними параметрами. Теоретичне співвідношення між амплітудою коливань вертикальної швидкості та відносними варіаціями концентрації в АГХ має вигляд [5]:

$$V_z = \frac{\omega H \left[1 - \frac{\gamma^2 H^2 k_x^2 \omega_B^2}{(\gamma - 1) \omega^2} \right]}{k_z H + i \left(\frac{\gamma \omega_B^2 H^2 k_x^2}{\omega^2} - \frac{1}{2} \right)} \frac{\delta n}{n}, \quad (1)$$

де $H = \frac{kT_n}{\bar{m}g}$ — висота однорідної атмосфери, k — стала Больцмана, T_n — температура нейтрального компонента, $\bar{m}$ — середня маса атомів і молекул, g — прискорення вільного падіння, γ — показник адиабати, k_x, k_z — горизонтальна і вертикальна складові хвильового вектора, ω — частота хвилі, $\omega_B = g\sqrt{(\gamma - 1)}/c$ — частота Брента — Вайселя, c — швидкість звуку. Спектральні параметри ω, k_x, k_z задовольняють дисперсійне рівняння АГХ [8]:

$$k_z^2 = \frac{\omega_B^2 - \omega^2}{U_x^2} - \frac{\omega_a^2 - \omega^2}{c^2}, \quad (2)$$

де $\omega_a = \gamma g / 2c$ — частота акустичної відсічки, $U_x = \omega / k_x$ — горизонтальна фазова швидкість хвилі. Враховуючи, що $c^2 = \gamma g H$, вираз (1) перепишемо у зручнішому для подальшого аналізу вигляді:

$$V_z = \frac{\omega H \left[1 - \left(\frac{c}{U_x} \right)^2 \right]}{k_z H + i \left[\frac{(\gamma - 1)}{\gamma} \cdot \left(\frac{c}{U_x} \right)^2 - \frac{1}{2} \right]} \frac{\delta n}{n}. \quad (3)$$

Залежності зсуву фаз між коливаннями вертикальної швидкості і концентрації від періоду для набору значень λ_x , близьких до спостережуваних (сотні км), показано на рис. 3. Період представлено у відносних одиницях T/T_B , де $T_B = 2\pi/\omega_B$, а довжина хвилі — в одиницях $L_x = \lambda_x / 4\pi H$. Окремі криві відповідають різним значенням L_x , близьким до спостережуваних. Обмеження кривих в області коротких періодів виникає з умови $k_z^2 > 0$. На основі (3) можна виділити два граничних випадки. Якщо період АГХ значно більший, ніж період Брента — Вайселя, а

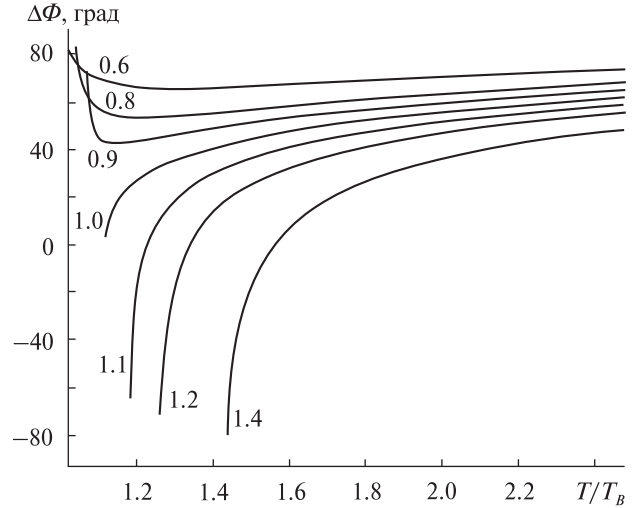


Рис. 3. Теоретична залежність зсуву фаз $\Delta\Phi$ між коливаннями вертикальної швидкості і концентрації в АГХ для $k_z < 0$ від періоду T . Числа біля кривих — значення L_x

вертикальна довжина хвилі мала порівняно з висотою однорідної атмосфери ($T^2 \gg T_B^2$, $k_z H \gg \gg 1$), коливання швидкості V_z виявляються зсунутими по фазі відносно коливань концентрації на кут, близький до $\pi/2$:

$$V_z = \frac{i\gamma\omega H}{(\gamma - 1)} \frac{\delta n}{n}. \quad (4)$$

З рис. 3 видно, що дійсно, у міру збільшення періоду і зменшення довжини хвилі зсув фаз між коливаннями швидкості і концентрації поступово наближається до $\pi/2$. Як впливає з аналізу даних DE2, над полярними шапками спостерігаються АГХ, що відповідають іншому граничному випадку — коливання вертикальної складової швидкості і концентрації відбуваються практично синфазно (рис. 1, 2). Прирівнявши до нуля уявну частину виразу (3), отримаємо, що фазова горизонтальна швидкість дорівнює

$$U_x = c\sqrt{2(\gamma - 1)/\gamma}, \quad (5)$$

і визначається лише властивостями середовища. Згідно з (5) $U_x \approx 0.9c$ для одноатомного О ($\gamma = 1.67$) і $U_x \approx 0.76c$ для двоатомного N_2 ($\gamma = 1.4$). Для суміші газів О і N_2 з процентним вмістом, що приблизно відповідає умовам спостережень на DE2, $U_x \approx 0.85c$, що при $c \approx 860$ м/с складає

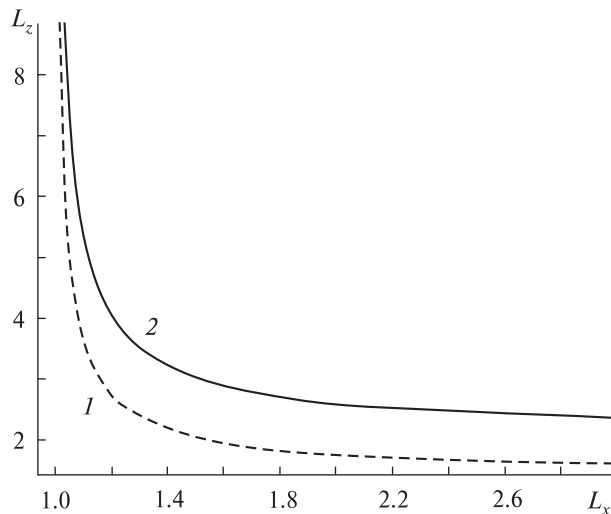


Рис. 4. Зв'язок між L_x і L_z в полярних АГХ: 1 — $\gamma = 1.4$, 2 — $\gamma = 1.67$

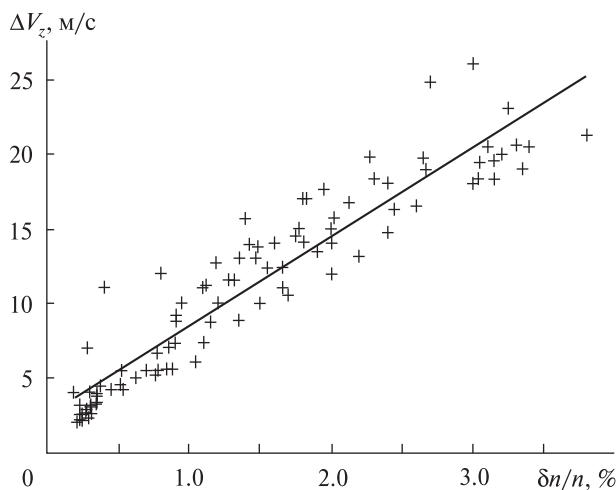


Рис. 5. Корелятивна залежність між амплітудою коливань вертикальної швидкості і амплітудою коливань концентрації в АГХ над полярними шапками

близько 730 м/с. Оскільки в АГХ завжди виконується $U_x < c$, це означає, що хвилі виникли в атмосфері не нижче 200 км (для умов середньої сонячної активності).

Оскільки чисельник у виразі (3) від'ємний, коливання швидкості і концентрації можуть відбуватися у фазі лише при $k_z < 0$, тобто джерела таких АГХ знаходяться нижче супутника. Якби джерела були локалізовані вище рівня супутника ($k_z > 0$), для АГХ з такими ж спектральними характерис-

тиками спостерігалась би протифазність коливань вертикальної швидкості і концентрації.

ГОРИЗОНТАЛЬНА ДОВЖИНА ХВИЛІ

Горизонтальна довжина хвилі — єдина спектральна характеристика АГХ, що безпосередньо вимірюється з борту супутника. Проте в однокоткових контактних вимірюваннях реєструється не істинна горизонтальна довжина λ_x , а лише її складова λ_{xs} вздовж витка, значення якої залежить від кута перетину супутником хвильового фронту. Це значно обмежує можливості супутникової діагностики хвильових процесів. Спостережувана у полярних АГХ синфазність коливань концентрації і вертикальної швидкості дозволяє опосередковано оцінити істинне значення λ_x . Підставивши в дисперсійне рівняння (2) значення горизонтальної фазової швидкості у вигляді (5), з умови $k_z^2 > 0$ отримаємо обмеження на часовий період АГХ $T > T_B \sqrt{2/\gamma}$. Звідси ж випливає і обмеження на $\lambda_x > \lambda_x^*$, де $\lambda_x^* = c T_B \cdot 2\sqrt{\gamma-1} / \gamma = 4\pi H$ (для умов спостережень на DE2 приблизно 520...560 км). У міру зменшення λ_x від граничного значення допустимий зсув фаз між коливаннями вертикальної швидкості і концентрації швидко зростає. Так, при $L_x < 0.8$ ($\lambda_x \approx 400$ км) зсув фаз між цими параметрами вже не може бути меншим за 55° при будь-яких періодах (рис. 3). З іншого боку, в спостереженнях полярних АГХ систематично переважають горизонтальні масштаби $L_x = 1...1.3$ (500—650 км) [1, 2, 9]. Оскільки вимірювана довжина хвилі може або дорівнювати (якщо фронт перетинається перпендикулярно), або бути більшою від істинної (при інших способах перетину хвильового фронту), приходимо до висновку, що істинна λ_x також належить цьому ж інтервалу. Це означає, що хвильові фронти полярних АГХ є не плоскими, а скоріше сферичними. У випадку сферичного хвильового фронту при будь-яких варіантах перетину супутником вимірюване значення довжини хвилі буде близьким до істинного.

ВЕРТИКАЛЬНА ДОВЖИНА ХВИЛІ

Для АГХ з горизонтальною фазовою швидкістю (5), дисперсійне рівняння (2) перепишемо у вигляді

$$\frac{1}{\lambda_z^2} = \frac{(2-\gamma)}{\gamma} \left[\frac{1}{(4\pi H)^2} - \frac{1}{\lambda_x^2} \right]. \quad (6)$$

Згідно з (6) граничне значення $\lambda_x^* = 4\pi H$ відповідає горизонтальному поширенню хвилі ($k_z^2 = 0$). Зв'язок між безрозмірними компонентами довжини хвилі $L_x = \lambda_x / 4\pi H$ і $L_z = \lambda_z / 4\pi H$ показано на рис. 4. Умова синфазності коливань V_z і δn виділяє гармоніки з фіксованим значенням U_x . Згідно з дисперсійним рівнянням (2) досягати такої швидкості можуть лише великомасштабні гармоніки з $L_x > 1$, $L_z > \left(\frac{\gamma}{2-\gamma} \right)^{1/2}$ (рис. 4).

ФАЗОВА ВЕРТИКАЛЬНА ШВИДКІСТЬ І ПЕРІОД

Оцінимо фазову вертикальну швидкість цих АГХ. За умови синфазності коливань V_z і $\delta n / n$ з формули (3) випливає:

$$V_z = \frac{\omega}{k_z} \left(1 - \left(\frac{c}{U_x} \right)^2 \right) \frac{\delta n}{n} = \frac{\lambda_z}{T} \frac{\gamma-2}{2(\gamma-1)} \frac{\delta n}{n} = \alpha \frac{\delta n}{n}. \quad (7)$$

На рис. 5 наведено залежність V_z від $\delta n / n$ для семи витків в інтервалі висот 250–300 км. Два витки відносяться до північної півкулі, п'ять — до південної. Залежність між амплітудами концентрації та вертикальної швидкості АГХ апроксимована методом лінійної регресії. Незважаючи на дещо відмінні фонові умови, інтегральна для різних витків залежність є чітко вираженою. Це вказує на однотипність коливального режиму над полярними шапками для всіх розглянутих витків. В загальному випадку α залежить від спектральних характеристик АГХ і властивостей середовища. В середньому коефіцієнт пропорційності $\bar{\alpha} \approx 600$. Спостерігається тенденція до зменшення α з висотою: від 650 на висотах 250–300 км до близько 500 на висотах 350–400. Це узгоджується зі зміною γ з висотою від 1.67 (переважно одноатомний газ на висотах 350–400 км) до приблизно 1.6 (70 % одноатомного О і 30 % двоатомного N_2 на висоті 250 км).

В середньому $U_z = \frac{\lambda_z}{T} = \bar{\alpha} \frac{2(\gamma-1)}{2-\gamma} \approx 1800$ м/с, що вдвічі перевищує швидкість звуку на висотах спостережень. Враховуючи, що $U_x / U_z = \lambda_x / \lambda_z$,

оцінимо значення $\lambda_z \approx 2.5\lambda_x$. З рівняння (6) отримаємо $\lambda_x = 1.3 \times 4\pi H$, $\lambda_z = 3.25 \times 4\pi H$. Кут нахилу хвильового вектора до горизонту $\varphi = \arctg(\lambda_x / \lambda_z) \approx 20^\circ$, тобто поширення цих хвиль можна вважати квазігоризонтальним. Згідно з (5) період АГХ $T = \sqrt{\frac{2}{\gamma}} \cdot \frac{\lambda_x}{4\pi H} T_B \approx 1.45 \cdot T_B$. Це значення узгоджується з даними робіт [2, 9], де періоди полярних АГХ оцінювалися іншими способами.

ВИСНОВКИ

Виявлено синфазний характер хвильових варіацій $\delta n / n$ та V_z в АГХ над полярними шапками. На основі теоретичних співвідношень можна зробити висновок, що близький до синфазності характер коливань цих параметрів в АГХ одразу вказує, що значення k_z — дійсне і від'ємне. Таким чином, спостережувані хвилі поширюються знизу вгору від джерел, що знаходяться нижче рівня супутника. Фазова горизонтальна швидкість АГХ близька до швидкості звуку $U_x \approx 0.85c$, а компоненти довжини хвилі обмежені знизу: $\lambda_x > 4\pi H$, $\lambda_z > 4\pi H \sqrt{\gamma / (2-\gamma)}$. Систематичний характер коливань над полярними шапками та подібність спектральних характеристик ймовірно вказують, що спостерігається резонансна термосферна мода, існування якої теоретично передбачалося в роботі [6]. Важко уявити систематичне джерело, яке генерувало б однотипні АГХ над обома полярними шапками в різні сезони. Спектральні характеристики полярних АГХ виділені скоріше властивостями середовища, а не джерел, які в цих регіонах можуть бути найрізноманітнішими як за потужністю, так і за характером енерговиділення (висипання частинок, дисипація систем іоносферних струмів та ін.). Фізична природа ефекту синфазності коливань $\delta n / n$ та V_z потребує подальшого дослідження і теоретичної інтерпретації.

1. Федоренко А. К. Спутниковые наблюдения среднемасштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками // Космична наука і технологія. — 2008. — **14**, № 5. — С. 1–7.
2. Федоренко А. К. Відтворення характеристик атмосферних гравітаційних хвиль в полярних регіонах на основі мас-спектрометричних супутникових вимірювань // Радіофізика і радіоастрономія. — 2009. — **14**, № 3. — С. 254–265.

3. *Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., Lesyuta O. S., et al.* Geomagnetic control of the spectrum of traveling ionospheric disturbances based on data from a global GPS network // *Ann. geophys.* — 2001. — **19**. — P. 723–731.
4. *Carignan G. R., Block B. P., Maurer J. C., et al.* The neutral mass spectrometer on Dynamics Explorer // *Space Sci. Instrum.* — 1981. — **5**. — P. 429–441.
5. *Dudis J. J., Reber C. A.* Composition effects in thermospheric gravity waves // *Geophys. Res. Lett.* — 1976. — **3**, N 12. — P. 727–730.
6. *Francis S. H.* Global propagation of atmospheric gravity waves // *Revs J. Atmos. and. Ter. Phys.* — 1975. — **37**. — P. 1011–1054.
7. *Hajkovicz L. A.* Auroral electrojet effect on the global occurrence pattern of large scale travelling ionospheric disturbances // *Planet. Space.Sci.* — 1991. — **39**. — P. 1189–1196.
8. *Hines C. O.* Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.* — 1960. — **38**. — P. 1441–1481.
9. *Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., et al.* Gravity waves near 300 km over the polar caps // *J. Geophys. Res.* — 1995. — **100**. — P. 23993–24002.
10. *Spencer N. W., Wharton L. E., Niemann H. B., et al.* The Dynamics Explorer wind and temperature spectrometer // *Space Sci. Instrum.* — 1981. — **5**. — P. 417–428.

Надійшла до редакції 05.12.11

A. K. Fedorenko, I. V. Zakharov

SPECIFIC OSCILLATORY MODE IN THE POLAR THERMOSPHERE

Some features of behaviour of middle-scale acoustic gravity waves (AGW) in the polar region are investigated using the «Dynamics Explorer 2» satellite data. It is found that the oscillations of vertical component of velocity V_z and relative concentration $\delta n/n$ occur in phase for these AGW. The properties of the AGW are similar above both polar caps and for different seasons at altitudes from 250 to 350 km. The main characteristics of the polar waves, namely, the horizontal phase speed, period, true horizontal wavelength, vertical wavelength, propagation direction relative to the vertical, are determined. Value $k_z < 0$ points to the wave propagation from sources that are below the satellite. The horizontal phase speed is about 700 m/s and the angle between the wave vector and surface is about 20°.

УДК 537.5+550.3+551.5

Л. В. Козак¹, В. М. Івченко¹, А. Одзимек², І. С. Клоков¹, П. М. Козак³, В. П. Лапчук¹

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

² Лестерський університет, Великобританія

³ Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

ОЦІНКА ЕНЕРГІЇ СВІТІННЯ АТМОСФЕРИ НАД ГРОЗОВИМИ РОЗРЯДАМИ

Проаналізовано умови виникнення грозових розрядів та оцінено енергію світіння неба над ними. Визначено, що основну роль в утворенні грози відіграють висхідні потоки та «затравочні» іони, що виникають як за рахунок космічних променів, так і за рахунок радіоактивності земної поверхні. При цьому електричні розряди у грозових хмарах ініціюються широкими атмосферними лавинами. В рамках спільних досліджень Україна — Великобританія проведено спостереження грозової активності на горі Кошка з 12 по 19 серпня 2009 р., у результаті яких отримано 56 відеозаписів із грозовими розрядами над Чорним морем. Комплекс апаратури для спостережень складався з відеокамери (Watec 902H), захоплювача кадрів, GPS-приймача і ноутбука з відповідним програмним забезпеченням. Калібрування енергії виконано за позафокальними зображеннями Веги. Побудовано ізофоти зображень над грозовими розрядами. Отримано, що тривалість світіння неба після розряду склала 0.5—1.2 с, потужність 1.4—2.4 МВт, висота появи 5.2—7 км. Змодельовано квазіелектростатичне поле системи грозових зарядів із використанням моделі Вільсона. Визначено, що в нижній атмосфері відстань затухання електричного поля, створеного грозовою хмарою, складає 10 км. Оцінено енергію системи із п'яти грозових хмар.

ВСТУП

Вивчення грозових явищ розпочате в середині 18 століття працями В. Франкліна, Т. Ф. Далібара, Г. В. Ріхмана та М. В. Ломоносова. З того часу накопичено величезний обсяг експериментальних даних як про самі грозові хмари та блискавки, так і про атмосферну електрику в цілому [3, 5, 6, 9]. Запропоновано низку моделей функціонування атмосферно-струмового ланцюга та ряд фізичних механізмів утворення грозових хмар [4, 27]. В останні два десятиліття велике значення надається вивченню впливу космічних променів як на глобальні електричні процеси в атмосфері, так і на процеси утворення та дисипації грозових хмар [3—5]. Відкриті на початку 1990-х рр. грозові розряди в іоносферу (швидкоплинні оптичні явища) знову привернули увагу дослідників до даної теми [22, 23]. Разом з цим механізми утворення грозових хмар та розрядів блискавок остаточно не розкрито, незважаючи

на величезне прикладне і фундаментальне значення цих питань [4, 6, 25].

Наша робота присвячена вивченню тривалості розрядів, висоти їхньої появи та потужності світіння атмосфери на основі власних відеоспостережень грозових розрядів. Крім того, за допомогою чисельного моделювання було оцінено енергію системи грозових хмар із заданою конфігурацією.

ГРОЗОВІ ХМАРИ ТА УМОВИ ВИНИКНЕННЯ ГРОЗОВИХ РОЗРЯДІВ

Дослідження грозових хмар ведуться дистанційними та контактними методами. Спостереження електромагнітних випромінювань від грозових розрядів провадяться в усіх частотних діапазонах електромагнітних хвиль, починаючи від ультранизьких та звукових частот (3...30 Гц) до рентгєнівського та гамма-діапазону [20, 21]. Для цього використовуються різноманітні наземні прилади, а також бортові прилади на літаках, балонах, ракетах і супутниках. Реєструються зображення блискавок та спектри розрядів, вимірюються магнітні та електричні поля у хмарах та поля і

© Л. В. КОЗАК, В. М. ІВЧЕНКО, А. ОДЗИМЕК, І. С. КЛОКОВ,
П. М. КОЗАК, В. П. ЛАПЧУК, 2012

струми самих блискавок [13—15, 18, 26, 27]. Крім того, штучна стимуляція розрядів між грозовими хмарами та землею шляхом запуску невеликої ракети, яка розмотує тонкий дріт чи металізовану полімерну волосінь, дозволяє проводити комплексні вимірювання на полігонах [20, 21, 24]. Проведено успішні спроби стимуляції блискавок потужними лазерами, що іонізують повітря вздовж променя, та водяними гарматами, які здатні посилати тонкий струмінь води на висоту понад 200 м [7, 27].

Глобальний розподіл гроз та блискавок по планеті детально вивчено в останнє десятиліття супутниковими методами [7, 16—18]. На земній кулі одночасно відбувається близько 2000 гроз, щосекунди 50 блискавок вдаряє в земну поверхню, на порядок більше відбувається розрядів між хмарами. Одна блискавка в середньому переносить заряд 10—100 Кл за час розряду близько 0.001 с. В більшості випадків кожен розряд складається з декількох коротких розрядів загальною тривалістю до десятих часток секунди.

Широтний, сезонний та добовий розподіл грозової активності вказує на тісний зв'язок «теплової машини» генерації гроз з режимом максимальної інсоляції. В діапазоні широт $\Delta\varphi = \pm 30^\circ$ відбувається 75 % гроз, причому рівномірно впродовж року; для більших широт розряди блискавок спостерігаються в основному лише в літній період. Максимум грозової активності спостерігається близько 16 години місцевого часу. Над континентами грози потужніші і трапляються в 6—10 разів частіше, ніж над океаном [16]. Головну роль тут відіграє той факт, що поверхня суші швидко прогривається, і висхідні потоки теплого вологого повітря здатні генерувати грозові хмари. Без сумніву, важливим є також вплив аерозолів земного походження, які є центрами конденсації вологи у хмарах. Над океанами кількість аерозолів набагато менша ($n \sim 100 \text{ см}^{-3}$), ніж над сушею ($n \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$) [10]. Грозова активність посилюється під час вивержень вулканів, землетрусів і в районах розташування атомних електростанцій, блискавки супроводжували випробування ядерної та термоядерної зброї в атмосфері, а також потужні снігові, пилові та піщані бурі [7, 14, 15, 27].

Грозова хмара є локалізованою областю посиленої конвективної і електричної активності, що складається з однієї або декількох комірок. Середній розмір комірок складає кілька кілометрів, а вершина розташована на висотах 8...12 км в середніх широтах. У гігантських грозових хмарах тропічних широт вершина може досягати висоти 20 км. Час життя комірки від моменту її виникнення до розпаду близько 1 години [13, 14]. Потужні грозові фронти містять до десятка комірок, які розвиваються неодноразово, і гроза може тривати декілька годин. Розвиток грозової хмари поділяють на три стадії: зародження, розвиток (зрілість) і розпад. У стадії розвитку зростають електрична активність, висхідні потоки і вологоємність хмари; у стадії розпаду висхідні рухи повітря, електрична активність і випадання опадів зменшуються.

Встановлено лінійну залежність між швидкістю висхідних потоків в грозовій хмарі та частотою блискавок. Так, для окремої тропічної грозової комірки при зміні швидкості висхідних потоків у хмарі з 7 до 30 м/с частота появи збільшується від 1 до 50 блискавок/хв.

Для зародження грозових хмар необхідні потужні висхідні потоки теплого і вологого повітря, що містить іони та заряджені аерозольні частинки — потенційні ядра конденсації водяної пари. У приземному шарі атмосфери іонізація відбувається за рахунок природної радіоактивності ґрунту та виходу на поверхню радіоактивних газів, насамперед радону. Початковий «затравочний» заряд частинок також створюють космічні промені. якісно пояснити розділення зарядів може модель дипольної хмари, коли у висхідних потоках теплого вологого повітря, яке стикається з холодним, настає пересичення водяної пари, і негативно заряджені крапельки набирають масу значно швидше за позитивно заряджені [4, 6, 10, 13].

Повітря, що піднімається із приземного шару, охолоджується внаслідок розширення та взаємодії з холоднішим повітрям на висотах 3—5 км, охолодження пришвидшується, якщо висхідні потоки стикаються з холодним атмосферним фронтом. Після досягнення охолодженням повітрям стану пересиченої водяної пари починається утворення хмари — конденсація вологи і

швидке зростання крапель. Конденсація, як це було експериментально встановлено, відбувається переважно на негативно заряджених ядрах [10, 11, 13]. У процесі конденсації краплі зростають до розмірів 1—2 мкм, і надалі ріст відбувається переважно за рахунок коагуляції крапель. Коагуляція на негативно зарядженій краплі у зовнішньому електричному полі йде швидше, ніж злиття позитивно заряджених крапель. З ростом краплі сили тяжіння сповільнюють її рух вгору, тоді як менші і легші позитивно заряджені ядра разом з висхідним потоком повітря продовжують рух угору. В результаті у хмарі відбувається великомасштабне просторове розділення зарядів з утворенням негативного об'ємного заряду знизу і позитивного вгорі. Тобто розташування зарядів при утворенні грозової хмари відповідає полярності конденсатора глобального електричного ланцюга.

Ріст негативно заряджених крапель продовжується до розмірів 5—7 мм, коли сили гравітації перевищують підйомну силу висхідних потоків і починається інтенсивне падіння крапель. Оподи дуже послаблюють висхідні потоки в хмарі, а отже і процеси генерації та розділення електричних зарядів. Негативний заряд нижньої частини хмари швидко спадає з дощем. Екранування позитивного заряду верхньої частини хмари зменшується, і з'являється можливість для розрядів між землею та верхньою частиною хмари. Висхідні блискавки ліквідують частину позитивного об'ємного заряду у верхній частині хмари. Решта заряду, що залишилася в хмарі, випадає на поверхню Землі разом з опадами або розсіюється в атмосфері. Оскільки позитивний електричний заряд, який перебуває у верхній частині хмари, невеликий, то кількість висхідних блискавок у багато разів менша, ніж низхідних. Дослідження показують, що вони складають близько 10 % від загального числа розрядів між хмарою і Землею [7, 27]. Розглянута вище дипольна структура є найпростішою моделлю грозової хмари. Спостереження показують дво- та тридипольну структуру хмар; інколи реєструються до шести заряджених шарів, що чергуються [5, 7, 27].

При конденсації водяної пари в атмосфері виділяється енергія — прихована теплота, рівна те-

плоті пароутворення. При сильному охолодженні краплі води переходять у переохолоджений стан і замерзають, при цьому виділяється ще теплота плавлення льоду. Отже, чим більший перепад температур, тим більше теплоти виділиться. Виділена теплота сприяє посиленню висхідних потоків повітря і процесу розділення різномісних зарядів в грозовій комірці, що зароджується. Через розділення і зростання дипольного заряду в хмарі збільшується напруженість електричного поля. Це поле сприяє посиленню процесу коагуляції крапель і тим самим підсилює процес розділення зарядів [5, 7, 11]. Як тільки у хмарі напруженість електричного поля досягає значень 200—300 кВ/м, в ній з'являються блискавки. Електричні розряди у хмарі є потужним джерелом іонізації повітря, і об'ємний заряд, незважаючи на процеси рекомбінації, збільшується.

Виміряні у хмарах максимальні значення електричного поля не перевищують 400 кВ/м, тоді як пробивне значення для вологого повітря складає 1000—3000 кВ/м, отже, необхідно знайти причини зниження напруженості пробою [9]. Потрібно також пам'ятати, що мова йде про безелектродний пробій, принаймні для розрядів хмара—хмара. Непростою проблемою є швидке поєднання зарядів, зосереджених в значному об'ємі хмари у процесі розвитку розряду. Звивистий шлях розряду (блискавки), стрибкоподібний рух лідера, його зупинки — все це потребує детального розгляду.

Згідно із сучасними уявленнями розряди всередині хмари при низькій напруженості поля ініціюються космічними променями надвисокої енергії ($>10^{14}$ еВ), які утворюють в атмосфері широку атмосферну лавину (ШАЛ). Розряди проходять вздовж іонізованих слідів, які створюються вторинними частинками лавини, широке розгалуження іонізаційних слідів також сприяє поєднанню об'ємних зарядів в хмарі. Кількість електрон-іонних пар, що народжуються у слідах однієї електронної лавини, складає 10^{20} — 10^{21} , а утворювані ними заряди протилежних знаків складають величину $Q \geq 100$ Кл кожен [4, 7, 8].

При електричних розрядах проходить процес окислення атмосферного азоту — виникає низка сполук NO_x . Оцінки кількості таких сполук ще

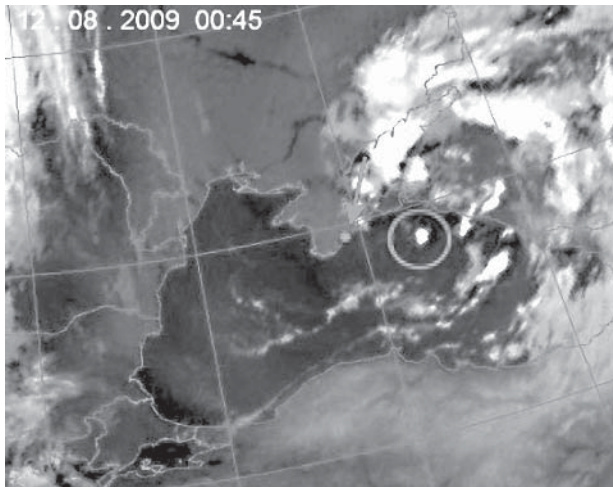


Рис. 1. Зображення грозового фронту, отримані на основі обробки ІЧ-даних супутника «Метеосат-9»

не досить впевнені, але є підстави стверджувати, що продуктивність гроз на порядки перевищує сумарну кількість азотних добрив, які виробляє людство [19]. Непростим є також питання про вплив грозової активності на озоновий шар: з одного боку в електричних розрядах генерується озон, його кількість збільшується в сильних електричних полях, з іншого — згадані вище сполуки азоту можуть виступати у ролі каталізаторів руйнування озону.

Підсумовуючи, можна виділити такі найважливіші тези щодо утворення грозових хмар і розрядів грози.

1. Основним джерелом енергії, що живить грозову хмару, є висхідні потоки теплого повітря, насичені водяною парою, при конденсації та замерзанні якої у хмару виділяється прихована теплота, що посилює конвекцію та висхідні потоки.

2. Процес електризації водяних крапель передбачає наявність у повітрі початкових «затравочних» іонів та заряджених аерозольних частинок, що виникають головним чином за рахунок космічних променів, радіоактивних газів та радіоактивності порід земної поверхні.

3. Великомасштабне просторове розділення різнойменних зарядів відбувається завдяки наявності висхідних потоків теплого вологого іонізованого повітря і дії гравітації. При цьому кон-

денсація вологи на негативно заряджених ядрах розпочинається при меншій пересиченості пари, ніж на позитивно заряджених ядрах, внаслідок наявності дипольного електричного моменту молекули води. Коагуляція негативно заряджених крапель води у зовнішньому електричному полі теж ефективніша, ніж для позитивно заряджених.

4. Електричні розряди у грозових хмарах ініціюються галактичними космічними променями надвисоких енергій, які утворюють широкі атмосферні лавини (ШАЛ). Це може бути головною причиною виникнення розрядів при градієнтах електричного поля, майже на порядок нижчих, ніж пробивна напруга. Звивиста структура і розгалуженість каналів блискавок теж завдячують іонізованим каналам, що виникають в ШАЛ.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ ГРОЗОВОЇ АКТИВНОСТІ ТА ОЦІНКА ЕНЕРГІЇ СВІТІННЯ АТМОСФЕРИ ВІД ГРОЗОВИХ РОЗРЯДІВ

Апаратура та місце спостереження. Спостереження грозової активності було проведено з оглядового майданчика метрового телескопа на горі Кошка Кримської астрономічної обсерваторії (Україна, Крим, Сімеїз). Координати місця спостереження за GPS: 44°24'44.13" пн. ш., 33°59'29.47" сх. д., висота 333 м над рівнем моря. За період спостереження з 12 по 19 серпня 2009 р. було отримано 56 відеозаписів із грозовими розрядами над Чорним морем. Незважаючи на те що спостереження проводилися із одного пункту, положення грози можна було визначити за допомогою супутникових карт, які були представлені на сайті www.ion.le.ac.uk/~ao64/imgw/index.html в рамках спільних досліджень Україна — Великобританія. Приклад відносної локалізації грози (12.08.2009 р.) і пункту спостережень показано на рис. 1. Пункт спостережень відмічено стрілкою, а область грозової активності — колом. Координати грози: 44°15' пн. ш. та 36°45' сх. д.

Установка для спостережень показана на рис. 2 і складається з об'єктива Computar M1614, $f = 16$ мм, 1:1.4; аналогової ТВ-камери Watec LLTV 902H, фреймграбера Pinnacle Dazzle DVD-recorder для оцифровки відеосигналу, часового пристрою KIWI-OSD-2 для точної часової



Рис. 2. Фото установки

прив'язки відео, GPS-приймача Garmin, ноутбук зі встановленим на ньому програмним забезпеченням UFO Capture V2. В камері Watec LLTV 902H використовується ПЗЗ-матриця Sony ICX249AL форматом 752 (H) $\times$ 582 (V) ефективних елементів, розмір елемента 8.6 мкм (H) $\times$ 8.3 мкм (V) (площа елемента $7.138 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2$), розгортка 2:1 черезрядкова, час експозиції одного поля 1/50 с. Кутовий розмір поля зору камери з 16-мм об'єктивом — $21 \times 26^\circ$. Максимальна спостережна зоряна величина — близько 5^m.

Програмне забезпечення UFO дозволяє зберігати лише ті зображення, в яких відбулися зміни в полі зору камери, та по 29 кадрів до і після змін. Це надзвичайно спрощує опрацювання телевізійних спостережень, оскільки не потрібно переглядати весь записаний матеріал, та дозволяє суттєво зменшити розмір відеоінформації (розмір файла спостереження одного грозового розряду у форматі нестисненого відеоролика AVI складає біля 50 мегабайт, а розмір файла запису спостережень протягом години — близько 110 гігабайт).

Перед опрацюванням даних було проведено дослідження камери з робочим об'єктивом на наявність геометричних спотворень та нерівномірності чутливості по полю зору. В результаті

виявилось, що на краях кадру є невеликі геометричні спотворення (<1.5 %), які можна не враховувати, оскільки об'єкти спостереження знаходились поблизу центра кадру. Аналіз фотометричної похибки поля зору камери показав, що її величина для країв кадру не перевищує 10 % і для наших оцінок не відіграє суттєвої ролі.

Побудова калібрувальної кривої. Для фотометричної обробки даних необхідна калібровка приладу. Фотометрична калібровка для протяжних об'єктів проводилась за позафокальними зображеннями α Луг. Під час спостережень було отримано шість позафокальних зображень Веги з різним ступенем розфокусування, за якими побудовано залежність вихідного сигналу від освітленості фотоприймача. Для підвищення точності калібровки камери проводилось усереднення фону і зображень Веги (приблизно по 29 кадрах) та врахування атмосферної екстинції (зенітна відстань Веги при спостереженнях $z = 44^\circ$).

Розрахунок світлового потоку, що реєструється камерою, здійснюється за формулою

$$F = \omega S_{\text{об}} \Delta t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) k_o(\lambda) p_z(\lambda) S_{\text{кам}}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де ω — тілесний кут, відповідний розфокусовано-

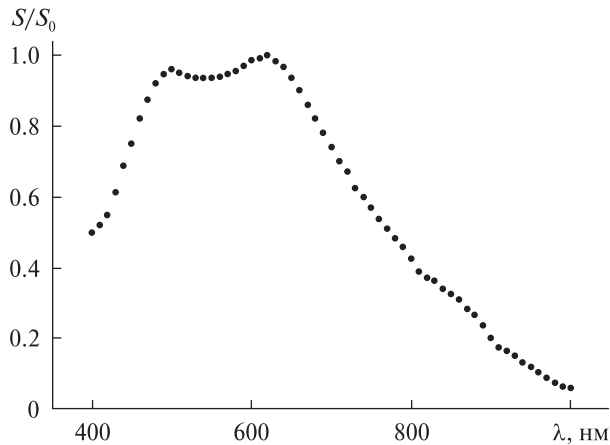
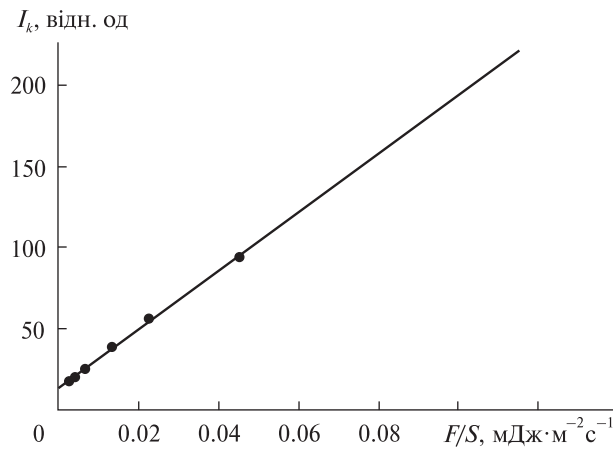
Рис. 3. Спектральна чутливість S фотоприймача ICX249AL

Рис. 4. Калібрувальна крива. Точки — спостереження, лінія — апроксимація

Параметри грозових розрядів

Час грозового розряду (11/12 серпня 2009 р.)	W , МДж	$t_{\text{св}}$, с	P , МВт	h , км
23:33:42	1.07	0.64	1.67	6.8
23:40:23	0.7	0.44	1.6	6.5
23:59:25	0.72	0.52	1.38	7
00:56:32	1.7	0.72	2.36	6.6
01:07:10	2	0.84	2.38	6.7
02:03:04	1.8	0.8	2.25	5.2
02:14:25	2.4	1.2	2	5.7
02:29:52	2.6	1.08	2.4	5.5

му зображенню Веги, $S_{\text{ог}}$ — площа вхідної зіниці об'єктива, Δt — час експозиції, $E(\lambda)$ — спектральна густина випромінювання Веги [2], $k_o(\lambda)$ — коефіцієнт пропускання оптики (для розрахунків було прийнято значення $k_o = 0.8$), $p_z(\lambda)$ — коефіцієнт пропускання атмосфери на заданій зенітній відстані, $S_{\text{кам}}(\lambda)$ — спектральний коефіцієнт чутливості ПЗЗ (рис. 3), $\lambda_2 - \lambda_1$ — спектральний діапазон чутливості камери.

Отримана за різних позафокальних зображеннях Веги залежність зареєстрованого сигналу (I_k) від потоку енергії на одиницю площі (калібрувальна крива) показана на рис. 4.

Оцінка енергії світіння атмосфери від грозового розряду за телевізійними спостереженнями. Для оцінки енергії світіння атмосфери від грозових розрядів було опрацьовано відео восьми грозових розрядів, область локалізації яких показана на рис. 1.

Перед початком аналізу було зроблено підсумовування перших 29 кадрів відео (фон) з подальшим відніманням даного просумованого зображення послідовно від кадрів, на яких зафіксовано грозовий розряд. Це дозволяє виключити всі статичні об'єкти, включаючи зорі. Оскільки ми маємо неточковий об'єкт, то після розбиття відео на кадри і врахування фону наступним етапом була побудова ізофот (ділянки однакової освітленості). Ізофоти будувались з кроком в 30 одиниць в діапазоні від 0 до 255. Приклад ізофот з одного кадру наведено на рис. 5.

Надалі знаходилась площа кожної ізофоти і відповідна їй освітленість (з калібрувальної кривої), які є вхідними даними для обчислення потоку, що формує зображення:

$$F = \sum_{i=1}^N E_{\text{із}(i)} \cdot S_{\text{із}(i)}, \quad (2)$$

де N — повне число ізофот для даного кадру, $S_{\text{із}}$ — площа ізофоти, $E_{\text{із}}$ — освітленість, що їй відповідає.

Таким чином, значення енергії світіння атмосфери від грозового розряду задається співвідношенням

$$W = \frac{4\pi R^2}{S_{\text{ог}}} \sum_{i=1}^k F \cdot t, \quad (3)$$

де F — потік за один кадр, t — тривалість кадру

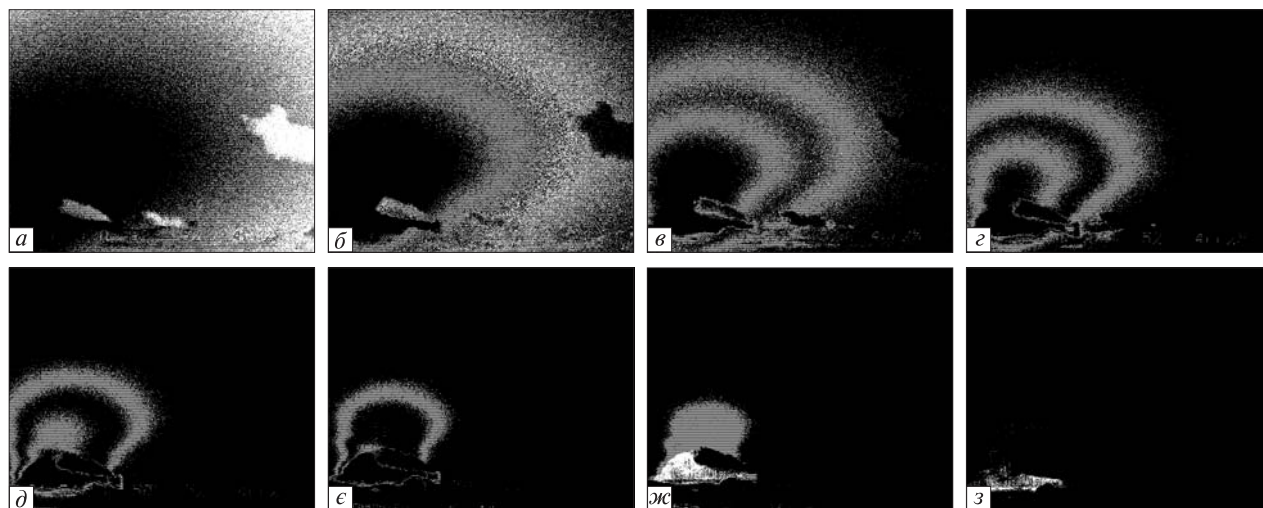


Рис. 5. Приклад ізофот в порядку зростання інтенсивності для одного кадру грозового розряду

($t = 0.04$ с), k — повне число кадрів, на яких зареєстровано світіння неба від грозового розряду, R — відстань до грози (215 км), $S_{об}$ — площа об'єктива.

Потужність світіння неба від грозового розряду дорівнює

$$P = W/t_{св}. \quad (4)$$

Розраховані значення енергії світіння атмосфери від грозового розряду, тривалості світіння від розрядів, їхньої потужності та висоти появи подано в табл. 1. При оцінці висоти спостережуваного грозового розряду було враховано сферичність Землі.

Оскільки спостереження проводились у спектральному діапазоні 400–1000 нм, на який припадає лише біля 1 % від всієї енергії випромінювання [14, 15, 24, 27], то можна вважати, що повна енергія випромінювання буде на два порядки вищою.

ОЦІНКА ЕНЕРГІЇ ГРОЗОВИХ РОЗРЯДІВ ІЗ МОДЕЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ

Дані багаторічних вимірювань електричних характеристик атмосфери поблизу поверхні Землі вказують на наявність електричного поля напруженістю близько 100 В/м і електричного струму близько 10^{-12} А/м². Ці параметри визначаються в умовах «хорошої погоди», тобто при відсутності у даному районі Землі хмар, вітрів, завірюх та ін. При цьому ефективний заряд Землі складає 10^5 Кл. Оскільки атмосфера Землі електропровідна, то

при відсутності джерел електричне поле зникло б приблизно за 10 хв. Згідно з сучасними уявленнями основним джерелом електричного поля у тропосфері і стратосфері є грозові хмари, що діють як струмові генератори. При цьому в областях грозових хмар течуть струми, що заряджають атмосферу, а в областях, вільних від грозових хмар, течуть струми розрядки [1].

Структура електричних струмів та умови підтримки електричного поля визначаються глобальним атмосферно-струмовим ланцюгом.

Однією з перших моделей глобального атмосферно-струмового ланцюга, що не втратила значущість до цих пір, є модель сферичного конденсатора, вперше запропонована Вільсоном. У цій моделі електричне поле в нижніх шарах атмосфери існує завдяки тому, що на Землі і у високих шарах атмосфери зосереджені відповідно негативний і позитивний заряди, які створюють різницю потенціалів приблизно 300 кВ. При цьому поверхня Землі та іоносфера відіграють роль обкладинок конденсатора. Завдяки електропровідності шарів атмосфери в ній тече електричний струм, який намагається розрядити конденсатор. Тому, для підтримки заряду на обкладках такого конденсатора необхідні джерела струму, що заряджають їх і компенсують струми розрядки. У моделі Вільсона передбачається, що струм зарядки виникає у всіх областях атмосфери, які зайняті грозовими хмарами, і в яких електричне поле має

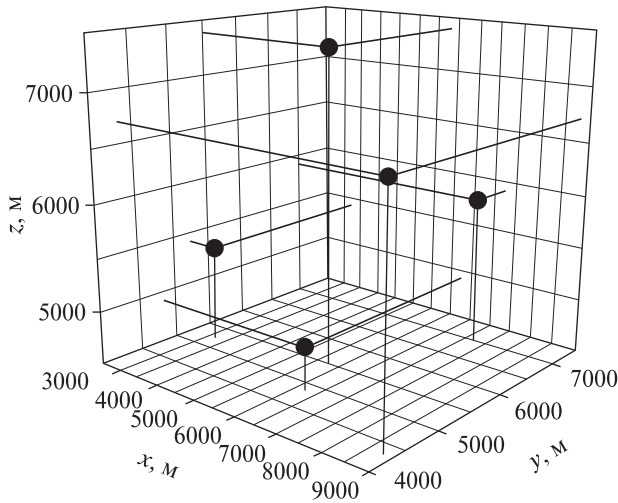


Рис. 6. Просторовий розподіл грозових хмар

напрямок, зворотний напрямку, спостережувано-
му в областях хорошої погоди [1, 12].

Застосовуючи наближення та граничні умови
у моделі Вільсона, можна розглянути потенціал
системи грозових зарядів та оцінити їхню енергію.

Врахування впливу грозових хмар як у гло-
бальному, так і в локальному масштабі, можна
проводити на основі розв'язку рівняння [12]

$$\operatorname{div}(\tilde{\lambda} \operatorname{grad} \varphi) = -4\pi \tilde{\lambda} \sum_i q_i \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i), \quad (5)$$

де q_i , $\mathbf{r}_i$ — заряд і радіус-вектор i -го грозового
джерела, $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ — функція Дірака, $\tilde{\lambda}$ — елект-
ропровідність іоносфери, φ — потенціал систе-
ми грозових хмар.

В такому представленні заряди грозового дже-
рела вважаються точковими, що справедливо для
відстаней, які значно перевищують характерний
розмір області розподілу зарядів грозової хмари.
У стаціонарному випадку, що і передбачає мо-
дель Вільсона, позитивний і негативний заряди
 i -го джерела зв'язані співвідношенням

$$I_i = 4\pi \tilde{\lambda}_i^+ q_i^+ = -4\pi \tilde{\lambda}_i^- q_i^-, \quad (6)$$

де $\tilde{\lambda}_i^-$, $\tilde{\lambda}_i^+$ — електропровідності в околі нега-
тивного (q_i^-) і позитивного (q_i^+) зарядів грозової
хмари.

Для атмосфери з експоненційною залежністю
провідності із висотою $\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}_0 \exp(\alpha z)$, де $\tilde{\lambda}_0$ —
провідність атмосфери на рівні Землі, а α —

масштабний множник; q_i^+ і q_i^- пов'язані між со-
бою співвідношенням

$$q_i^+ = -q_i^- \exp[\alpha(z_i^- - z_i^+)]. \quad (7)$$

В моделі «класичного конденсатора» граничні
умови для розв'язку рівняння (5) мають вигляд

$$\varphi(r = r_0) = 0, \quad \frac{1}{4\pi} \oint_{S_2} \varphi d\Omega = \varphi_\infty, \quad (8)$$

де S_2 — поверхня, що лежить у високопровідних
шарах атмосфери.

Другу умову можна замінити такою:

$$\varphi(r \rightarrow \infty) = \varphi_\infty \text{ або } \varphi(r = R) = \varphi_\infty, \quad (9)$$

де R — радіус нижньої границі іоносфери. При
цьому вираз для потенціалу іоносфери [1] має
вигляд

$$\varphi_\infty = \frac{1}{4\pi r_0^2} \sum_i I_i \left(\frac{1}{\tilde{\lambda}_i^-} - \frac{1}{\tilde{\lambda}_i^+} \right). \quad (10)$$

Розв'язок рівняння (5) при вказаних вище гра-
ничних умовах можна записати у вигляді [1, 12]

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sum_i q_i G_i + \varphi_\infty [1 - \exp(-\alpha(r - r_0))],$$

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i) = \exp\left(-\frac{\alpha}{2}(r - r_i)\right) \times \left[\frac{\exp\left(-\frac{\alpha}{2}\rho_i\right)}{\rho_i} - \frac{\exp\left(-\frac{\alpha}{2}\rho'_i\right)}{\rho'_i} \right], \quad (11)$$

де G_i — функція Гріна, $\rho_i = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|$, ρ'_i — відстань
від точки спостереження до заряду зображення.

Таким чином, задавши певний просторовий
розподіл зарядів (вектори $\mathbf{r}_i$), ми можемо побу-
дувати значення електростатичного потенціалу в
кожній точці простору у межах модельного об'єму.
Модельна область в даній роботі містить п'ять
грозових хмар, розташованих хаотично в кубічній
області простору (рис. 6). При моделюванні були
використані такі значення параметрів:

- $\alpha = 1/6400$ м (масштабний множник в мо-
делі Вільсона, що показує характерну відстань
спадання напруженості електричного поля в ат-
мосфері);
- $q = \pm 20$ Кл (величина позитивного і нега-
тивного зарядів грозової хмари);
- $\Delta z = 2000$ м (відстань між позитивним і не-
гативним зарядом всередині хмари);

- $\tilde{\lambda}_0 = 1.1 \cdot 10^{-13}$ См/м (провідність атмосфери на рівні Землі);
- $h = 60\,000$ м (висота рівня іоносфери);
- крок обчислення по трьох координатах — 100 м.

Отриманий просторовий розподіл потенціалу для висоти 6900 м представлено на рис. 7.

По осі z відкладено значення електростатичного потенціалу у відносних одиницях (нормованих на максимальне значення). Розподіл чітко показує внесок кожного грозового заряду. Можемо бачити два піки, які відповідають двом грозовим зарядам, розташованим найближче до даного рівня. Решта (три заряди) лежать далі і роблять значно менший вклад у сумарне електростатичне поле на даному рівні.

Отримана із моделювання характерна відстань спадання поля порядку 10 км добре узгоджується із даними моделі Вільсона [23].

Розподіл потенціалу електричного поля, створеного системою грозових розрядів, дозволяє знайти напруженість електричного поля ($E = -\nabla\phi$) та оцінити енергію за формулою

$$W = \int_V \tilde{\lambda} E^2 dV.$$

Для представленої на рис. 6 системи грозових хмар значення енергії $W \approx 0.6 \cdot 10^9$ Дж. Це добре узгоджується із оцінками [14, 15, 24, 27].

ВИСНОВКИ

В рамках спільних досліджень Україна — Великобританія проведено спостереження грозової активності на горі «Кошка» Кримської астрономічної обсерва торії (Україна, Крим, Сімеїз) з 12 по 19 серпня 2009 р. в результаті яких отримано 56 відео із грозовими розрядами над Чорним морем. Установка для спостережень складалася з відеокамери, захоплювача кадрів, GPS-приймача і ноутбука з програмним забезпеченням UFO.

Із опрацювання відео восьми грозових розрядів, що відбулися на відстані 215 км від точки спостережень, було отримано, що енергія варіює у межах 0.7—2.6 МДж, тривалість світіння неба після розряду 0.5—1.2 с, потужність 1.4—2.4 МВт, а висота появи — 5.2—7 км. Оскільки спостереження провадились у спектральному діапазоні 400—1000 нм, на який припадає лише біля 1 %

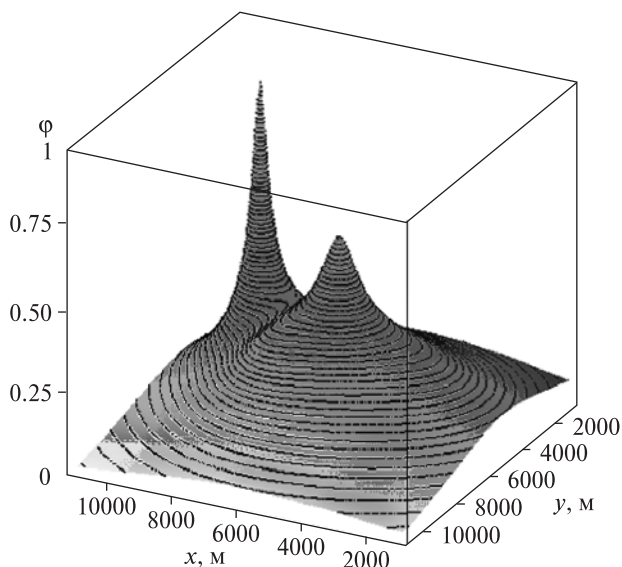


Рис. 7. Розподіл потенціалу в просторі під дією п'яти грозових хмар, $z = 6900$ м

від всієї енергії випромінювання, то повна енергія буде принаймні на два порядки вищою.

Із чисельного моделювання квазіелектростатичного поля системи грозових хмар із використанням моделі Вільсона визначено, що відстань затухання електричного поля, створеного грозовою хмарою, складає порядку 10 км. Крім того, було змодельовано розподіл потенціалу електричного поля, створеного системою п'яти грозових розрядів, та отримано оцінку максимальної енергії даної системи ($W \approx 0.6 \cdot 10^9$ Дж).

Автори вдячні за допомогу у проведенні спостережень А.М.Растопчиній-Шаховській та О.Є.Вольвачу, а також Є.В.Удодову, С.Г.Пилипенку, О.В.Шуєнку і М.Г.Малигіну за участь у спостереженнях.

Робота виконана при частковій підтримці гранту Ф 40.2/053 та гранту Міжнародного інституту космічних досліджень ISSI (Team I32).

Співробітництво із Великобританією виконувалося при частковій підтримці гранту Європейської Комісії номер MEST-CT-2004-007512 і PERG-GA-2007-203298, Лестерський університет, Великобританія.

1. Атмосфера. Справочник / Под ред. Ю. С. Седунова, С. И. Авдюшина, Е. П. Борисенкова и др. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 509 с.
2. Глушнев И. Н. Спектроскопия ярких звезд. — М.: Наука, 1982. — 256 с.

3. Гуревич А. В., Зыбин К. П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // Успехи физ. наук. — 2001. — **171**, № 11. — С. 1177—1199.
4. Ермаков В. И., Стожков Ю. И. Роль космических лучей в образовании молний // Краткие сообщения по физике. ФИАН. — 2003. — № 9. — С. 43—50.
5. Ермаков В. И., Стожков Ю. И. Физика грозных облаков. — М., 2004. — 39 с. — (Препринт / РАН, Физический ин-т им. П. Н. Лебедева).
6. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. — Л: Гидрометеоиздат, 1972. — 323 с.
7. Мареев Е. А., Трахтенгерц В. Ю. Загадки атмосферной электрики // Природа. — 2007. — № 3. — С. 24—33.
8. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей. — М.: МГУ, 1988. — 319 с.
9. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987. — 591 с.
10. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. — М.: Мир, 1987. — 280 с.
11. Русанов А. И. Термодинамика нуклеации на зарядовых центрах // Докл. АН СССР. — 1978. — **238**, № 4. — С. 831—834.
12. Шуенко О. В., Козак Л. В., Івченко В. М. Швидкоплинні оптичні явища під час гроз та моделювання електричних полів у нижній атмосфері // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 2. — С. 23—34.
13. Челмерс Дж. А. Атмосферное электричество. — Л: Гидрометеоиздат, 1974. — 421 с.
14. Юман М. Молния. — М.: Мир, 1972. — 327 с.
15. Bazelyan E. M., Raizer Yu. P. Lightning Physics and Lightning Protection. — Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2000. — 320 p.
16. Boccippio D. J., Koshak W. J., Christian H. J., Goodman S. J. Land-ocean differences in LIS and OTD tropical lightning observations // Proceedings of 11th ICAE, USA, Alabama. — 1999. — P. 734—737.
17. Christian H. J. Optical detection of lightning from space // Proceedings of 11th ICAE, USA, Alabama. — 1999. — P. 715—718.
18. Christian H. J., Blakeslee R. J., Boccippio D. J., et al. Global frequency and distribution of lightning as observed by the optical transient detector (OTD) // Proceedings of 11th International Conference on Atmospheric Electricity, USA, Alabama. — 1999. — P. 726—729.
19. Cooray V., Rahman M., Rakov V. On the NO_x production by laboratory electrical discharges and lightning // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2009. — **71**, N 17-18. — P. 1877—1889, doi:10.1016/j.jastp.2009.07.009.
20. Dwyer J. R., Rassoul H. K., Al-Dayeh M., et al. Measurements of x-ray emission from rocket-triggered lightning // Geophys. Res. Lett. — 2004. — **31**. — P. L05118, doi:10.1029/2003GL018770.
21. Dwyer J. R., Rassoul H. K., Al-Dayeh M., et al. A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning // Geophys. Res. Lett. — 2004. — **31**. — P. L05119, doi:10.1029/2003GL018771.
22. Franz R. C., Nemsek R. J., Winkler J. R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system // Science. — 1990. — **249**, N 4964. — P. 48—51, doi: 10.1126
23. Füllekrug M., Mareev E. A., Rycroft M. J. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges, II Mathematics, Physics and Chemistry — 2006. — Vol. 225. — 432 p.
24. Rakov V. A., Uman M. A., Rambo K. J. A review of ten years of triggered-lightning experiments at Camp Blanding, Florida // Atmosphere Res. — 2005. — **76**, N 1-4. — P. 504—518.
25. Reiter R. Phenomena in atmospheric and environmental electricity. — Amsterdam: Elsevier, 1992. — 541 p.
26. Uman M. A. The Art and Science of Lightning Protection. — Cambridge: Univ. Press, 2008. — 239 p.
27. Ushio T. U., Heckman S., Boccippio D., et al. Initial comparison of the lightning imaging sensor (LIS) with lightning detection and ranging (LDAR) // Proceedings of 11th ICAE. — Alabama, USA, 1999. — P. 738—741.

Надійшла до редакції 01.10.11

L. V. Kozak, V. M. Ivchenko, A. Odzymek,
I. S. Klokov, P. M. Kozak, V. P. Lapchuk

ESTIMATION OF ATMOSPHERE GLOW ENERGY OVER STORM DISCHARGES

An analysis of conditions for the appearance of storm discharges is performed and the sky glow energy over them is estimated. It is found that riser flows and “inoculating” ions which are caused by both cosmic rays and the Earth’s ground radioactivity play a decisive role in a storm formation. In this case large atmosphere avalanches initiate electric discharges in storm clouds. In the framework of combined Ukrainian-British investigations, observations of storm activity on Koshka mountain from 12 till 19 August 2009 were carried out. As the result of the observations, 56 videos with storm discharges over the Black Sea were obtained. The complex of observational hardware included video camera Watec 902H, a frame-grabber, a GPS-receiver and a notebook with the according software. To estimate the atmosphere glow energy caused by storm discharges for the optical wavelength region, a calibrating curve is plotted on the basis of different unfocused images of Vega. During this procedure, the spectral type of the star, atmosphere absorption and spectral sensitivity of the camera are taken into account. To analyse some atmosphere glow features over storm discharges, isophotes of the images are plotted. It is found from the analysis of our observations that the discharge duration was from 0.5 to 1.2 sec, the discharge power was $(1.4-2.4) \cdot 10^6$ watt and the altitude of appearance was equal from 5.2 to 7 km. Besides, the simulation of quasi-electrostatic field for the system of storm discharges is performed using the Wilson model. It is found that in the lower atmosphere the distance of decay of the electric field generated by a storm cloud is near 10 km. The energy of a system consisting of five storm clouds is estimated. We can note a good correlation between the observational data and numerical estimations.

УДК 533.93

Л. В. Козак¹, С. П. Савін², А. Т. Луї³, О. О. Цупко¹

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

² Інститут космічних досліджень Російської академії наук, Москва, Росія

³ Університет Джона Хопкінса, Лабораторія прикладної фізики, Лаурел, Меріленд, США

ОСОБЛИВОСТІ ТУРБУЛЕНТНИХ ПРОЦЕСІВ У МАГНІТОСФЕРІ ЗЕМЛІ ЗА ВИМІРАМИ МІСІЇ «КЛАСТЕР»

Досліджено статистичні особливості флуктуацій магнітного поля у прикордонних областях магнітосфери Землі на різних часових масштабах. Для аналізу були використані вимірювання під час місії «Кластер-2» за 2004–2009 рр. Вивчено зміни форми і параметрів функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля для періодів перебування супутника у магнітошарі, плазмі сонячного вітру і в області магнітопаузи. Як характеристики турбулентних процесів на різних часових шкалах розглядалися еволюція зміни висоти максимуму функції густини ймовірності та значення експесу; було досліджено структурні функції різних порядків. Знайдено два асимптотичних режими зміни висоти максимуму функції густини ймовірності, які описуються різними степеневими законами. Дослідження структурних функцій високих порядків (до 9-го) дозволило визначити характер турбулентних процесів і вивчити дифузію у розглянутих областях. Отримано істотну відмінність типу турбулентних процесів у плазмі сонячного вітру і у магнітошарі, а також наявність супердифузії у перехідних областях магнітосфери Землі.

ВСТУП

Внаслідок заокругленості перешкоди, якою є магнітосфера Землі для набігаючого надзвукового сонячного вітру, навколоземна ударна хвиля не прилягає впритул до межі магнітосфери (магнітопаузи), а відсунута від неї на деяку відстань. При цьому між ударною хвилею і магнітопаузою утворюється область, яка називається магнітошаром, або перехідною областю. Саме ця область відіграє особливу роль у перетворенні динамічної та магнітної енергії сонячного вітру в енергію заряджених частинок і флуктуацій магнітного поля в області магнітосфери, визначаючи при цьому трансформацію і надходження енергії й імпульсу у внутрішні області магнітосфери. Крім того, інтенсивність зазначених процесів безпосередньо пов'язана з параметрами сонячного вітру і орієнтацією міжпланетного магнітного поля [10, 23].

Дослідження процесів у магнітошарі істотно ускладнюється наявністю турбулентності.

У плазмових потоках вона може формуватися багатьма класами нестійкостей — дрейфово-дисипативними, кінетичними, магнітогідродинамічними (МГД) та ін. [5, 6].

При взаємодії магнітошару і магнітосфери основні процеси взаємопов'язані і синхронізовані глобально низькочастотними магнітозвуковими коливаннями денного магнітошару як цілого [11, 22]. У результаті відбувається «катастрофічна» перебудова потоку і структури магнітного поля (прискорені і уповільнені струмені, перехід від ламінарної застійної області до нерегулярної структури приграничного шару). Складні турбулентні процеси, які спостерігаються у приграничних шарах магнітосфери Землі, не вдається описати в рамках аналітичних моделей МГД-течій. Для розгляду властивостей турбулентності на великих часових і просторових масштабах слід залучати методи статистичної фізики і каскадні моделі, розвинені в гідродинамічних теоріях. При аналізі дуже важливим є дослідження властивостей турбулентності в залежності від масштабу. Це може дати відповідь на одне з найбільш важливих запитань: наскільки

ки анізотропія на великих масштабах, пов'язана з магнітним полем, зберігається на проміжних і малих масштабах? Незважаючи на проведення численних теоретичних досліджень, питання про ізотропність турбулентності плазми на малих масштабах залишається відкритим і активно обговорюється дотепер. Для вирішення цієї проблеми потрібні відповідні експериментальні дані, особливо про вплив граничних і крайових ефектів на властивості турбулентності. Необхідно також враховувати, що властивості турбулентних прикордонних шарів пов'язані не стільки з фізичними механізмами розвитку нестійкостей, скільки з симетріями, що описують масштабну інваріантність на істотно обмеженому діапазоні масштабів турбулентних прикордонних шарів.

Аналітично або чисельно розв'язати задачу про динаміку турбулентної плазми (в тривимірній геометрії) і визначити особливості турбулентності на великих часових масштабах в даний час не вдається. Отже, необхідно з експерименту визначити статистичні властивості турбулентності, пов'язані з масштабною інваріантністю, і отримати оцінки для показників степеня залежності параметрів плазми у припущенні степеневих законів. Це дозволить розвинути уявлення про фізичні властивості турбулентності плазми і дасть можливість якісно і кількісно описати процеси переносу в турбулентних перехідних шарах.

ОПИС ТУРБУЛЕНТНИХ ПРОЦЕСІВ

При значеннях як кінетичного, так і магнітного чисел Рейнольдса до 10^3 – 10^4 і за наявності меж у плазмі може виникнути переміжність. У цьому випадку параметри плазми спостерігаються як випадкові змінні з негауссовою функцією розподілу (нерівномірний розподіл вихорів різних масштабів) [8, 16]. У магнітосфері переміжність спостерігається у вигляді пульсацій великої амплітуди, викликаних наявністю магнітних і електричних полів, що призводять до додаткової анізотропії процесу. Крім того, особливості турбулентних процесів залежать від розглянутих масштабів. Оскільки випадкові пульсації швидкості та інших параметрів турбулентного потоку з переміжністю мають негауссову статистику (не описуються класичним (нормальним) законом

дифузії), то динаміка такого процесу може описуватися аномальною дифузією. Турбулентні течії є нелінійною системою з величезним числом степенів свободи. Точне визначення математичної залежності від часу полів швидкостей, температури, тиску і т. д. є неможливим. Аналітичний опис такої системи можливий лише статистичними методами, що описують статистичні властивості ансамблів течій. Нелінійна взаємодія хвиль може бути описана як взаємодія окремих гармонік, яка призводить до хаотизації фаз хвиль [2]. Це дозволяє перейти до статистичного способу опису хвиль і ввести функцію розподілу за змінними. Статистичний опис пов'язаний з деякою процедурою огрубіння інформації та призводить до скорочення кількості змінних в задачі. При цьому втрачається значна частка інформації про стан окремих частинок (або хвиль), але зберігається достатньо інформації про макроскопічний характер руху та ймовірний розподіл по станах системи. Тому для опису турбулентності необхідно застосовувати спеціальні методи і підходи. Для повного опису турбулентного процесу необхідно знати функцію розподілу амплітуд флуктуацій всіх параметрів.

Функція розподілу таких процесів не завжди описується відомими математичними функціями і рядами, а для багатьох типів випадкових процесів відомий лише спосіб апроксимації їхньої функції розподілу. Аналіз моментів функції розподілу дозволяє наближено описати більшість ефектів нелінійності, неоднорідності та анізотропії турбулентного процесу.

Однорідна ізотропна турбулентність була описана А. Н. Колмогоровим ще в 1941 р. (К41) [9]. Класичний підхід дослідження статистичних властивостей поля швидкостей $v(x)$ на локальному масштабі l в турбулентному потоці полягає в дослідженні структурних функцій (статистичних моментів функції розподілу) різних порядків q :

$$S_q(l) = \langle |v(x+l) - v(x)|^q \rangle, \quad (1)$$

де $\langle \dots \rangle$ — усереднення по ансамблю. В інерційному діапазоні при великих числах Рейнольдса теорія Колмогорова К41 дає гауссівську статистику пульсацій швидкостей і передбачає степеневу залежність для структурної функції $S_q(l) \sim$

$\sim I^{\zeta(q)} = I^{q/3}$. Постулюючи залежність структурних функцій тільки від масштабу і швидкості дисипації енергії, А. Н. Колмогоров вивів закон для спектру потоку енергії $E_K(k) \sim k^{-5/3}$, де k — хвильове число. Даний закон відносно добре описав спектр розвиненої ізотропної гідродинамічної турбулентності, однак більш точніші дослідження показали відмінність показника степеня в законі $E_K(k) \sim k^{-\gamma}$ від п'яти третіх: $\gamma = 1.71 \pm 0.02$ [1, 13]. Це пов'язано з наявністю структурної неоднорідності турбулентного процесу (переміжністю) [12].

Наявність магнітних полів у міжпланетному середовищі може викликати сильну анізотропію динамічних процесів у плазмі. Тому часто використовується підхід, коли динаміка в площині поперек магнітного поля може бути розглянута в рамках двовимірної моделі (підхід Кречнана [19, 20]), а турбулентність розглядається в рамках двовимірної моделі Ірошнікова — Кречнана (ІК) [3, 18]. Спектр енергії задається співвідношенням $E_{IK}(k) = \langle |\delta v(k)|^2 \rangle k^2 \propto k^{-3/2}$. У порівнянні з колмогорівським спектром $E_K(k) \propto k^{-5/2}$ значно зменшується рівень передачі енергії на малих масштабах, і збільшується час передачі енергії. Скейлінг структурних функцій в моделі ІК: $S_q(l) \sim l^{q/4}$.

Для опису турбулентних процесів із переміжністю більш підходять каскадні моделі турбулентності. Незважаючи на те що феноменологічні каскадні моделі, які розглядають турбулентність з переміжністю, безпосередньо не виводяться з рівнянь руху, властивості каскаду пов'язані зі структурою та симетріями даних рівнянь.

Дослідження статистичних симетрій турбулентності, самоподібних (автомодельних) і фрактальних властивостей середовища дозволяє отримати інформацію про характер залежності структурних функцій від часу або простору (скейлінг), не вдаючись до детального розгляду конкретних умов її збудження. Такий підхід є ефективним інструментом аналізу структури турбулентності на різних масштабах. Для опису турбулентних процесів з переміжністю найчастіше використовують лог-пуассонівські моделі турбулентності, що виникли в середині 1990-х рр. і є узагальненням фрактальних моделей тур-

булентності [13]. Важливо, що в рамках даної моделі розглядається стохастичний мультиплікативний каскад, і логарифм енергії дисипації описується пуассонівським розподілом.

СТАТИСТИЧНІ ПІДХОДИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОГО СЕРЕДОВИЩА

Аналіз функції розподілу густини ймовірності флуктуацій. Для розгляду результатів спостережень можна використовувати статистичні підходи, оскільки самі результати вимірювань за своєю природою є випадковими величинами.

Розподіл ймовірностей амплітуд флуктуацій найпростішого випадкового процесу підпорядковується гауссівському закону:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

де μ — середнє значення, σ — стандартне відхилення. При наявності переміжності будемо мати розподіл Леві, для якого у випадку наявності симетрії функція розподілу має вигляд

$$L_\alpha(x, \gamma) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \exp(-\gamma k^\alpha) \cos(kx) dk,$$

де $\alpha \in (0, 2]$ — характеристичний індекс, який визначає форму кривої, $\gamma > 0$ — параметр масштабу. Важливо, що при $\alpha = 1$ з симетричного розподілу Леві отримується розподіл Коші, а при $\alpha = 2$ — розподіл Гаусса.

Порівняння гауссівського і негауссівського розподілу функції густини ймовірності (PDF) показано на рис. 1.

Для всіх цих розподілів залежність максимуму функції розподілу густини ймовірності $P_x(0)$ із зміною просторового масштабу l можна апроксимувати степеневою залежністю:

$$P_l(0) \sim l^{-s}. \quad (2)$$

При цьому для гауссівського розподілу $s \approx 0.5$, а для розподілу Леві $s > 0.5$ (рис. 2).

Для турбулентності з переміжністю вірогідність значних флуктуацій на крилах розподілу буде високою завдяки надлишку енергії великомасштабних збурень, що генеруються джерелом.

Аналіз моментів функції розподілу (структурних функцій). Про відхилення функції розподілу густини ймовірності флуктуацій досліджуваних

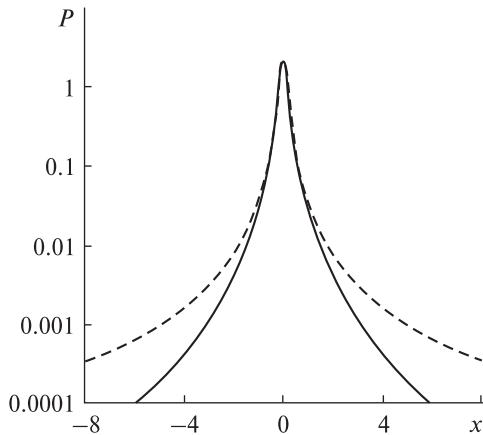


Рис. 1. Функції P розподілу густини ймовірності для нормального розподілу (суцільна лінія) і розподілу, що описує процес при наявності переміжності (розподіл Леві, штрихова лінія)

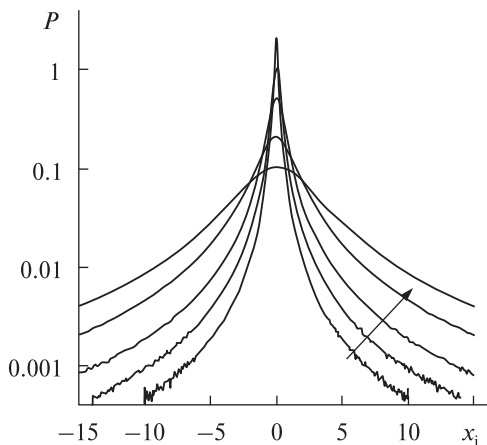


Рис. 2. Приклад еволюції функції P розподілу густини ймовірності негауссового розподілу зі зміною кроку розглянутих флуктуацій. $P(0) \propto l^{-s}$, $s \approx 0.5$ — гауссовий розподіл, $s > 0.5$ — розподіл Леві

параметрів від нормального розподілу можна судити й із значення ексцесу, який визначається формулою [4]:

$$K(l) = \frac{S_4(l)}{(S_2(l))^2}, \quad (3)$$

де $S_4(l) = \langle |X(x+l) - X(x)|^4 \rangle$ та $S_2(l) = \langle |X(x+l) - X(x)|^2 \rangle$ — моменти четвертого та другого порядків, $X(x)$ — досліджуваний параметр.

Ексцес може приймати значення від 1 до ∞ . Для нормального розподілу $K(l) = 3$. Незважаючи на те, що величина ексцесу є одним із способів відображення характеру переміжності, проте вона не дозволяє зробити кількісного порівняння ступеня і механізму переміжного процесу. Якщо значення ексцесу на різних часових масштабах залишається постійним, то це вказує на відсутність переміжності.

Властивість розширеної самоподібності (ESS) гідродинамічної турбулентності з переміжністю була емпірично виявлена в роботі [14]. Вона полягає у степеневій залежності структурних функцій різних порядків виду $S_q \sim S_p^{\zeta(q)/\zeta(p)}$ і характеризує флуктуації в турбулентних потоках з переміжністю для великого діапазону чисел Рейнольдса. Використовуючи властивість розширеної самоподібності можна знайти з досить хорошою точністю скейлінг структурних функцій $\zeta(q)$ і оцінити тип турбулентних процесів. При цьому нелінійна функціональна залежність $\zeta(q)$ від порядку моменту q для експериментальних даних є наслідком переміжності процесів. Для інтерпретації нелінійного спектру $\zeta(q)$ застосовують логпуассонівські моделі турбулентності, в яких показник степеня структурної функції визначається співвідношенням [24]

$$\zeta(q) = (1 - \Delta) \frac{q}{3} + \frac{\Delta}{1 - \beta} (1 - \beta^{q/3}),$$

де β і Δ — параметри, які характеризують переміжність і сингулярність дисипативних процесів відповідно. Важливо, що в рамках даної моделі розглядається стохастичний мультиплікативний каскад, і логарифм енергії дисипації описується пуассонівським розподілом. Для ізотропної тривимірної турбулентності Ше і Левек (ШЛ) [24] запропонували значення $\Delta = \beta = 2/3$.

Нагадаємо, що для колмогорівської турбулентності K41 скейлінг має лінійну залежність $\zeta(q) = q/3$, а для двовимірної турбулентності $\zeta(q) = q/4$.

ВИКОРИСТАНІ СУПУТНИКОВІ ДАНІ

Методичний аспект досліджень полягав у відборі фізично однорідних сигналів, довжина яких сягає 10000 вимірів для проведення коректного

Рис. 3. Положення супутника «Румба»: *а* — 20 лютого 2005 р., *б* — 1 травня 2008 р.

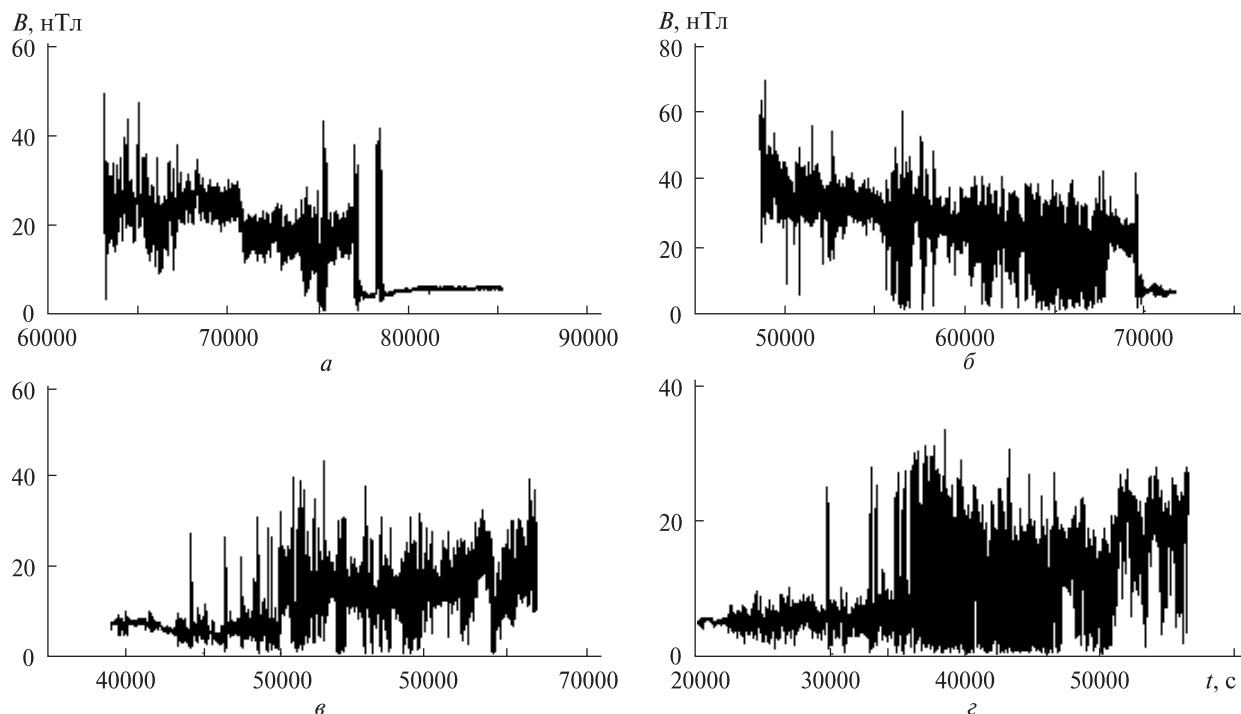
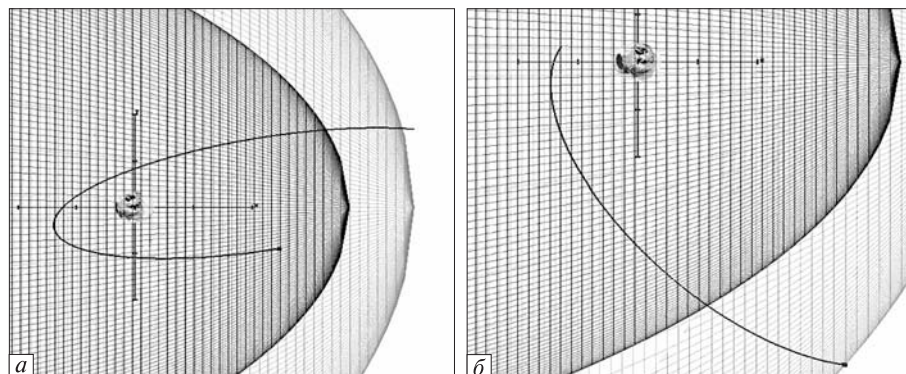


Рис. 4. Значення модуля магнітного поля: *а* — для 20 лютого 2005 р. (17:30—18:00 — МП, 18:00—23:10 — МШ, 23:10—23:40 — СВ), *б* — для 20 лютого 2006 р. (13:30—14:00 — МП, 14:00—19:25 — МШ, 19:25—19:55 — СВ), *в* — для 1 березня 2007 р. (13:30—14:00 — МП, 14:00—19:25 — МШ, 19:25—19:55 — СВ), *г* — для 1 травня 2008 р. (05:35—06:05 — СВ, 06:05—15:10 — МШ, 15:10—15:40 — МП)

аналізу структурних функцій високих (до 9) порядків. Це особливо актуально для областей проходження магнітосферних приграничних шарів. Враховуючи це, в роботі було використано значення магнітного поля, виміряні на супутнику «Румба» космічної місії «Кластер-2» для аналізу часових параметрів турбулентних процесів. Отримано 50 подій перетину області магнітосфери з частотою опитування 22.5 Гц, що мали

місце з 2004 по 2010 рр. Хоча при дослідженнях основна увага приділялася аналізу процесів у перехідних областях, розглядалися також вимірювання у плазмі сонячного вітру та в області магнітопаузи (космічний апарат знаходився в даних областях по 30 хвилин).

Для коректного відбору даних було візуалізовано траєкторію польоту космічного апарата. Приклади траєкторій польоту супутника «Рум-

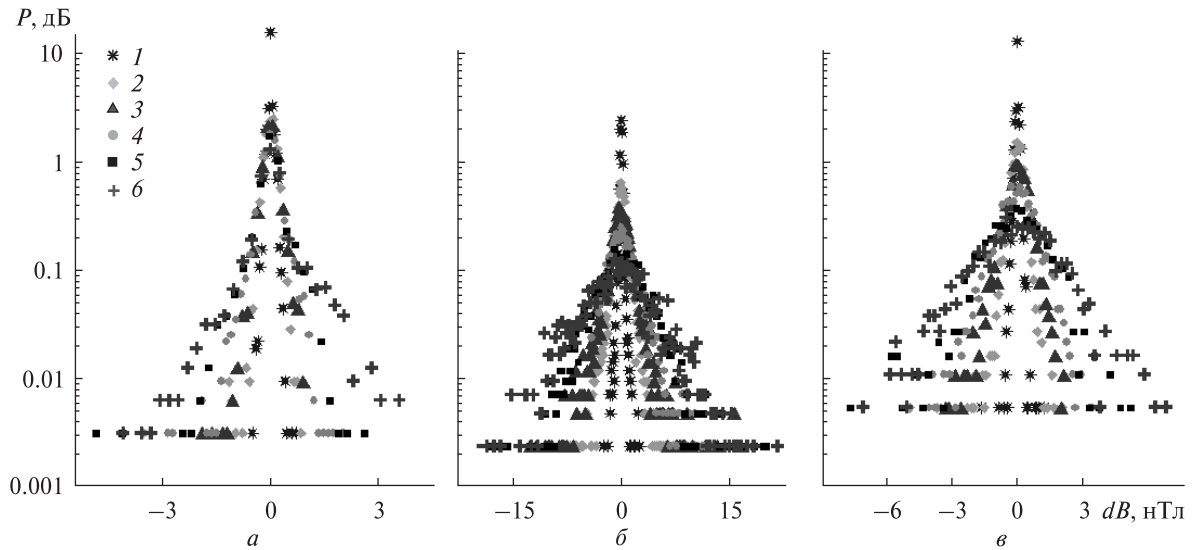


Рис. 5. Залежність функції розподілу густини P ймовірності флуктуацій магнітного поля для 20 лютого 2005 р. від кроку по часу: a — для плазми сонячного вітру, b — для магнітосфери, v — для області магнітопаузи ($I - \tau = \tau_{\min} = 0.00445$ с, $2 - 16\tau_{\min}$, $3 - 32\tau_{\min}$, $4 - 64\tau_{\min}$, $5 - 128\tau_{\min}$, $6 - 222\tau_{\min}$)

ба» космічної місії «Кластер-2» показано на рис. 3, де градаціями сірого показано (зліва направо) область внутрішньої магнітосфери, магнітосфери та міжпланетний простір, пронизаний сонячним вітром. Чорною поверхнею позначено границю магнітопаузи.

Розраховані значення модуля магнітного поля для чотирьох довільним чином вибраних подій, які будуть проаналізовані в даній роботі, приведено на рис. 4. Слід відмітити, що у двох перших подіях супутник перетинав магнітосферу, переходячи із області магнітопаузи у міжпланетне середовище, у двох інших він рухався із плазми сонячного вітру.

Із графіків добре видно, що ситуація в магнітосфері суттєво відрізняється від незбуреного сонячного вітру насамперед набагато вищою змінністю параметрів магнітного поля. Значення магнітного поля досить сильно змінюються відносно своїх середніх значень. Ці флуктуації спостерігаються в широкому діапазоні частот.

За кількісну міру рівня варіацій магнітного поля вибирається відносне стандартне відхилення, тобто стандартне відхилення параметра на деякому інтервалі, віднесене до його середнього значення на цьому інтервалі. При цьому віднос-

ні варіації магнітного поля у магнітосфері перевищують значення в сонячному вітрі приблизно у 2-3 рази. Також важливим фактом є те, що навіть при майже повній відсутності в сонячному вітрі флуктуацій магнітного поля (рис. 4, v , z), у магнітосфері спостерігаються варіації, які мають високий рівень. Крім того, для квазіперпендикулярної ударної хвилі (рис. 4, z) рівень варіацій магнітного поля значно вищий, ніж для квазіпаралельної (рис. 4, v).

Оскільки ми маємо зміну із часом магнітного поля в різних областях магнітосфери, то і аналізувати будемо турбулентні процеси на різних часових масштабах.

АНАЛІЗ ТУРБУЛЕНТНИХ ПРОЦЕСІВ

Для дослідження особливостей функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля вибирався зсув по часу, кратний $\tau_{\min} = 0.00445$ с. Аналізувалися статистичні властивості абсолютного значення варіацій магнітного поля $dB = B(t + \tau) - B(t)$ у магнітосфері, плазмі сонячного вітру та в області магнітопаузи на різних часових масштабах. На рис. 5 подано розподіли для часових зсувів $\tau = \tau_{\min}$, $16\tau_{\min}$, $32\tau_{\min}$, $64\tau_{\min}$, $128\tau_{\min}$, $222\tau_{\min}$. Добре видно, що для плазми сонячного

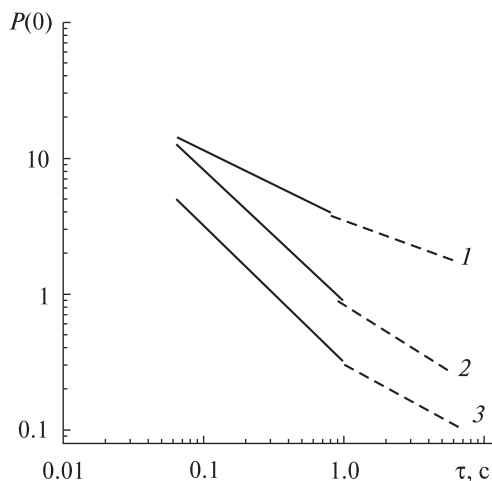


Рис. 6. Значення $P(0)$ максимуму функції розподілу густини ймовірності флуктуацій магнітного поля від кроку по часу в логарифмічному масштабі для 20 лютого 2005 р. Експериментальні точки апроксимувалися прямою $P \propto \tau^{-s}$: 1 — плазма сонячного вітру, 2 — магнітошар, 3 — область магнітопаузи. Значення s подано в табл. 1. Суцільна лінія — для малих часових масштабів, штрихова — для великих

вітру крила набагато менші, ніж для інших областей. Найбільші крила, тобто найбільше відхилення розподілу флуктуацій від нормального процесу, спостерігаються для постшоквої області магнітошару (відразу після перетину фронту ударної хвилі). Слід відмітити, що специфіка дослідження турбулентних процесів, а саме необхідність отримання тривалих рядів даних, не дозволяє достатньо достовірно аналізувати турбулентні процеси в найбільш цікавій області — фронті ударної хвилі.

Залежність значення максимуму $P_\tau(0)$ функції розподілу густини ймовірності флуктуацій магнітного поля від кроку по часу у логарифмічному масштабі для 20 лютого 2005 р. показана рис. 6. Експериментальні точки згідно з (2) апроксимувалися прямою $P_\tau \propto \tau^{-s}$. Для малих масштабів — штрихова лінія, а для великих масштабів — неперервна лінія. Значення показників степеня для всіх розглянутих випадків зібрані в табл. 1.

Із отриманих залежностей можна зробити висновок, що для малих масштабів, за виключенням плазми сонячного вітру, розподіл поміт-

но відхиляється від гауссівського, а на великих масштабах близький до нього. Злам залежності спостерігається поблизу часового зсуву $\tau \approx 1$ с.

При визначенні значення ексцесу флуктуацій магнітного поля будувалися залежності функції (3) у вигляді $K(\tau) = S_4(\tau)/[S_2(\tau)]^2$ від масштабного параметра τ , де зсув за часом для вимірів місії «Кластер-2», як і при розгляді особливостей функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля, був кратним 0.00445 с. Значення ексцесів для плазми сонячного вітру (СВ), перехідного шару та магнітопаузи представлено на рис. 7. Видно, що для плазми СВ значення функції $K(\tau)$ близьке до 3 (нормальний розподіл). Для інших областей значення функції $K(\tau)$ на малих масштабах приймає значення від 120 до 10, при $\tau \approx 1$ с ексцес різко зменшується, а на часових масштабах понад 2 с виходить на значення, близьке до 3. Таким чином, для перехідних областей на малих часових масштабах ми маємо розподіл з гострішою вершиною і крутішими крилами, ніж для нормального розподілу. Отримані залежності повністю підтвердили результати, отримані при аналізі функції густини ймовірностей флуктуацій магнітного поля сто-

Таблиця 1. Показники степеня значення максимуму функції розподілу густини ймовірності флуктуацій магнітного поля для різних часових масштабів

Дата	Положення	s	
		Для часового масштабу 0.00445—0.9968 с	Для часового масштабу 1—10 с
20.02.2005	Сонячний вітер	0.53	0.48
	Магнітошар	0.94	0.54
	Магнітопауза	0.71	0.51
20.02.2006	Сонячний вітер	0.46	0.45
	Середина магнітошару	0.7	0.5
	Магнітопауза	0.79	0.56
01.03.2007	Сонячний вітер	0.51	0.47
	Форшок	0.69	0.51
	Магнітопауза	0.67	0.55
01.05.2008	Сонячний вітер	0.51	0.49
	Постшок	0.99	0.52
	Магнітопауза	0.61	0.53

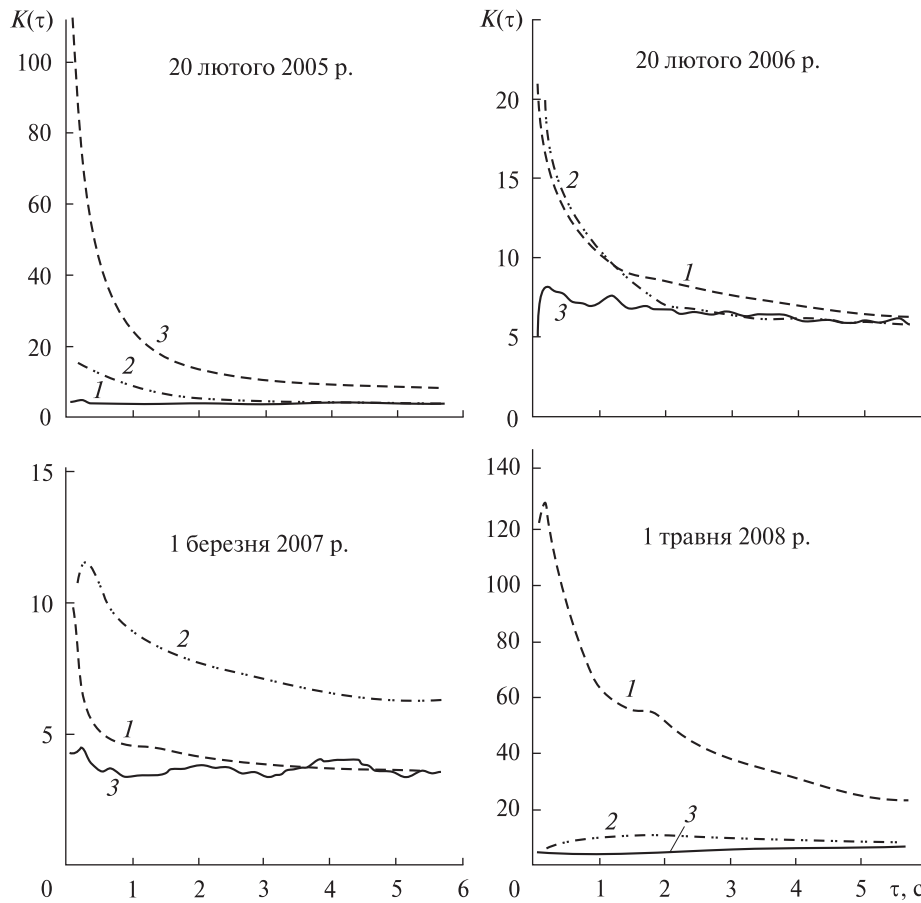


Рис. 7. Залежність величини ексцесу K від масштабного параметра τ для флуктуацій магнітного поля в різних областях магнітосфери: 1 — перехідні області (2005 р. — магнітошар, 2006 р. — середина магнітошару, 2007 р. — форшок, 2008 р. — постшок), 2 — область магнітопаузи, 3 — плазма сонячного вітру

совно двох різних режимів, та підтверджують наявність переміжності турбулентних процесів на малих масштабах у перехідних областях магнітосфери.

Для конкретизації типу турбулентних процесів було проаналізовано особливості структурних функцій (моментів функції густини ймовірності) різних порядків q відповідно до часового інтервалу τ для ряду даних $B(t)$. Структурні функції високих порядків дозволяють охарактеризувати властивості неоднорідності на малих масштабах процесу. При цьому структурна функція (1) визначалася співвідношенням [7, 11]:

$$S_q(\tau) = \langle |B(t+\tau) - B(t)|^q \rangle,$$

де $\langle \dots \rangle$ означає усереднення експериментальних даних за часом. Крім того, має місце степенева залежність структурної функції від зсуву по часу τ :

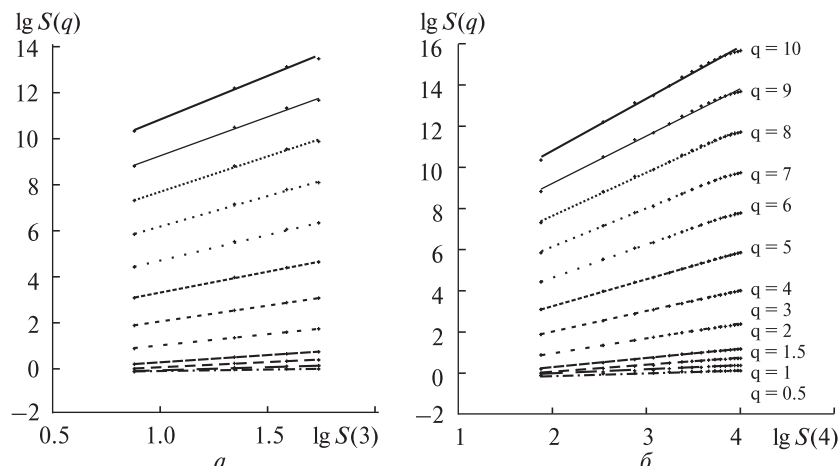
$$S_q(\tau) \propto \tau^{\zeta(q)}.$$

Для лог-пуассонівської ізотропної тривимірної турбулентної каскадної моделі маємо залежність (скейлінг) [17]:

$$\zeta(q) = q/9 + 2[1 - (2/3)]^{q/3}.$$

На практиці властивість узагальненої самоподібності дозволяє підвищити точність визначення скейлінга структурної функції при аналізі експериментальних даних. Скейлінг структурної функції, нормований на скейлінг для третього моменту ($\zeta(q)/\zeta(3)$), може бути отриманий з нахилу графіка в логарифмічному масштабі (рис. 8, а). При цьому будемо мати порівняння експериментальних даних із колмогорівською моделлю турбулентності K41, для якої $\zeta(3) = 3/3 = 1$. Для порівняння ж експериментальних значень із моделлю двовимірної турбулентності Ірошнікова — Крейчана знаходять залежність $\zeta(q)/\zeta(4)$ (рис. 8, б), оскільки для неї $\zeta(4) = 4/4 = 1$.

Рис. 8. Графіки для визначення скейлінгу структурної функції: *a* — $\zeta(q)/\zeta(3)$, *b* — $\zeta(q)/\zeta(4)$. Прямі — лінійна апроксимація даних, числа біля прямих — значення *q*



Результати розрахунку скейлінгів моментів функції густини ймовірності для різних порядків *q* при аналізі маломасштабної турбулентності та порівняння їх із колмогорівською моделлю та двовимірною моделлю Ірошнікова — Крейчнана показані на рис. 9 та 10. Важливим є той факт, що турбулентні процеси у плазмі сонячного вітру близькі до двовимірної моделі Ірошнікова — Крейчнана, а в середині магнітосфери і в форшоковій області описуються ізотропною логпуассонівською каскадною моделлю. У всіх інших розглянутих випадках має місце неізотропність турбулентних процесів в перехідних областях магнітосфери Землі.

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ

Інтенсивні експериментальні дослідження властивостей низькочастотної турбулентності плазми почалися після отримання Бомом його відомої напівемпіричної формули для коефіцієнта поперечної дифузії плазми в сильному магнітному полі (див. [6]):

$$D_B = \frac{1}{16} \frac{k_B T_e}{eB},$$

де k_B — стала Больцмана.

У цій формулі залежність від магнітного поля коефіцієнта дифузії слабша ($D_B \propto 1/B$), ніж у випадку класичної дифузії ($D \propto 1/B^2$), тобто маємо аномальну (підвищену) дифузію плазми в магнітному полі. Аномальна дифузія є результатом турбулентності. У турбулентних областях плазма рухається поперек магнітного поля зі швидкістю

дрейфу $V_T \sim E/B$. Електричне поле приблизно можна оцінити як зміну потенціалу, поділену на характерний просторовий масштаб турбулентних областей δ_T . Даний масштаб можна розглядати при оцінці коефіцієнта дифузії D . Зміну потенціалу можна оцінити за порядком величини як $k_B T/e$, де k_B — стала Больцмана. Тоді значення турбулентного коефіцієнта дифузії $D = \delta_T \cdot V_T \sim k_B T/eB$, що збігається з точністю до чисельного коефіцієнта з формулою Бом.

В результаті проведеного ESS-аналізу можна із рис. 9 отримати значення параметрів логпуассонівського скейлінга β і Δ (табл. 2) і використовувати їх для визначення особливостей турбулентного переносу плазми. У такому підході коефіцієнт узагальненої дифузії залежить від скейлінга структурної функції $\zeta(q)$ як [15, 21]:

$$D \propto \tau^{R(-1)}, R(q) = q - \zeta(3q).$$

Такий скейлінг використовується для оцінки переносу в статистично неоднорідному середовищі. У загальному випадку показник $R(-1)$ визначається фрактальними властивостями середовища.

У табл. 2 для експериментально визначених індексів у різних областях магнітосфери Землі розраховані значення $R(-1) = 0.1 \dots 0.7$. Закон зміщення частинок з часом задається співвідношенням: $\langle \delta x^2 \rangle \propto D\tau \propto \tau^\delta$, з показником $\delta \propto 1 + R(-1) = 1.1 \dots 1.7 > 1$. Така залежність означає існування супердифузії, оскільки для нормальної (броунівської) дифузії $\delta = 1$, а конвективний рух (балістичний) характеризується значенням $\delta = 2$.

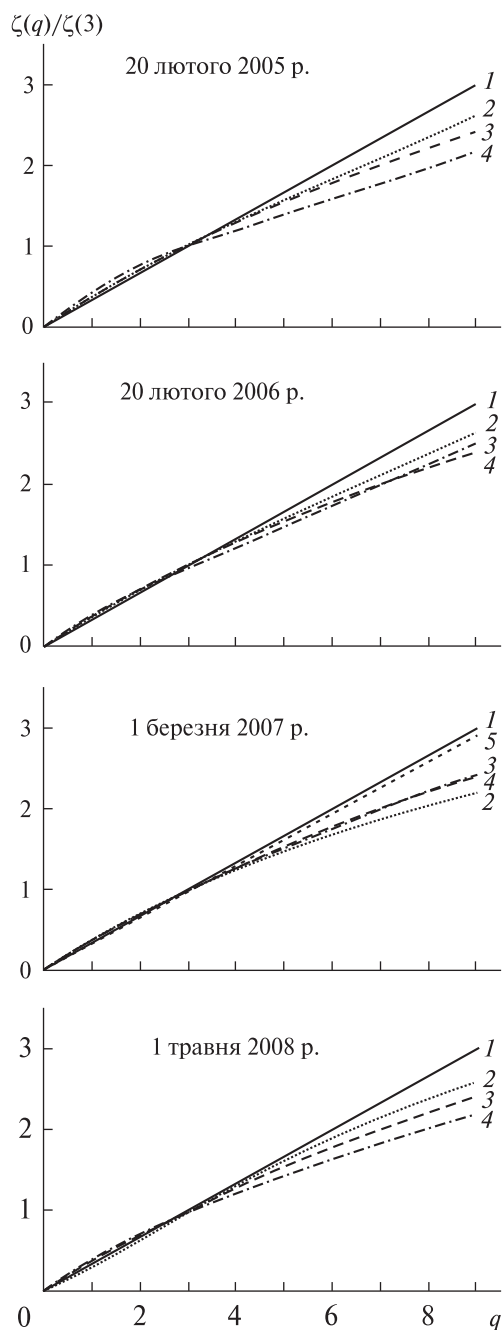


Рис. 9. Значення структурної функції $\zeta(q)/\zeta(3)$: 1 — розраховані по моделі Колмогорова (K41), 2 — по ізотропній логпуасонівській каскадній моделі, 3 — експериментальні дані для області магнітопаузи, 4 — для перехідних областей (2005 р. — магнітошар, 2006 р. — середина магнітошару, 2007 р. — форшок, 2008 р. — постшок), 5 — для плазми сонячного вітру

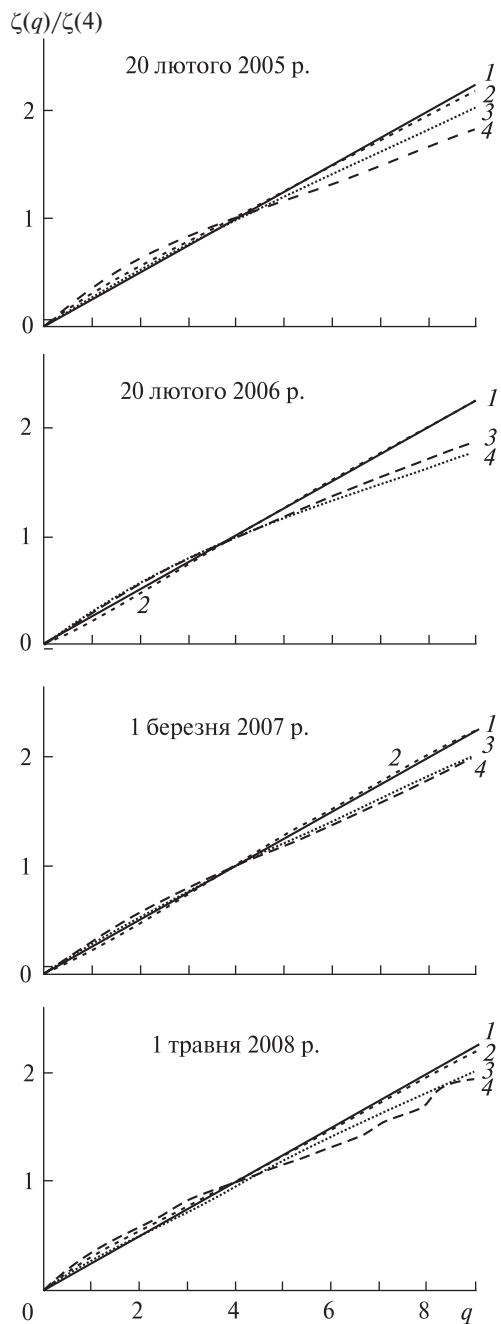


Рис. 10. Значення структурної функції $\zeta(q)/\zeta(4)$: 1 — розраховані по моделі Ірошнікова — Крейчнана; 2 — експериментальні дані для плазми сонячного вітру, 3 — для області магнітопаузи, 4 — для перехідних областей (2005 р. — магнітошар, 2006 р. — середина магнітошару, 2007 р. — форшок, 2008 р. — постшок)

У даній роботі було також отримано оцінку скейлінга зміщення частинок незалежним способом. Для цього ми скористалися рівнянням для супердифузії в турбулентному середовищі з «польотами Леві» (Levy flights) з роботи [25]: $\langle \delta x^2 \rangle \propto \tau^{2s}$, де s — показник степеня максимуму розподілу густини ймовірності флуктуацій магнітного поля $P_{\zeta}(0)$, і $\delta = 2s$. Розраховані параметри показника степеня при аналізі аномальної дифузії з урахуванням зміни висоти максимуму функції густини ймовірності флуктуацій магнітного поля зазначені також в табл. 2. Результати добре узгоджуються з отриманими в ході ESS-аналізу значеннями і незалежно підтверджують наявність супердифузії як у магнітошарі Землі, так і в області магнітопаузи.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що відносні варіації магнітного поля у магнітошарі перевищують значення в сонячному вітрі приблизно у 2—3 рази. При цьому всі істотні зміни у плазмі сонячного вітру і у міжпланетному магнітному полі відображаються в збуреннях аналогічних параметрів у магнітошарі. Однак зворотне судження буде невірним — не всі варіації параметрів у магнітошарі виникають в результаті флуктуації сонячного вітру або міжпланетного магнітного поля, значна частина з них генерується в самому магнітошарі або на його межах. Також можна відмітити, що при пе-

реході від квазіпаралельної до квазіперпендикулярної ударної хвилі рівень варіацій магнітного поля в магнітошарі суттєво нижчий. Джерелами варіацій у магнітошарі є процеси на фронті ударної хвилі. На користь цього свідчить і та обставина, що жодна з наявних гідродинамічних або МГД-моделей течії плазми у магнітошарі не може описати і тим більше передбачити наявність подібних варіацій, які є наслідком кінетичних, а не МГД-процесів.

Аналіз функції розподілу густини ймовірності флуктуацій магнітного поля, отриманих в рамках космічної місії «Кластер-2», показав наявність переміжності у перехідних областях магнітосфери Землі. Для плазми ж сонячного вітру зміна максимуму функції густини ймовірності подібна до типового гауссового розподілу — переміжності немає. Критичним масштабом розглянутих процесів є іонно-циклотронна частота.

Отримані при розгляді функції розподілу густини ймовірності флуктуацій результати повністю узгоджуються із розрахунками ексцесу і ESS-аналізом. При цьому турбулентні процеси у плазмі сонячного вітру приблизно описуються двовимірною моделлю Ірошнікова — Крейчана, а в середині магнітошару і в форшоковій області — ізотропною логпуасонівською каскадною моделлю.

У магнітошарі і на магнітопаузі перенос має супердифузійний характер, що необхідно враховувати при побудові його кількісних моделей.

Таблиця 2. Параметри дифузійних процесів

Дата	Положення	β	Δ	$R(-1) = \Delta(1/\beta - 1)$	$s = \{1 + R(-1)\}/2$
20.02.2005	Сонячний вітер	Відсутність переміжності процесів Нормальна дифузія		0	0.5
20.02.2006					
01.03.2007					
01.05.2008	Магнітошар	0.5	0.4	0.8	0.9
20.02.2005		0.26	0.12	0.35	0.68
20.02.2006	Середина магнітошару	0.67	0.69	0.34	0.67
		0.25	0.18	0.54	0.77
01.03.2007	Форшок	0.62	0.51	0.31	0.66
	Магнітопауза	0.34	0.15	0.29	0.65
01.05.2008	Постшок	0.71	2.22	0.91	0.96
	Магнітопауза	0.17	0.05	0.25	0.63

Автори вдячні за підтримку роботи в рамках спільного українсько-російського гранту № Ф40.2/053, гранту Міжнародного інституту космічних досліджень ISSI (Team 132), INTAS-03-50-4872, INTAS 05-1000008-8050.

1. Баренблатт Г. И. Турбулентные пограничные слои при очень больших числах Рейнольдса // Успехи мат. наук. — 2004. — **59**, № 1 (355). — С. 45—62.
2. Закс Л. Статистическое оценивание. — М.: Статистика, 1976. — 598 с.
3. Заславский Г. М., Сагдеев Р. З. Введение в нелинейную физику от маятника до турбулентности и хаоса. — М.: Наука, 1988. — 368 с.
4. Ирошников П. С. Турбулентность проводящей жидкости в сильном магнитном поле // Астрон. журн. — 1963. — **40**. — С. 742—745.
5. Кадомцев Б. Б. Турбулентность плазмы // Вопросы теории плазмы / Под ред. М. А. Леонтовича. — М.: Атомиздат, 1964. — С. 188—335.
6. Кадомцев Б. Б. Коллективные явления в плазме. — М.: Наука, 1988. — 303 с.
7. Козак Л. В. Статистичний розгляд турбулентних процесів у магнітосфері Землі за вимірами супутника «Інтербол» // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 1. — С. 28—39.
8. Козак Л. В., Пилипенко В. А., Чугунова О. М., Козак П. Н. Статистический анализ турбулентности форошковой области и магнитослоя Земли // Космич. исслед. — 2011. — **49**, № 3. — С. 202—212.
9. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Докл. АН СССР. — 1941. — **30**, № 4. — С. 299—303.
10. Космическая геофизика / Под ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. — М.: Физматлит, 2008. — Т. 1. — 624 с.
11. Новиков Е. А., Стюарт Р. У. Переменяемость турбулентности и спектр флюктуаций диссипации энергии // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз. — 1964. — № 3. — С. 408—413.
12. Савин С. П., Зеленый Л. М., Амата Э. и др. Динамическое взаимодействие потока плазмы с горячим пограничным геомагнитной ловушки // Письма в ЖЭТФ. — 2004. — **79**, № 8. — С. 452—456.
13. Фриш У. Турбулентность: Наследие А. Н. Колмогорова. — М.: Фазис, 1998. — 343 с.
14. Benzi R., Ciliberto S., Tripiccone R., et al. Extended self-similarity in turbulent flows // Phys. Rev. E. — 1993. — **48**. — P. R29—R32.
15. Chechkin A. V., Gorenflo R., Sokolov I. M. Generalized fractional diffusion equations for accelerating subdiffusion and truncated Lévy flights // Phys. Rev. — 2002. — **66**, 046129. — P. 13.
16. Consolini G., Kretschmar M., Lui A. T. Y., et al. On the magnetic field fluctuations during magnetospheric tail current

- disruption: A statistical approach // J. Geophys. Res. — 2005. — **110**. — P. A07202. — doi:10.1029/2004JA010947.
17. Dubrulle B. Intermittency in fully developed turbulence: Log-Poisson statistics and generalized scale covariance // Phys. Rev. Lett. — 1994. — **73**. — P. 959—962.
18. Kraichnan R. H. The structure of isotropic turbulence at very high Reynolds numbers // J. Fluid Mech. — 1959. — **5**. — P. 497—543.
19. Kraichnan R. H. Lagrangian — history closure approximation for turbulence // Phys. Fluids. — 1965. — **8**. — P. 575—598.
20. Kraichnan R. H. Convergents to turbulence functions // J. Fluid Mech. — 1970. — **41**. — P. 189—217.
21. Lovejoy S., Schertzer D., Silas P. Diffusion in One Dimensional Multifractal Porous Media // Water Resour. Res. — 1998. — **34**. — P. 3283—3291.
22. Savin S., Amata E., Zelenyi L., et al. High kinetic energy jets in the Earth's magnetosheath: Implications for plasma dynamics and anomalous transport // JETP Lett. — 2008. — **87**. — P. 593—599.
23. Shevryev N. N., Zastenker G. N. Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks // Planet. and Space Sci. — 2005. — **53**. — P. 95—102.
24. She Z., Leveque E. Universal scaling laws in fully developed turbulence // Phys. Rev. Lett. — 1994. — **72**. — P. 336—339.
25. Treumann R. A. Theory of super-diffusion for the magnetopause // Geophys. Res. Lett. — 1997. — **24**. — P. 1727—1730.

Надійшла до редакції 01.10.11

L. V. Kozak, S. P. Savyn, A. T. Lui, O. O. Tsupko

SOME FEATURES OF TURBULENT PROCESSES IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE FROM CLUSTER MISSION MEASUREMENTS

Statistical features of magnetic field fluctuations in bound regions of the Earth's magnetosphere are investigated on different time scales. The Cluster-2 mission measurements made during 2004—2009 are used for our analysis. Changes in the shape and parameters of probability density function for the magnetic field fluctuations are studied for the time intervals when the satellite was within the magneto-layer, solar plasma wind and magnetopause region. The evolution of the change of the probability density function maximum and kurtosis values are considered and structure functions of different orders are investigated as characteristics of turbulent processes for different time scales. Two asymptotic modes of the change in the maximum height for the probability density function are found which can be described with the use of different power laws. On the basis of the investigation of structure functions of high orders (up to the ninth order), the character of turbulent processes is determined and diffusion in the regions under consideration is studied. It is found that the type of the turbulent processes in the solar wind plasma differ greatly from one in the magneto-layer. Besides, super-diffusion is revealed in transitional regions of the Earth's magnetosphere.

УДК 520.2

А. І. Білінський, Е. Б. Вовчик, Я. Т. Благодир

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка, Львів

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕРНІЗАЦІЇ СУПУТНИКОВОГО ЧОТИРИВІСНОГО МОНТУВАННЯ ЛД-2

Наведено математичні викладки розрахунку координат для чотиривісного монтування. Порівнюються результати розрахунків відповідних координат та швидкостей їхньої зміни для двовісного (альт-азимутального) та чотиривісного монтування. Відмічено переваги чотиривісного монтування для супроводу штучних супутників Землі. Допустимі значення координат та швидкостей їхньої зміни при супроводі супутника та зорі будуть використані під час подальшої модернізації гідувального монтування ЛД-2 у Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка.

ВСТУП

Із запуском першого штучного супутника 4 жовтня 1957 р. розпочалась нова ера спостережної астрономії. Проте класичні гідувальні монтування технічно не задовольняли вимоги компенсації видимого руху ШСЗ при фотографічних спостереженнях. Тому на той час було розроблено низку спеціалізованих монтувань — ВАУ, АФУ-75, SBG, ЛД-2, ЛД-3 [5].

У Львові на чотиривісному гідувальному монтуванні від фотографічної камери АФУ-75 було встановлено низку фотометрів для спостереження ШСЗ [1, 2] (рис. 1, а). Чотиривісна система ЛД-2, розроблена спеціально для проведення лазерних віддалемірних спостережень, спочатку недовго використовувалась для лазерних спостережень ШСЗ, а пізніше для фотометричних спостережень, тобто було відключено лазер, і сигнал від фотопомножувача подано на спеціальну реєструвальну систему [8, 9]. Згодом було прийнято рішення, що на чотиривісному гідувальному монтуванні ЛД-2 будуть встановлені два 35-см телескопи системи Кассегрена (рис. 1, б), а оптико-механічна частина віддалеміра буде замінена на фотометр-поляриметр [10].

Значною перешкодою на шляху пристосування ЛД-2 для фотометричних спостережень стало

питання супроводу зір. Як відомо, напівавтоматичний супровід супутників гідувальним монтуванням ЛД-2 виконується з допомогою електро-механічної системи стеження, котра здійснює поворот по обітальній осі, отримуючи відповідні дані у вигляді керівних сигналів від програмного давача топоцентричної кутової швидкості $\omega = a + b\sin 2\gamma + c\cos 2\gamma$, де a , b , c — константи для одного проходження вибраного супутника розраховані з відповідних ефемерид, γ — кут повороту орбітальної осі, то така реалізація гідування не дозволяла проводити супровід зорі з точністю краще $30''$ — а саме такий розмір робочої діафрагми фотометра.

Тому виникло питання про точніший автоматичний супровід супутників та зір телескопом на чотиривісному монтуванні ЛД-2. Першим кроком у цьому напрямі є розгляд математичних алгоритмів, їхнє практичне застосування, аналіз результатів моделювання та теоретичних розрахунків, чому й присвячена дана робота.

РОЗРАХУНОК ТОПОЦЕНТРИЧНИХ КООРДИНАТ СУПУТНИКА ДЛЯ ЧОТИРИВІСНОГО МОНТУВАННЯ

Представимо видимий рух супутника дугою на небесній сфері (рис. 2), де Z — точка зеніту, велике коло B_1BEE_1 — горизонт спостерігача.

Дуга BCE — видима траєкторія руху ШСЗ на небесній сфері, дуга B_1CE_1 — наближення видимої траєкторії малим колом [3, 4, 6]. Точка

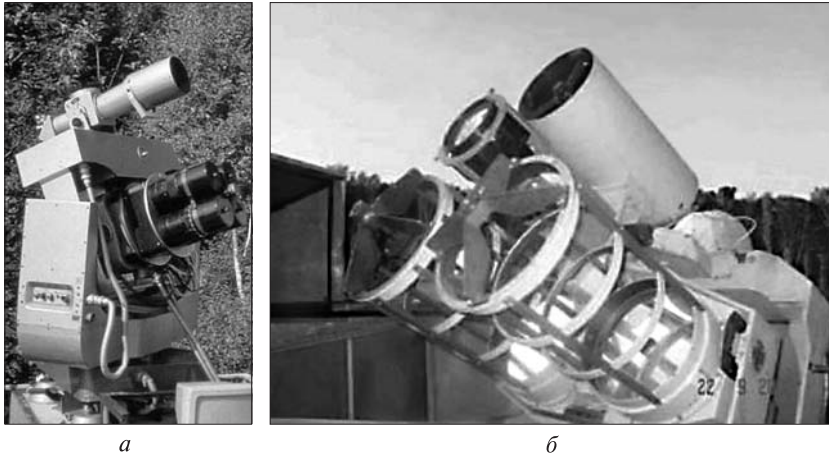


Рис. 1. Системи об'єктивів на чотиривісних монтуваннях: а — АФУ-75, б — ЛД-2

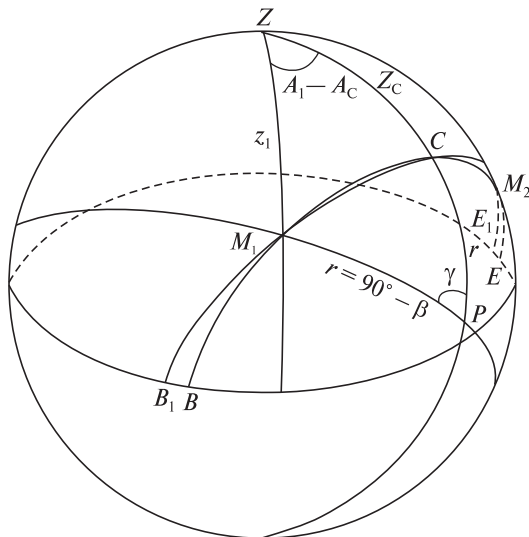


Рис. 2. Орбіта супутника та її наближення малим колом на небесній сфері

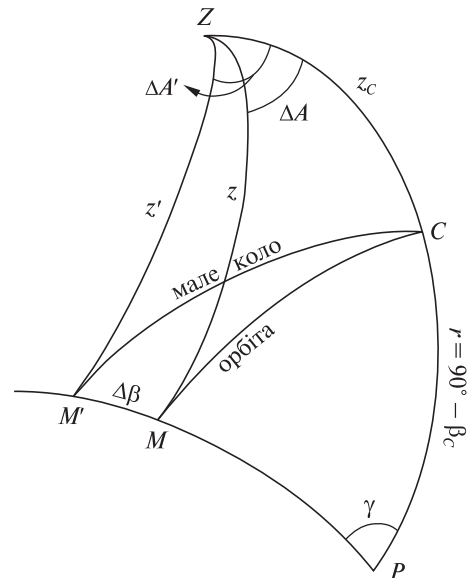


Рис. 3. Сферичні трикутники для розрахунку $\gamma(t)$ та $\Delta\beta(t)$

C — кульмінація траєкторії супутника, задана координатами A_c, z_c . Для розрахунку параметра β_c орбітальної широти точку M_1 (M_2) виберемо таким чином: $z_1 = 45^\circ + z_c/2$ при $z_1 < 60^\circ$, або $z_1 = z_0 = z(t_0)$ при $z_1 \geq 60^\circ$.

Розв'язавши сферичний трикутник ZPM_1 та ввівши позначення $r = 90^\circ - \beta_c$ — радіус малого кола $B_1M_1CM_2E_1$, отримаємо

$$\operatorname{tg} \beta_c = \frac{\sin z_1 \cos(A_1 - A_c) \cos z_c - \cos z_1 \sin z_c}{1 - \cos z_1 \cos z_c - \sin z_1 \cos(A_1 - A_c) \sin z_c}. \quad (1)$$

Для розрахунку $\gamma(t)$ розглянемо сферичні трикутники ZPM' та ZPM , показані на рис. 3. Точка

M реальної орбіти задана параметричним виглядом $A = A(t)$, $h = h(t)$. Знаходимо відповідний кут $\gamma = \gamma(t)$, використовуючи аналогії Неппер:

$$\gamma = \arctg \left\{ \frac{\cos [(z_p - z)/2]}{\operatorname{tg}[(\Delta A)/2] \cos [(z_p + z)/2]} \right\} - \arctg \left\{ \frac{\sin [(z_p - z)/2]}{\operatorname{tg}[(\Delta A)/2] \sin [(z_p + z)/2]} \right\}, \quad (2)$$

де $\Delta A = A - A_c$, $z_p = z_c + r$. Тоді $\Delta\beta = PM - PM'$,

$$\Delta\beta = \arccos(\cos z \cos z_p + \sin z \sin z_p \cos(A - A_c)) - 90^\circ + \beta_c. \quad (3)$$

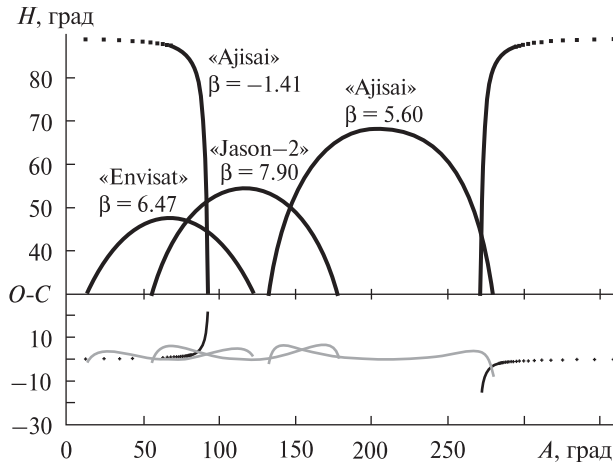


Рис. 4. Результати розрахунків орбіт у наближенні малого кола

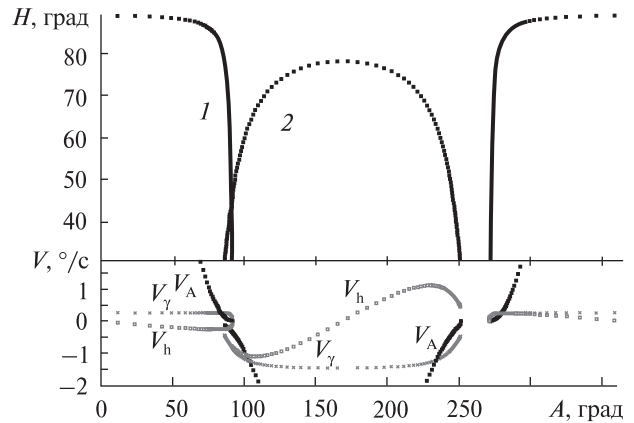


Рис. 5. Порівняння швидкостей гідуювання супутників (1 — «Ajisai», $R_{\text{пер}} = 1480$ км, 2 — «Champ», $R_{\text{пер}} = 290$ км) двовісним та чотирирівневим монтуваннями

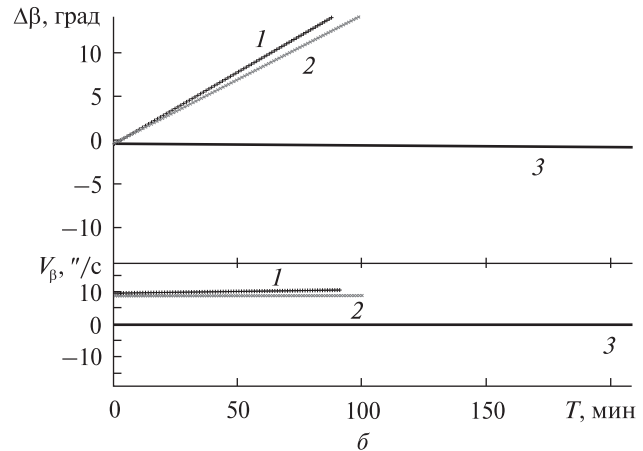
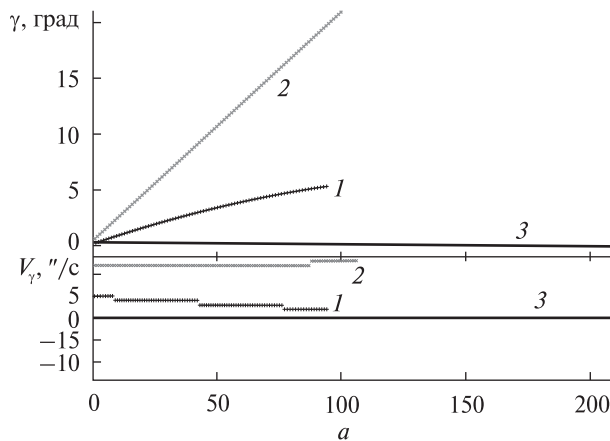


Рис. 6. Зміна з часом координат γ (а) і $\Delta\beta$ (б) при гідуюнні вибраних зір: 1 — Капелла, 2 — Прокіон, 3 — Полярна

Отже, отримані формули (1)–(3) відображають видиму траєкторію супутника у системі координат чотирирівневого монтування. Тоді видима траєкторія задається у параметричній формі A_c , $h_{\text{set}} = h_c + \beta_c$, β_c , $\gamma = \gamma(t)$, $\Delta\beta = \Delta\beta(t)$.

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ

Результати розрахунків проходжень трьох супутників 12 березня 2010 р. із різними перигеями орбіт — від 780 («Envisat») до 1480 км («Ajisai») наведено на рис. 4. Різниця $O - C$ між реальною орбітою та наближеною (рис. 4), що відповідає значенням корекцій $\Delta\beta$, у більшості випадків не

перевищує $\pm 10'$ для усіх проходжень, а значення $\Delta\beta = 0$ відповідає перетину реальної орбіти та наближеної малим колом. Для проходжень супутників з кульмінацією поблизу зеніту точність дещо гірша, проте залишається на прийнятному рівні $\pm 30'$.

Таким чином, проходження для чотирирівневого монтування розраховано з достатньою точністю для гідуювання супутників.

Результати порівняння швидкості гідуювання супутників двовісним монтуванням та з допомогою чотирирівневого монтування приведено на рис. 5. Для прикладу взято проходження з куль-

мінацією поблизу зеніту супутника «Ajisai» та супутника «Champ» з перигеями орбіт $R_{\text{пер}} = 1480$ та 290 км відповідно.

На рис. 5 у нижній частині приведено графіки швидкостей гідуювання по координатах A та h альт-азимутального монтування, а γ — чотиривісного монтування. Діапазон $\pm 2^\circ/\text{с}$ вибрано з експериментальних досліджень монтування телескопа ТПЛ-1М АО ЛНУ [7]. Видно, що швидкість V_A відслідковування по азимуту для обох супутників виходить за допустимі межі, тобто телескопом ТПЛ-1М неможливо спостерігати супутники протягом усього проходження. У той же час швидкість гідуювання V_γ при чотиривісному монтуванні навіть для швидкого супутника «Champ» менша за $1.5^\circ/\text{с}$. Таким чином, це значення потрібно брати до уваги при вдосконаленні електромеханічної частини чотиривісного монтування ЛД-2.

На рис. 6 наведено зміни з часом координат β та їхніх швидкостей для зір Капелла (у зеніті), Проціон (поблизу екватора) та Полярна на 30 березня 2010 р. 14:00 UTC. Таким чином при використанні методики гідуювання зір розрахунки показують, що граничне значення $\beta = \pm 15^\circ$ досягається після майже 100 хвилин гідуювання зір з малими схиленнями, що є достатнім для практичних задач.

ВИСНОВКИ

Отримано аналітичні формули розрахунку положень зір та супутників у системі координат чотирьохвісного гідувального монтування ЛД-2. Із моделювання проходжень супутників над горизонтом станції спостереження отримано верхню межу швидкості зміни координати орбітальної довготи $\gamma = 1.5^\circ/\text{с}$. Для зір поблизу небесного екватору та зеніту отримано обмеження на тривалість супроводу — не довше 100 хвилин, що є цілком достатнім для задач калібрування апаратури та юстування оптики. Ці дані будуть використані при подальшій модернізації гідувального монтування ЛД-2. Складені алгоритми та програми будуть використані для розробки відповідного програмного забезпечення керування ЛД-2.

1. Вовчик Е. Б. Повышение точности электрофотометрических наблюдений искусственных небесных тел при работе на малых телескопах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 1984. — 15 с.
2. Вовчик Е., Выгон В., Крупей С. и др. Двухцветные наблюдения ИНТ // Наблюд. искусств. небес. тел. — 1988. — № 84. — С. 120—125.
3. Лапушка К. К. Спутниковая фотокамера АФУ-75: Руководство для работы. — Рига, М.: Астросовет АН СССР, 1971. — 174 с.
4. Лийгант М., Эйнасто Я. К теории автоматических телескопов для наблюдения искусственных спутников Земли // Астрон. журн. — 1960. — 37, вып. 6. — С. 1087—1095.
5. Масевич А. Г., Лозинский А. М. Фотографические наблюдения искусственных спутников Земли // Науч. информ. — 1970. — № 18. — С. 3—36.
6. Юров Е. А. Сравнение точности наблюдений ИСЗ на лазерных дальномерах «Интеркосмос» с точностью наблюдений на камерах АФУ-75 // Науч. информ. — 1986. — № 58. — С. 14—22.
7. Blagodyr Ja., Bilinsky A., Martynyuk-Lototsky K., et al. Overview and performance of the Ukrainian SLR station «Lviv-1831» // Artif. Satell. — 2007. — 42, N 1. — P. 9—15.
8. Vovchik Ye., Blagodyr Ya., Bilinsky A., et al. The electro-photometric observations of the artificial objects // Adv. Space Res. — 2001. — 28, N 9. — P. 1309—1313.
9. Vovchik Ye., Blagodyr Ya., Bilinsky A., et al. Electro-photometry of the artificial celestial bodies. Problems of the instrument equipment, observations, interpretation of the results // Astron. and Astrophys. Transactions. — 2003. — 22, N 4-5. — P. 645—650.
10. Vovchik Ye., Blagodyr Ya., Bilinsky A., Lohvynenko A. Electrophotometry of artificial celestial bodies: equipment problems, observation and interpretation of the results // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. — 2004. — 88. — P. 211—217.

Надійшла до редакції 04.05.11

A. I. Bilinsky, Ye. B. Vovchik, Ya. T. Blagodyr

THEORETICAL ASPECTS OF THE MODERNIZATION OF THE SATELLITE FOUR-AXIS MOUNTING LD-2

Full analytic calculations for the coordinates of the four-axis guiding mounting are given. Our computational results for the two-axis and four-axis guiding mountings are compared. Some advantages of four-axis mounting for the guiding of low-orbit Earth artificial satellites are shown. Acceptable values for coordinates and for velocities of their change during a satellite (star) guiding will be used for further modernization of the guiding mounting LD-2 in the Astronomical Observatory of the LNU.

УДК 629.783 (09)

А. В. Дегтярев

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне», Дніпропетровськ

50 ЛЕТ НА КОСМИЧЕСКИХ ОРБИТАХ

Описуються передумови виникнення та подальшого успішного розвитку в КБ «Південне», одного із провідних підприємств-розробників бойових ракетних комплексів стратегічного призначення, нового напрямку діяльності — створення ракет-носіїв та космічних апаратів (КА). Описано етапи роботи КБ «Південне» із створення КА, приводиться їхній перелік, коротко описано характеристики і конструктивні особливості апаратів. Зроблено огляд космічних досліджень, здійснених з 1962 по 2012 рр. з використанням цих апаратів. Показано вклад КБ «Південне» в рішення науково-технічних проблем створення кількох поколінь КА та його роль у вивченні та використанні космічного простору у рамках програм «Космос» та «Інтеркосмос», а також у рамках реалізації Національних космічних програм України.

16 марта 1962 г. телеграфное агентство Советского Союза ТАСС опубликовало сообщение, которое было напечатано на первой странице газеты «Правда», и сразу же было распространено всеми ведущими мировыми информационными агентствами. В сообщении под заголовком «На орбите — новый спутник» сообщалось, что «в Советском Союзе произведен очередной запуск искусственного спутника Земли. По предварительным расчетам спутник вышел на орбиту с перигеем 217 км и апогеем 980 км. Период обращения спутника составляет 96.35 мин. Угол наклона плоскости орбиты спутника к плоскости экватора составляет 49 град. На борту спутника установлена научная аппаратура, радиотелеметрическая система и радиопередатчик, работающий на частотах 20.003 и 90.013 МГц. Наблюдение за спутником и прием телеметрических данных производится наземными пунктами командно-измерительного комплекса, расположенными на территории СССР. Запуск искусственного спутника Земли является продолжением осуществляемой программы исследования верхних слоев атмосферы и космического пространства, для выполнения которой в течение 1962 г. с различных космодромов Советского Союза будет произведена серия запусков искусственных спутников Земли.»

В сообщении говорилось, что наряду с выполнением научной программы исследований физики верхних слоев атмосферы и космического пространства будут отрабатываться многие элементы конструкции космических аппаратов.

Только ограниченный круг специалистов в СССР в то время знал, что за сказанными словами о продолжении осуществления упомянутой программы кроется появление в стране новой ракеты-носителя и спутника, явившихся результатом напряженной творческой работы коллективов ОКБ-586 и завода 586, как в то время назывались ГП КБ «Южное» и ПО «Южный машиностроительный завод», в кооперации с коллективами сотрудников многих организаций, предприятий, институтов и воинских частей Советского Союза.

В ходе орбитального полета космического аппарата «Космос-1» была не только подтверждена правильность технических решений, принятых при создании аппарата, но и было осуществлено исследование прохождения радиоволн в верхних слоях атмосферы с помощью четырехчастотного радиопередатчика «Маяк», результатом которого явилось обнаружение и определение спектра крупномасштабных природных образований в ионосфере и углов рефракции радиоволн.

Широкомасштабное исследование околоземного пространства, начатое в 1960-е годы в СССР, явилось следствием опережающего развития бо-

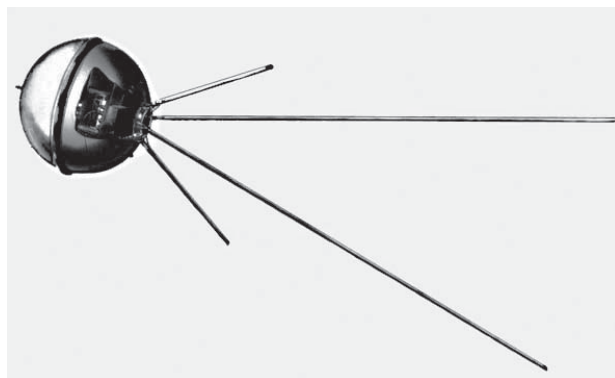


Рис. 1. Космический аппарат ДС-2 «Космос-1»

своей ракетной техники стратегического назначения, на основе которой были созданы новые ракеты-носители, открывшие преимущества и для создания космических аппаратов различного назначения. К этому времени многие академические институты страны были в значительной мере подготовлены в научном плане к постановке и проведению экспериментальных и прикладных исследований в космосе. Одновременно военно-политическая обстановка в мире диктовала необходимость создания и использования космических средств в интересах обороны. Конструкторское бюро «Южное», как одно из головных предприятий страны по созданию боевых ракетных комплексов стратегического назначения, опирающееся на огромную по своим масштабам разветвленную кооперацию организаций и предприятий различных отраслей науки и промышленности, и прежде всего на мощную экспериментально-производственную базу ПО «Южный машиностроительный завод», оказалось, таким образом, в положении лидера, способного использовать накопленный потенциал не только в направлении создания ракет-носителей, но и разработки космических аппаратов (КА).

Первым опытом КБ «Южное» на последующем полувековом пути своей космической деятельности было создание ракеты-носителя 63С1 и запуск этой ракетой 16 марта 1962 г. космического аппарата ДС-2 (рис. 1), положившего начало реализации долгосрочной космической программы космических исследований «Космос» и получившего почетное наименование «Космос-1».

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ПОИСКОВОГО ЭТАПА РАБОТ

Одной из важнейших задач для Советского Союза, решаемой в тот период времени, когда КБ «Южное» в кооперации с многими предприятиями, организациями и институтами страны проводило работы по созданию ракеты-носителя 63С1 и космических аппаратов, было определение потенциальных областей эффективного применения космической техники и формирование планов проведения проектно-конструкторских и экспериментальных работ, направленных на выработку заключений о возможности создания эксплуатационных космических систем и требований к ним.

Совместными усилиями Академии наук и Министерства обороны СССР была подготовлена и утверждена в августе 1960 г. программа первой очереди пусков ракеты-носителя 63С1. В программу вошли задания на разработку и запуск космических аппаратов, на которых наряду с решением исследовательских задач должны были ставиться и военно-прикладные эксперименты. Разработка этих космических аппаратов с учетом обеспечения их запусков ракетой-носителем 63С1 была поручена КБ «Южное».

Первыми из этих аппаратов стали аппараты ДС-А1, ДС-П1 и ДС-К8. Космический аппарат ДС-2 разрабатывался Конструкторским бюро «Южное» с основной задачей — обеспечение проведения лётно-конструкторских испытаний ракеты-носителя 63С1. Всем указанным аппаратам, как и многим другим разрабатываемым длительное время КБ «Южное», был присвоен индекс ДС — «Днепропетровский спутник». Уже к декабрю 1961 г. была выпущена проектная документация на аппараты ДС-А1, ДС-П1, ДС-К8. В июне 1962 г. был выведен на орбиту первый из указанных аппаратов — ДС-П1. Дальнейшей программой пусков ракеты-носителя 63С1, утвержденной в июле 1962 г., кроме уже известных аппаратов ДС-А1 и ДС-П1, предусматривалось запустить вновь разработанные исследовательские аппараты ДС-МТ и ДС-МГ. Реализация программы пусков ракеты-носителя была завершена в июле 1965 г. запуском космического аппарата ДС-А1.

Космические аппараты ДС-2, ДС-А1, ДС-К8, ДС-П1, ДС-МГ, ДС-МТ, являющиеся космическими аппаратами поискового этапа работ КБ «Южное» по созданию космических аппаратов, были выполнены с максимально возможным использованием общей конструктивной и аппаратной схемы. Блоки аппаратуры обеспечивающих систем и исследовательской аппаратуры располагались на фермах внутри герметичного корпуса, состоящего из двух полусферических днищ и цилиндрической проставки диаметром 800 мм. Датчики исследовательской аппаратуры устанавливались на цилиндрической части корпуса верхнем днище. Все указанные аппараты поискового этапа были разработаны без использования систем ориентации в пространстве. Исключение составил космический аппарат ДС-МО, который дополнил состав аппаратов поискового этапа и был укомплектован аэрогироскопической системой ориентации. Этот аппарат, известный под наименованием «Космическая стрела», был оснащен выдвижным аэродинамическим стабилизатором.

На аппарате ДС-П1 впервые в практике КБ «Южное» была применена солнечная батарея.

Назначением космического аппарата ДС-2 являлась отработка ракеты-носителя 63С1 и исследование прохождения радиоволн в верхних слоях атмосферы. Во время нахождения аппарата на орбите впервые было обнаружено наличие и определен диапазон крупномасштабных неоднородных образований в ионосфере, определены углы рефракции радиоволн.

Задачи космического аппарата ДС-А1:

- изучение уровня естественного фона в околоземном космическом пространстве;
- исследование излучений, возникающих при ядерных взрывах на больших высотах;
- отработка методов и средств обнаружения высотных ядерных взрывов, получение данных для создания необходимой аппаратуры для дальнейшего проведения таких работ;
- определение концентрации ионов и изучение распространения радиоволн в ионосфере.

Космический аппарат ДС-А1 явился первым из серии аппаратов, на которых были поставлены и решены задачи обнаружения и определения мощности и районов высотных ядерных взрывов.

Задачи космического аппарата ДС-МГ:

- проведение глобальной съемки магнитного поля Земли;
- изучение магнитного поля Земли путем составления карты пространственного распределения магнитного поля;
- исследование векового хода магнитного поля Земли и его временных изменений в магнитоактивные периоды.

Во время эксперимента, проведенного с использованием КА ДС-МГ, была выполнена магнитная съемка по густой сетке 75 % поверхности Земли. Данные были использованы для получения международной аналитической модели магнитного поля Земли.

Задачи космического аппарата ДС-МТ:

- решение научных задач по исследованию зимних метеорных потоков и влияния метеорных частиц на поверхность космического аппарата;
- обнаружение антивещества в метеорных потоках;
- фотометрическое измерение участков звездного неба в ультрафиолетовой и видимой частях спектра.

В ходе проведения экспериментов с использованием космического аппарата ДС-МТ зафиксирован ряд случаев соударения КА с метеоритами. Сделан вывод о необходимости повторения экспериментов по изучению микрометеоритов с использованием более совершенной аппаратуры.

Задачи космического аппарата ДС-МО (оптического):

- проведение исследований пространственно-временных вариаций радиационного баланса Земли и ее атмосферы в видимой, ближней ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра;
- получение изображений облачного покрова Земли и подстилающей поверхности с целью объективной параметризации синоптических состояний атмосферы;
- определение температуры подстилающей поверхности Земли;
- определение верхней границы облаков;
- испытание работы аэрогироскопической системы ориентации.

Результаты экспериментов, проведенных на космических аппаратах ДС-МО, позволили успешно завершить космическую программу изу-

чения отраженной Землей солнечной радиации в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра, а также собственного излучения Земли в инфракрасном диапазоне и разработать методы определения некоторых параметров атмосферы, облаков и земной поверхности, которые были рекомендованы для практического использования в метеорологии.

Задачи космического аппарата ДС-К8:

- экспериментальная отработка методов и средств измерений параметров сигналов радиолокационных станций;
- исследование метеорного вещества в окрестности Земли.

В ходе проведения эксперимента с использованием КА ДС-К8 проведены измерения сигналов радиолокационных станций и уточнение требований к бортовой целевой аппаратуре, зарегистрированы удары метеорных частиц.

Задачи космического аппарата ДС-П1:

- проверка и отработка в натурных условиях методик и аппаратных средств решения задач юстировки, контроля точности и определения потенциала радиолокационных станций систем противовоздушной, противоракетной и противокосмической обороны;
- проведение научного эксперимента по изучению характеристик космического пространства.

Поисковый этап работ ОКБ-586 по космической тематике завершился в марте 1967 г. запуском малого космического аппарата оптической комплектации ДС-МО, замкнувшим программу пусков ракеты 63С1.

В общей сложности на этом этапе было осуществлено 15 успешных запусков космических аппаратов восьми типов.

УНИФИЦИРОВАННЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Результаты поискового этапа работ КБ «Южное» в области создания космических аппаратов стимулировали мощный поток заявок различных организаций страны на создание новых космических аппаратов и оснащение их аппаратурой различного целевого назначения. Выполнение этого объема заявок без принятия радикальных мер по сокращению времени и снижению стоимости разработки и изготовления космических аппаратов было невозмож-

ным. Важным шагом по решению возникшей проблемы явилось предложение КБ «Южное», поддержанное ЦНИИМаш — головным институтом Министерства общего машиностроения — и многими научными учреждениями страны, и оформленное затем в виде Решения о создании по техническому заданию АН СССР первой в мире серии унифицированных космических аппаратов.

В результате обобщения опыта проектирования, изготовления и эксплуатации космических аппаратов разработки КБ «Южное» был выбран основной принцип унификации — независимость комплекса обеспечивающих систем, конструкции аппарата и схемы управления бортовой аппаратурой от конкретной решаемой научной задачи. Этот принцип, положенный в основу технического облика создаваемых аппаратов, дал возможность организовать серийное производство космических аппаратов и их комплектующих элементов, и тем самым расширить фронт проведения научных исследований в околоземном космическом пространстве. Было очевидно, что многообразие исследовательских задач с различными требованиями и условиями проведения экспериментов не позволяет удовлетворить эти требования на одном типе унифицированного космического аппарата.

В результате анализа всей совокупности требований к подсистемам космического аппарата: энергоснабжения, ориентации, бортовому комплексу управления было принято решение о создании трех модификаций унифицированной платформы космического аппарата: неориентированной в пространстве с химическим источником электроэнергии — ДС-У1, неориентированной с солнечными батареями — ДС-У2 и ориентированной на Солнце — ДС-У3 (рис. 2).

Эскизный проект унифицированных космических аппаратов был разработан в 1963 г. Всего в серии унифицированных космических аппаратов в период с 1963 по 1976 гг. было разработано, изготовлено и выведено на орбиту 49 космических аппаратов. Унифицированные платформы стали инструментальной основой для организации международного сотрудничества в области исследования космического пространства по программе «Интеркосмос».

Конструктивно-компоновочная схема каждой модификации платформы предусматривает возможность оснащения ее комплектами научной аппаратуры без доработки конструкции платформы и обеспечивающего аппаратного комплекса. Основным узлом каждой модификации платформ являлся герметичный корпус, обеспечивающий нормальное функционирование электронных блоков научной и обеспечивающей аппаратуры в требуемых климатических условиях газовой среды заданного состава. Корпус диаметром 800 мм и длиной 1460 мм, состоящий из цилиндрической обечайки и двух полусферических днищ, условно разделен на три отсека: научной аппаратуры, комплекса обеспечивающих систем и системы электроснабжения. Все отсеки имеют унифицированные посадочные места для крепления рам для установки соответствующих блоков аппаратуры. Сферическая оболочка отсека научной аппаратуры имела в вершине полусферы и по поверхности фланцы, на которых были предусмотрены посадочные места для установки приборов и датчиков научной аппаратуры, а также штанг с датчиками и антеннами научной аппаратуры.

Конструкция платформы модификации ДС-У2 отличалась от конструкции платформы ДС-У1 тем, что на специальные бобышки средней части корпуса устанавливалась солнечная батарея.

Платформа модификации ДС-У3 отличалась от платформы модификации ДС-У2 конструкцией цилиндрической части корпуса и солнечной батареи.

Установка электронных блоков научной аппаратуры осуществлялась внутри корпуса на раме научной аппаратуры. Установка датчиков и приборов научной аппаратуры, ориентируемых на Солнце, предусматривалась снаружи корпуса на специальных рамах и кронштейнах, прикрепленных к силовому фланцу передней полусферической оболочки отсека научной аппаратуры.

На базе платформы ДС-У1 было создано 4 модификации космических аппаратов в рамках реализации программы космических исследований, проводимых институтами АН СССР: ДС-У1-Г (геодезический), ДС-У1-А (астрономический), ДС-У1-Я (ядерный), ДС-У1-Р (рентгеновский). Кроме того, одна модификация ДС-У1-ИК

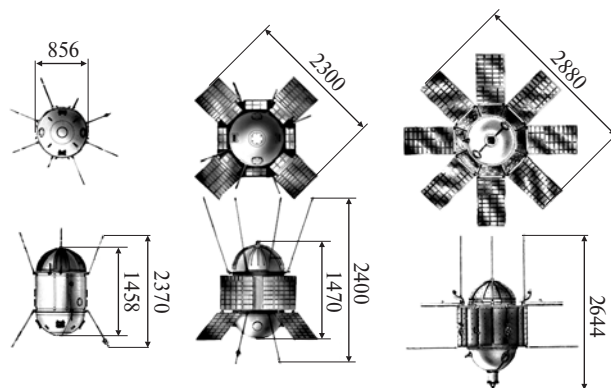


Рис. 2. Унифицированные платформы КА ДС-У1, ДС-У2, ДС-У3

(ионосферный и атмосферный) была создана в рамках программы «Интеркосмос». В проведении эксперимента, проводившегося на этом космическом аппарате, участвовали научные организации НБР, ГДР и ЧССР. Всего на орбиту в период с 1996 по 1972 гг. ракетой-носителем «Космос» было выведено 7 космических аппаратов, созданных на базе платформы ДС-У1.

На базе платформы ДС-У2 было создано 11 модификаций космических аппаратов в рамках реализации программы космических исследований, проводимых институтами АН СССР: ДС-У2-М (молекулярный), ДС-У2-И (ионосферный), ДС-У2-МП (метеоритный), ДС-У2-Д (дозиметрический), ДС-У2-ГК (геодезический комплексный), ДС-У2-ГФ (гелиофизический), ДС-У2-МГ (магнитный), ДС-У2-ИП (ионосферный полярный), ДС-У2-К (геофизический полярный), ДС-У2-МТ (метеоритный), ДС-У2-ГКА («Ореол»). Программа научных исследований, проводимых с использованием КА «Ореол», предусматривала исследование явлений и процессов, проходивших в высокоширотных областях верхней атмосферы Земли и изучение природы полярных сияний. В работах по этой программе непосредственное участие принимали специалисты французского Центра по изучению космического излучения, впоследствии CNES (г. Тулуза), в рамках реализации совместной советско-французской программы «Аркад».

Кроме того, на базе платформы ДС-У2 был создан космический аппарат ДС-У2-В (вибрационный), назначением которого было опреде-

ление вибрационных нагрузок на аппараты при запуске ракеты-носителя из шахтного стартового комплекса и при выведении их на орбиту.

На базе этой же платформы в рамках реализации программы «Интеркосмос» было разработано 7 модификаций космических аппаратов, которые имели обозначения от ДС-У2-ИК-1 до ДС-У2-ИК-6 и ДС-У2-ИК-8 («Интеркосмос-Коперник-500»).

В период с 1970 по 1975 гг. ракетами-носителями «Космос» и «Интеркосмос» было выведено 30 космических аппаратов, созданных на базе платформы ДС-У2. В работах по проведению исследований с использованием унифицированных космических аппаратов в рамках программы «Интеркосмос» приняли участие научные организации НРБ, ВНР, ГДР, ССР и ЧССР.

Назначением космических аппаратов, создаваемых на базе платформы ДС-У3, являлось проведение исследований коротковолнового излучения Солнца, которое можно наблюдать только из-за пределов атмосферы Земли. Во время солнечных вспышек происходит активизация процессов, протекающих на Солнце, которая проявляется в усилении его рентгеновского излучения. При этом особенно резко возрастает поток «жесткого» излучения. Наблюдение за Солнцем средствами космической техники позволило получить новые знания о физических процессах, происходящих внутри Солнца.

Программой исследований, которые должны были проводиться с использованием КА, созданных на базе платформы ДС-У3, предусматривалось:

- измерение потока и вариации интенсивности мягкого рентгеновского излучения;
- измерение интенсивности солнечного спектра излучений;
- исследование коротковолнового ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца и его воздействия на верхние слои атмосферы Земли;
- измерение плотности верхней атмосферы.

На базе платформы ДС-У3 была создана в рамках программы исследований, проводимых АН СССР, модификация космического аппарата ДС-У3-С и пять модификаций космических

аппаратов (от ДС-У3-ИК-1 до ДС-У3-ИК-5) в рамках реализации программы «Интеркосмос».

Космический аппарат ДС-У3-ИК-1 стал первым аппаратом, созданным по программе «Интеркосмос» с непосредственным участием ученых ГДР и ЧССР.

В период с 1967 по 1976 гг. ракетами-носителями «Космос» и «Интеркосмос» на орбиты были выведены семь космических аппаратов, созданных на базе платформы ДС-У3.

Проведение научной комплексной программы исследования космического пространства институтами АН СССР, а также совместно с научными организациями стран-участников программы «Интеркосмос» в период с 1966 по 1976 гг. было обеспечено запуском 44 унифицированных космических аппаратов разработки КБ «Южное».

АВТОМАТИЧЕСКИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ОРБИТАЛЬНЫЕ СТАНЦИИ

Унифицированные космические аппараты серии ДС-У, разработанные КБ «Южное», сыграли огромную роль в проведении ионосферных исследований и в определении характеристик околоземного космического пространства.

К началу 1970-х годов приобрела значительную актуальность задача изучения механизмов взаимосвязи отдельных физических явлений, происходящих в ближнем космосе, и солнечно-земных связей. Аппараты типа ДС-У уже не могли обеспечить решение такой комплексной задачи виду ограниченных функциональных и ресурсных возможностей. Результаты анализа, проведенного в 1971 г. Конструкторским бюро «Южное», показали, что большинство задач, актуальность решения которых у специалистов не вызывала сомнений, могут быть решены с использованием специализированных космических аппаратов как комплектации единой базы, получившей наименование «космический аппарат многоцелевой» (КАМ). В частности, было показано, что большинство научных и прикладных задач, требующих сбора, запоминания и передачи информации по радиоканалам, может быть решено на базе многоцелевых космических аппаратов трех классов: КАМ-I, КАМ-II, КАМ-III.

В результате проведенных проектных проработок было сделано заключение, что потребности фундаментальных исследований околоземного космического пространства почти полностью удовлетворяются при использовании двух модификаций автоматической универсальной орбитальной станции класса КАМ-I (с ориентацией на Землю — АУОС-3 и с ориентацией на Солнце — АУОС-СМ). На основании этого заключения, которое было одобрено главным институтом космической отрасли ЦНИИМаш и Советом по космическим исследованиям АН СССР, в КБ «Южное» началась разработка этих модификаций, ставших базовыми платформами для создания специализированных исследовательских орбитальных станций путем оснащения платформ соответствующими бортовыми комплексами научной аппаратуры.

Автоматическая универсальная орбитальная станция АУОС-3 была предназначена для комплексного изучения космического пространства, физической природы явлений солнечной активности, геофизических явлений в околоземном космическом пространстве и связи этих явлений с солнечной активностью, осуществляемого по программе международного сотрудничества, а также для проведения экспериментов в интересах народного хозяйства (рис. 3). Автоматическая универсальная орбитальная станция АУОС-СМ предназначалась для обеспечения проведения комплексных исследований Солнца в интересах науки и народного хозяйства в рамках проектов «Коронас-И», «Коронас-Ф» (рис. 4). Основными научными целями указанных проектов являлись исследования физических процессов, проходящих при выделении и переносе энергии в различных областях активного Солнца, а также разработка на этой основе диагностического аппаратного комплекса для прогнозирования солнечной активности на постоянной регулярной основе.

Концептуальные основы унификации станций АУОС-3 и АУОС-СМ остались в принципе такими же, как и ранее сформулированные для аппаратов серии ДС-У. Вместе с тем существенно возросли функциональные возможности аппаратов по обеспечению бортового комплекса научной аппаратуры сервисными функциями

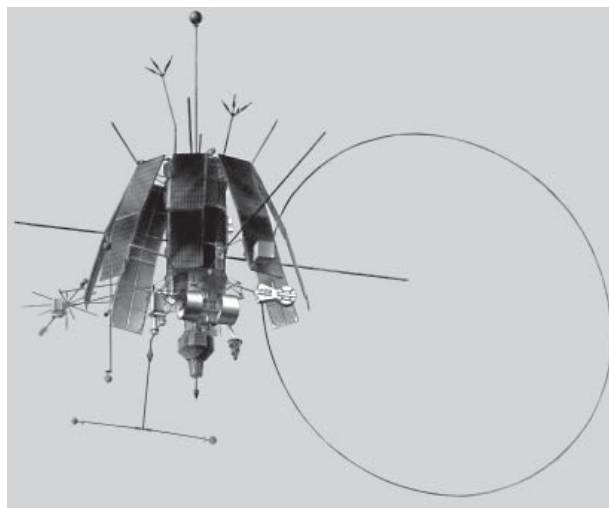


Рис. 3. Автоматическая универсальная орбитальная станция АУОС-3 -АВ-ИК («Интеркосмос-24»)

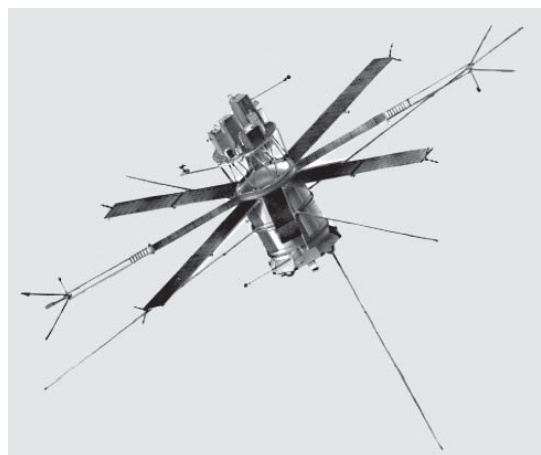


Рис. 4. Автоматическая универсальная орбитальная станция АУОС-СМ -КИ («Коронас-И»)

в части ее массы (до 400—600 кг), среднесуточной потребляемой мощности (не менее 50 Вт), точности ориентации, объема командных воздействий, информационных возможностей радиолинии. Это позволило увеличить количество устанавливаемых на космический аппарат научных приборов до двух десятков и тем самым обеспечить комплексный характер проводимых экспериментов.

Разработка основных комплектаций станции АУОС-3 была начата в 1973 г. Всего за период с

1973 по 1991 гг. было разработано, изготовлено и выведено на орбиту 11 космических аппаратов, созданных на базе платформы АУОС-3, в том числе девять по программе международного сотрудничества. Использование принципов унификации позволило решить поставленную задачу в кратчайшие сроки с минимальными затратами средств. С 1987 г. началась разработка станции АУОС-СМ и ее целевых комплектаций по проектам «Коронас-И» и «Коронас-Ф». Унифицированные платформы АУОС-3 и АУОС-СМ являлись конструктивной базой для создания автоматических орбитальных станций различных комплектаций.

Конструкция унифицированной платформы АУОС-3 представляла собой несущий герметичный корпус, на котором снаружи были размещены 8 панелей солнечной батареи, поворотные штанги с антенно-фидерными устройствами, отдельные элементы системы терморегулирования, ряд приборов, датчиков и антенн обеспечивающей аппаратуры, а также гравитационно-демпфирующие устройства. Основная часть научных приборов и датчиков также была установлена на наружной ферме. Внутри корпуса была размещена ферма обеспечивающей аппаратуры. При изготовлении космического аппарата определенной комплектации на унифицированную платформу устанавливался отсек научной аппаратуры, который конструктивно состоял из сферической крышки корпуса с расположенной в нем фермой научной аппаратуры. Снаружи крышки размещались посадочные места для установки приборов и датчиков научной аппаратуры.

На базе унифицированной платформы АУОС-3 были разработаны 10 орбитальных станций, ориентированных на Землю, из них восемь в рамках программы «Интеркосмос»: АУОС-3-Т-ИК (технологический), АУОС-3-Р-Э-ИК (космические лучи), АУОС-3-М-ИК (магнитный), АУОС-3-И-ИК (ионосферный), АУОС-3-Р-П-ИК (природоресурсный), АУОС-3-М-А-ИК («Ореол-3»), АУОС-3-АВ-ИК (активно-волновой), АУОС-3-АП-ИК (активно-плазменный) и две — по программе исследований, проводимых институтами АН СССР и институтом ядерной

физики МГУ: АУОС-3-Р-О (космические частицы) и АУОС-3-И-Э (ионосферный).

Назначением орбитальных станций, созданных на базе платформы АУОС-3, было:

- осуществление комплексного научного эксперимента с целью исследования спектра и углового распределения частиц в районах магнитных аномалий;
- изучение процессов «высыпания» заряженных частиц из радиационных поясов Земли;
- проведение эксперимента по комплексному исследованию солнечных и галактических космических лучей;
- комплексное исследование характера электромагнитных связей земной магнитосферы и ионосферы;
- получение данных для построения модели ионосферы;
- получение информации о природных ресурсах Земли;
- комплексное изучение электромагнитных явлений в Земной атмосфере в соответствии с советско-французским проектом «Аркад»;
- экспериментальная проверка решений, положенных в основу системы глобального контроля и прогнозирования состояния ионосферы;
- проведение активно-волнового космического эксперимента по комплексному исследованию распространения электромагнитных волн в магнитосфере Земли;
- проведение активного плазменного эксперимента по исследованию эффектов воздействия электронных и ионных пучков на ионосферу и магнитосферу Земли;

• отработка в натурных условиях единой международной телеметрической системы ЕМТС, разработанной странами ВНР, ГДР, ПНР, ЧССР и СССР для использования ее в составе платформы АУОС-3 и АУОС-СМ.

В период с 1976 по 1991 гг. на орбиты ракетами-носителями «Интеркосмос» было выведено 11 орбитальных станций, созданных на базе платформы АУОС-3 (станция АУОС-3-Р-П-ИК на орбиту была выведена дважды).

Базовая унифицированная платформа АУОС-СМ конструктивно состояла из двух крупных блоков: собственно унифицированной плат-

формы и блока научной аппаратуры. Конструкция унифицированной платформы включала в себя цилиндрический корпус со сферическим днищем, ферму обеспечивающей аппаратуры, четыре блока солнечной батареи, четыре блока панелей, устройство системы терморегулирования, газореактивную систему, предназначенную для обеспечения ориентации космического аппарата, и штанги с антенно-фидерными устройствами. Блоки солнечной батареи и блоки панелей были поворотными элементами. Рамы всех четырех блоков панелей использовались для размещения приборов научной аппаратуры и штанг с антенно-фидерными устройствами, а также для размещения экспериментальной аппаратуры системы электроснабжения. Для обеспечения ориентации КА, создаваемых на базе платформы АУОС-СМ, в состав обеспечивающей аппаратуры платформы входила система успокоения, ориентации и стабилизации, обеспечивающая ориентацию продольной оси КА на Солнце с точностью 10 угловых минут.

Назначением орбитальных станций, созданных на базе платформы АУОС-СМ, являлось:

- проведение комплексного научного эксперимента по исследованию активности Солнца, предусматривающего определение физических параметров вспышечной плазмы, поиск предвестников вспышки;
- непрерывное наблюдение эволюции спокойной и активной короны;
- исследование динамики процессов, одновременно происходящих на Солнце и магнитосферных и ионосферных процессов;
- изучение эволюции активной области Солнца;
- непрерывное наблюдение крупномасштабной структуры спокойной короны Солнца и др.

Выведение станции АУОС-СМ-КИ состоялось в 1994 г., станции АУОС-СМ-КФ — в 2001 г. Обе станции были выведены ракетой-носителем «Циклон-3».

На базе унифицированной платформы АУОС-СМ были разработаны две орбитальные станции, ориентированные на Солнце: АУОС-СМ-КИ (проект «Ионозонд») и АУОС-СМ-КФ (проект «Коронас Ф»).

Информация, полученная в ходе проведения исследований и экспериментов с использовани-

ем станций, созданных на базе разработанных КБ «Южное» унифицированных платформ АУОС-3 и АУОС-СМ, способствовала расширению научных знаний о околоземном космическом пространстве, о Солнце и о солнечно-земных связях и явилась весомым вкладом в знания о космосе.

ЮСТИРОВОЧНЫЕ И КАЛИБРОВОЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Работы КБ «Южное» по созданию космических юстировочных аппаратов начались в 1960-м году, когда по заказу организаций Министерства обороны и Министерства радиопромышленности СССР был разработан космический аппарат ДС-П1. Его назначением была проверка и отработка в натурных условиях методик и аппаратных средств решения задач юстировки, контроля точности и определения потенциалов радиолокационных станций систем противовоздушной, противоракетной и противокосмической обороны страны.

Космический аппарат ДС-П1 имел форму шара, под оболочкой которого размещалась солнечная батарея и контейнер с приборами. Для обеспечения доступа света к солнечной батарее оболочка шара была выполнена в виде сетки из тонкой (0.5 мм) стальной проволоки. Основные конструктивно-технологические особенности космического аппарата заключаются в применении оригинальной солнечной батареи в форме додекаэдра, калиброванного сферического отражателя, прозрачного для волн светового диапазона и непрозрачного для дециметровых и метровых радиоволн. В результате работы на орбите в период с июня 1962 по февраль 1964 гг. трех космических аппаратов («Космос-6», «Космос-19», «Космос-25») была показана перспективность данного технического направления работ и была отработана космическая платформа для решения широкого круга задач в интересах противовоздушной, противоракетной и противокосмической обороны страны. Это позволило приступить к разработке космических аппаратов ДС-П1-Ю и ДС-П1-И эксплуатационной космической системы.

К первому поколению космических аппаратов, предназначенных для решения военно-прикладных задач отработки, юстировки, калибров-

ки и паспортизации специальных комплексов наземного и космического базирования Министерства обороны СССР, относились космические аппараты ДС-П1-Ю, ДС-П1-И и «Тюльпан».

Космический аппарат ДС-П1-Ю был создан на основе модернизации КА ДС-П1 с существенным расширением объема решаемых задач. Работы по созданию космического аппарата ДС-П1-Ю были выполнены полностью с положительными результатами, и космический аппарат был принят на вооружение Советской Армии. В период с 1965 по 1976 гг. было успешно запущено 72 космических аппарата ДС-П1-Ю, из них два ракетой-носителем 63С1, остальные — ракетой-носителем «Космос».

Космический аппарат ДС-П1-И также был создан на основе модернизированного КА ДС-П1, но в отличие от космических аппаратов ДС-П1 и ДС-П1-Ю на нем сферический отражатель не устанавливался. Назначением космического аппарата ДС-П1-И являлись юстировка, снятие точностных характеристик и периодический контроль функционирования наземных станций определения координат и передачи команд специальных систем Советской Армии. Работы по созданию космического аппарата ДС-П1-И были выполнены полностью с положительными результатами, и космический аппарат был принят на вооружение Советской Армии. В период с 1966 по 1977 гг. на орбиту ракетой-носителем «Космос» было выведено 18 космических аппаратов ДС-П1-И.

Разработанный КБ «Южное» космический аппарат «Тюльпан» предназначался для использования в качестве мишени при проведении отработки в натурных условиях космических аппаратов-перехватчиков системы противокосмической обороны страны. Он был оснащен системой фиксации числа попавших в него активных поражающих элементов, выпущенных космическим аппаратом-перехватчиком. Космический аппарат «Тюльпан» был создан на базе космического аппарата ДС-П1-И. Для защиты от поражения активными элементами его герметичный корпус был помещен в стальной многогранник, выполняющий роль защитного экрана. В период с 1971 по 1982 гг. ракетой-носителем «Интеркосмос» на орбиту было выведено 18 космических аппаратов

«Тюльпан». Программа летной отработки и эксплуатации КА была полностью выполнена.

В начале 1970-х годов в соответствии с правительственным заданием в КБ «Южное» была осуществлена разработка второго поколения юстировочных и калибровочных космических средств ракетно-космического комплекса «Тайфун». Комплекс должен был обеспечивать поддержание боеготовности и отработку вновь вводимых в эксплуатацию специальных наземных комплексов Советской Армии. В составе комплекса «Тайфун» были созданы две модификации унифицированных космических платформ: «Тайфун-1» и «Тайфун-2», на базе которых были разработаны и введены в эксплуатацию шесть типов специализированных космических аппаратов. Унификация космических аппаратов заключалась в унификации бортового обеспечивающего комплекса аппаратуры и узлов конструкции космических аппаратов, она захватывала также и отдельные составные части бортовых систем целевого назначения.

Неориентируемый космический аппарат класса «Тайфун-1» конструктивно состоял из двух основных узлов: сферического каркаса с расположенными на его поверхности солнечными батареями, антеннами целевой и обеспечивающей аппаратуры и размещенного внутри каркаса цилиндрического герметичного контейнера, в котором располагались фермы для установки целевой и обеспечивающей аппаратуры. Габаритные размеры контейнера $\varnothing 1200 \times 1600$ мм и платформы в целом $\varnothing 2000$ мм.

На базе платформы «Тайфун-1» были созданы специализированные космические аппараты комплектации «Тайфун-1А», «Тайфун-1В» и экспериментальный аппарат «Дуга-К». Одновременно с комплектациями «Тайфун-1А» и «Тайфун-1В» разрабатывался с использованием той же платформы КА «Тайфун-1Б», по которому в процессе экспериментальной отработки было принято решение не передавать его в производство. Впоследствии индекс «Тайфун-1Б» был присвоен космическому аппарату, близкому к КА класса «Тайфун-1» по характеру решаемых целевых задач, по выполняемому на совершенно иной конструктивной основе.

Назначением космических аппаратов «Тайфун-1А» и «Тайфун-1В» было:

- проверка функционирования средств противовоздушной обороны по одиночной цели;
- юстировка и контроль энергетических и точностных характеристик средств;
- юстировка, союстировка и контроль характеристик дальнего обнаружения каналов управления комплексов системы противоракетной обороны, отработка методов загоризонтной радиолокации.

После успешного проведения летных испытаний в 1974 г. ракетно-космический комплекс «Тайфун-1» с аппаратами «Тайфун-1А» и «Тайфун-1В» был принят на вооружение Советской Армии. Всего в период с 1974 по 1994 гг. на орбиту ракетой-носителем «Интеркосмос» было выведено 25 космических аппаратов обеих комплектаций.

Назначением третьего космического аппарата, созданного на базе платформы «Тайфун-1», — аппарата «Дуга-К» было проведение экспериментальных работ в составе космического комплекса «Дуга-К» по совершенствованию методов контроля функционирования станций загоризонтной радиолокации. Для проведения летных испытаний КА «Дуга-К» были изготовлены два аппарата, которые в 1989 и 1990 гг. были выведены на орбиту ракетой-носителем «Интеркосмос». В ходе этих испытаний все задачи, поставленные перед космическим аппаратом «Дуга-К», были успешно выполнены.

Опыт эксплуатации космического аппарата «Тайфун-1» определил потребность создания КА, обеспечивающего отражение радиолокационных сигналов с малым уровнем флуктуаций. Разработанный в 1978–1979 гг. в КБ «Южное» космический аппарат «Тайфун-1Б» позволял определять и контролировать энергетический потенциал радиолокационного канала без использования в его составе какой-либо аппаратуры. Космический аппарат имел сферическую форму Ø2000 мм, выдержанную при изготовлении с высокой точностью. В 1983 г. космический аппарат «Тайфун-1Б» был принят на вооружение Советской Армии и введен в состав космического комплекса «Тайфун-1».

С 1979 по 1991 гг. ракетой-носителем «Интеркосмос» на орбиту были выведены 10 космических аппаратов «Тайфун-1Б». Еще один КА был выведен на орбиту ракетой-носителем «Зенит».

Одновременно с разработкой и отработкой космических аппаратов, созданных на базе платформы «Тайфун-1», в КБ «Южное» шла разработка специализированных КА на базе второй модификации унифицированной платформы «Тайфун-2». Эта платформа была оснащена гравитационной системой ориентации, обеспечивающей ориентацию КА в орбитальной системе координат с точностью не хуже 10° , что обеспечивало условия для выполнения требований по созданию многоэлементной цели. В конструктивном и аппаратном плане базовая платформа «Тайфун-2» была унифицирована с платформой АУОС-3. Характерной особенностью космических аппаратов, созданных на базе платформы «Тайфун-2», являлось оснащение их системой отстрела эталонных отражателей (СОТ) разработки КБ «Южное» (в трех комплектациях), предназначенной для формирования многоэлементных моделей цели по заданной программе, и системой определения скорости отстрела этих отражателей. В состав каждой из комплектаций СОТ-А и СОТ-Б входили по 24 устройства отстрела эталонных сферических отражателей, отличающихся значениями скоростей отстрела. В состав комплектации СОТ-В входили 24 устройства отстрела с эталонными оптическими отражателями.

На базе платформы «Тайфун-2» были разработаны три космических аппарата с различными комплектациями аппаратуры целевого назначения: «Тайфун-2А», «Тайфун-2Б» и «Тайфун-2В».

Назначением этих аппаратов являлось:

- формирование многоэлементных моделей целей;
- определение разрешающей способности специальных комплексов стоящих на вооружении Советской Армии;
- контроль функционирования и определение характеристик наземных станций определения координат и передачи команд;
- определение энергетических характеристик, анализ сигналов и контроль функционирования квантовых локаторов.

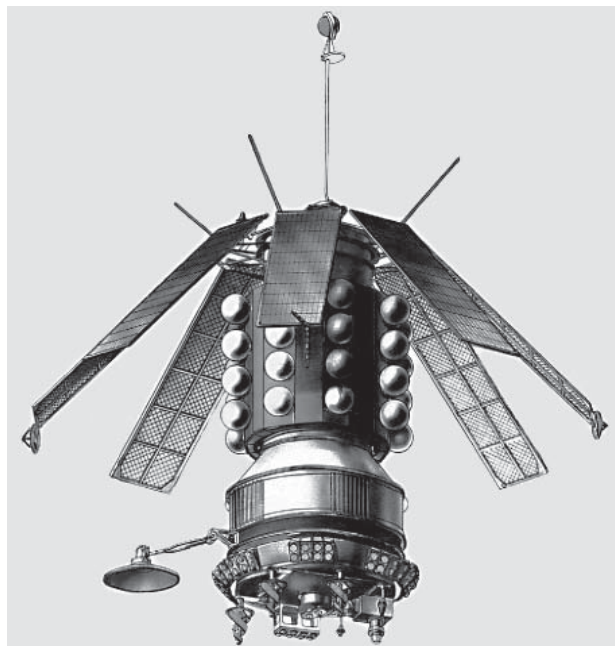


Рис. 5. Космический аппарат «Кольцо»

Летные испытания космических аппаратов, созданных на базе платформы «Тайфун-2», начались в апреле 1976 г. В 1981 г. ракетно-космический комплекс «Тайфун-2» с входящим в его состав КА «Тайфун-2А», «Тайфун-2Б» и «Тайфун-2В» был принят на вооружение Советской Армии. В период с 1976 по 1995 гг. на орбиты ракетой-носителем «Интеркосмос» было выведено 25 космических аппаратов, созданных на базе платформ «Тайфун-2». Все задачи, поставленные перед ракетно-космическим комплексом «Тайфун-2», были выполнены в полном объеме.

На третьем этапе создания юстировочных космических аппаратов был создан КА «Кольцо» (рис. 5). Назначением этого аппарата было обеспечение проведения отработки, испытаний и поддержания в постоянной боевой готовности нового поколения специальных наземных технических средств противоракетной, противовоздушной и противокосмической обороны Советской Армии. Космический аппарат «Кольцо» явился результатом дальнейшего развития идей целевого применения и технических решений, заложенных в КА «Тайфун-2». У космического аппарата «Кольцо» по отношению к КА «Тай-

фун-2» были существенно увеличены абсолютные и удельные выходные характеристики системы электроснабжения, повышена точность системы ориентации, реализована возможность программных поворотов КА в плоскости местного горизонта, увеличено до 32 боезапас отстреливаемых элементов. В период с 1998 по 1990 гг. ракетой-носителем «Циклон-3» на орбиты были выведены три космических аппарата «Кольцо». В ходе их эксплуатации на орбите все возложенные на них задачи были выполнены полностью.

Всего в ходе работ, проведенных КБ «Южное» по созданию юстировочных и калибровочных космических аппаратов в период с 1962 по 1995 гг., были разработаны, изготовлены и запущены на орбиту 172 космических аппарата.

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Работы по созданию космических средств радиоэлектронного наблюдения в КБ «Южное» начались в августе 1960 г., когда перед ним была поставлена задача разработки в интересах Министерства обороны СССР первого экспериментального космического аппарата ДС-К8, предназначенного для экспериментальной отработки методов и средств определения параметров сигналов, излучаемых радиолокационными станциями военного назначения. Исследования, проведенные с помощью аппаратуры, установленной на этом аппарате, выведенном ракетой-носителем 63С1 на орбиту 18 августа 1962 г. и получившем обозначение «Космос-8», показали необходимость и целесообразность создания более совершенной целевой аппаратуры и специализированных КА для ее размещения.

Первым этапом работ по развертыванию опытно-конструкторских разработок космических средств радиотехнического наблюдения за радиолокационными средствами предусматривались разработка и запуск двух экспериментальных космических аппаратов ДС-К40, на которые устанавливалась специальная аппаратура, модернизированная в части чувствительности, габаритов и весовых характеристик. Запуски этих аппаратов оказались неудачными из-за аварий ракет-носителей.

Вторым этапом развития направления радиотехнического наблюдения явилось создание космических аппаратов, входящих в состав космической системы «Целина», на базе более совершенной целевой аппаратуры КА, выполненной с использованием микроэлементных комплектующих. В состав системы «Целина» должны были входить космические аппараты «Целина-О» и «Целина-Д». Разработка системы началась в 1964 г.

Космический аппарат «Целина-О» предназначался для проведения обзорных радиотехнических наблюдений. Он был неориентируемым, оригинальной конструкции, в которой использовались некоторые узлы ранее созданных космических аппаратов. На нем были применены солнечные источники электроснабжения. В ходе эксплуатации системы «Целина-О» космический аппарат «Целина-О» дважды модернизировался. Новым комплектациям аппарата были присвоены обозначения «Целина-ОМ» и «Целина-ОК». Всего за период с 1967 по 1982 гг. на орбиту было выведено 2 космических аппарата «Целина-О», 34 КА «Целина-ОМ» и 3 аппарата «Целина-ОК». Все эти космические аппараты были выведены на орбиту ракетами-носителями «Интеркосмос».

Целевым назначением космического аппарата «Целина-Д» являлось ведение детальных радиотехнических наблюдений с помощью бортовой аппаратуры, выполняющей функции приема, анализа и высокоточного определения координат источников радиотехнических сигналов. Этот космический аппарат являлся ориентируемым в орбитальной системе координат и отличался от ранее разработанных КА более сложным комплексом целевой и обеспечивающей аппаратуры. Характерными особенностями конструктивно-компоновочной схемы КА являлись: вертикальное положение в полете герметичного контейнера, наличие четырех крестообразно расположенных в горизонтальной плоскости панелей для размещения антенных систем целевой аппаратуры, использование двух вращающихся вокруг вертикальной оси солнечных батарей и выдвижного гравитационного стабилизатора, а также расположенных на верхнем днище герме-

тичного контейнера оптико-электронных визиров системы определения ориентации КА.

В период с 1970 по 1992 гг. на орбиту было выведено 70 космических аппаратов. Запуски космических аппаратов осуществлялись в определенные моменты времени, обеспечивающие построение и поддержание орбитальной группировки заданного состава и конфигурации. Первые 36 космических аппаратов были выведены на орбиту ракетами-носителями 82А92М, а остальные — после введения в эксплуатацию в 1981 г. ракетами-носителями «Циклон-3».

В 1980-х годах на основе космического аппарата «Целина-Д» был создан космический аппарат «Целина-Р», оснащенный специальной аппаратурой для наблюдения радиосвязных источников излучений. В период с 1986 по 1999 гг. ракетой-носителем «Циклон-3» на орбиту было выведено четыре космических аппарата «Целина-Р». Введение в состав космической системы «Целина» космического аппарата «Целина-Р» обеспечило решение задач радиоэлектронного наблюдения источников излучения наземных станций военного назначения из космоса в полном объеме.

Опыт эксплуатации космических аппаратов «Целина-О» и «Целина-Д» в составе системы «Целина» показал высокую эффективность выполнения целевых задач, а также позволил установить потенциальные возможности дальнейшего совершенствования комплексов радиотехнического наблюдения из космоса. На основе анализа результатов, полученных в ходе эксплуатации системы «Целина», и перспектив развития бортовой целевой и обеспечивающей аппаратуры был выработан ряд основополагающих технических решений применительно к облику космического аппарата следующего поколения «Целина-2», принятому к разработке в 1972 г.

В процессе создания этого космического аппарата были реализованы следующие технические решения:

- совмещены на одном космическом аппарате функции обзорного и детального наблюдения;
- расширен частотный диапазон принимаемых сигналов;
- расширена полоса обзора детального наблюдения;

- улучшены характеристики периодичности и оперативности наблюдения (в частности реализована возможность передачи принятой на аппарате специальной информации на Землю через космический аппарат ретранслятор);

- решена задача запуска космического аппарата на выбранную квазисинхронную орбиту, обеспечивающую повышение эффективности контроля за изменением радиотехнической обстановки;

- определен состав и функции бортового комплекса управления аппаратом, обеспечивающего использование его в структуре наземной автоматизированной системы управления космическим аппаратом;

- увеличено время активного существования космического аппарата;

- осуществлено улучшение таких характеристик космического аппарата, как удельный вес аппаратуры целевого назначения, объем информации о наблюдаемых радиотехнических источниках излучения и передаваемой в течение суток на Землю, точность ориентации аппарата, мощность системы его электроснабжения.

Всего в период с 1984 по 2007 гг. на орбиту было выведено 18 космических аппаратов «Целина-2». Из них первые два аппарата были выведены на орбиту ракетой-носителем 8К82К, а остальные 16 — ракетой-носителем «Зенит» после введения ее в эксплуатацию в 1985 г.

Космическая система с аппаратами «Целина-О», «Целина-Д» и «Целина-2» была принята на вооружение Советской Армии.

Всего за время эксплуатации указанных космических аппаратов с 1967 по 2007 гг. на орбиту был выведен 131 космический аппарат радиоэлектронного наблюдения. Все они успешно прошли эксплуатацию с существенным превышением заданных сроков функционирования на орбите.

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ПРИРОДОРЕСУРСНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

Задание на развитие направления работ по использованию средств космической техники для решения природоресурсных задач было впервые сформировано на государственном уровне в Постановлении ЦК КПСС и СМ СССР от

5 мая 1977 г., предусматривающем разработку и создание государственной космической эксплуатационной системы исследования природных ресурсов Земли под названием «Ресурс». Этим Постановлением Конструкторскому бюро «Южное» было поручено создание космической подсистемы «Океан» для проведения комплексного изучения Мирового океана в интересах разработки теории долгосрочного прогнозирования погоды и климата и внедрения в практику народного хозяйства методов прогноза, построенных на основе этой теории, создания теоретических основ рационального использования биологических и минеральных ресурсов океана и обеспечения всесторонней хозяйственной деятельности на шельфе и в отдельных акваториях, обеспечение оптимального и безопасного судоходства, контроля за загрязнением Океана.

Создание подсистемы «Океан» началось с проведения в период с 1979 по 1982 гг. научно-методических экспериментов с использованием космических аппаратов «Океан-Э» № 1 и № 2, запущенных в 1979 и 1980 гг. и орбитальных станций АУОС-3-Р-П-ИК № 1 и № 2, запущенных в 1979 и 1981 гг. Космический аппарат «Океан-Э», созданный на базе модернизированного серийного аппарата «Целина-Д» разработки КБ «Южное», был оснащен комплексом радиофизической оптико-электронной и радиопередающей аппаратуры, а также системой сбора информации с буйковых платформ. Основными задачами экспериментов, проводимых этими аппаратами, являлись: отработка методик синхронных дистанционных измерений физических параметров океана и атмосферы, разработка методов калибровки данных дистанционного зондирования на основе данных подспутниковых измерений, создание методик, алгоритмов и программ обработки данных спутниковых измерений. В целом задачи, поставленные перед спутниками, были выполнены. В ходе экспериментов были обработаны методы измерений гидрофизических параметров в микроволновом, инфракрасном и видимом диапазонах спектра электромагнитного излучения поверхности океана. На основе полученного материала была подтверждена возможность картографирования крупномасштаб-

ного распределения температуры поверхности океана, скорости ветра, границ и сплоченности ледового покрова, водозапаса облаков и др.

В период с 1983 по 1986 гг. были реализованы крупномасштабные натурные работы с экспериментальными космическими аппаратами «Океан-ОЭ» («Космос-1500», «Космос-1602»), в которых приняли участие организации-потребители заинтересованных ведомств — Госкомгидромета, Министерств морского флота и рыбного хозяйства, Академии наук СССР. На этих космических аппаратах впервые в отечественной и мировой практике был реализован режим комплексного наблюдения, обеспечивающий одновременное получение радиолокационных, радиотепловых и оптических изображений в совмещенной полосе обзора, а также оперативную передачу этих данных с аппаратов в центры приема и непосредственно потребителям на автономные пункты приема. Информация с этих космических аппаратов и была использована для решения важных народнохозяйственных задач, в том числе для регулярного составления средне- и долгосрочных прогнозов ледовой обстановки в Арктике в интересах обеспечения морских операций, освещения ледовой и гидрометеорологической обстановки для проводки судов в экстремально тяжелых условиях в районе острова Врангеля в 1983 г., в Охотском море и Татарском проливе в 1985 г., в Антарктике в 1985 г. и в районах работы научно-исследовательских и научно-экспедиционных судов (в частности, при выведении из ледового плена в Антарктике судна «Михаил Сомов»).

При наблюдении суши космические аппараты давали полезную информацию в части геологических и почвенных структур, степени увлажнения почв, динамики развития ледового покрова на внутренних водоемах, контроля динамики паводковых процессов.

За время работы космических аппаратов «Космос-1500», «Космос-1602» в 1983—1985 гг. организациям-потребителям было передано более 20 тысяч дубль-негативов и 30 тысяч фотоотпечатков изображений участков поверхности, отснятых с космических аппаратов. Результаты эксплуатации космических аппаратов легли в основу

принятия решения о составе целевой аппаратуры последующих комплектаций аппаратов и о создании эксплуатационной подсистемы «Океан-О1».

Всего было изготовлено и запущено в период с 1986 по 1994 гг. шесть космических аппаратов «Океан-О1», назначением которых являлось:

- оперативное обеспечение потребителей регулярной информацией о ледовой обстановке в полярных областях;
- накопление потребителями опыта использования данных дистанционного зондирования с помощью космических средств;
- отработки исследовательской аппаратуры;
- совершенствование методов и средств дистанционного зондирования ледовых полей;
- построение температурных карт северной и экваториальной Атлантики;
- изучение неоднородностей открытых акваторий Мирового океана.

Информация, полученная с КА «Океан-О1» в процессе их эксплуатации на орбите, широко использовалась при решении важных научно-хозяйственных задач, в том числе:

- при регулярном составлении кратковременных и долгосрочных прогнозов ледовой обстановки в Арктике при планировании широких операций;
- при освещении ледовой обстановки при проводке судов в экстремально-тяжелых условиях осенне-зимней навигации;
- при решении народнохозяйственных задач (определения влажности почв и влагозапасов, контроля паводковых ситуаций, анализа геологических структур с целью выявления газо- и нефтеносных площадей и т. д.).

Космический аппарат «Січ-1», выведенный на орбиту 31 августа 1995 г. ракетой-носителем «Циклон-3», стал первым космическим аппаратом, запущенным под юрисдикцией суверенного государства Украина.

По своему функциональному назначению, составу аппаратуры и внешнему облику он фактически не отличался от ранее разработанных КБ «Южное» космических аппаратов «Океан-О1», подавляющая часть подсистем которых была разработана и изготовлена украинскими предприятиями в составе СССР.

Задача запуска КА «Січ-1» стимулировала решение многих важных задач, связанных с созданием национальной инфраструктуры средств управления космическими аппаратами, приема, обработки и распространения полученной с КА информации, а также создания в Украине пользовательских структур. Все это послужило основой для создания космической системы «Січ-1» — впервые создаваемой в Украине космической системы наблюдения Земли дистанционными и контактными методами.

Если разработка и изготовление космического аппарата и ракеты-носителя являлись для предприятий Украины традиционной специализацией, то по другому важнейшему компоненту космической системы — наземному комплексу управления космическим аппаратом и наземному комплексу приема данных наблюдения КА — имелись только отдельные элементы, не дающие возможности обеспечения регулярного и полного выполнения необходимых системных функций.

Создание в Украине наземного космического комплекса космической системы «Січ-1», обеспечивающего выполнение всех функций, необходимых для эксплуатации системы, явилось серьезной задачей для украинских предприятий, и в первую очередь для Национального космического агентства Украины. В результате четко организованной напряженной работы многих предприятий и организаций космической отрасли Украины, проведенной в предельно сжатые сроки (менее двух лет), все задачи создания системы «Січ-1» были успешно решены. В результате в Украине был создан наземный комплекс управления, который отвечал требованиям того периода времени и не уступал по своим характеристикам аналогичным комплексам Российской Федерации, но отличался от них возможностью управления космическим аппаратом и проведения траекторных измерений с использованием однопунктной технологии работ.

Учитывая потребность национальных пользователей в информации дистанционного зондирования, в Украине был создан наземный комплекс приема, обработки и распространения такой информации в составе Центра планирования и координации, пункта приема инфор-

мации, Центрального государственного архива, комплекса средств связи и передачи данных.

Запуск космического аппарата «Січ-1» был осуществлен 31 августа 1995 г. ракетой-носителем «Циклон-3». Только за первый год эксплуатации космического аппарата «Січ-1» было обеспечено выполнение 130 заявок пользователей Российской Федерации и Украины. В процессе эксплуатации аппарата были отработаны программное обеспечение и технология решения ряда народнохозяйственных задач (таких как определение зон увлажнения почв, картографирование болот и торфяников, определение полей приводного ветра в центральной части циклонов, оценка состояния озимых культур в осеннее-весенний период, контроль динамики весенних паводков, экологический контроль техногенных загрязнений в Украине и т. д.). Полученные результаты практического использования космической информации с космического аппарата «Січ-1» обеспечили перспективу решения многих народнохозяйственных задач на государственном уровне и уменьшение вероятности принятия ошибочных решений при проведении работ в области землепользования, экологии, гидрометеорологии строительства, геологии, контроля чрезвычайных ситуаций.

Следующим важным этапом в работах, проведенных КБ «Южное» по созданию космических аппаратов природоресурсного направления, было создание космического аппарата «Океан-О» (рис. 6). Космический аппарат «Океан-О» создавался по заказу Национального космического агентства Украины и Российского космического агентства и был предназначен для изучения Мирового океана и континентов в интересах народного хозяйства и наук о Земле. Он должен был обеспечивать глобальную оптическую и микроволновую съемку с низким, средним и высоким разрешением.

Данные дистанционных измерений, проводимых КА «Океан-О», предназначались для использования при решения следующих прикладных и фундаментальных задач:

- составления морских гидрометеорологических и специализированных прогнозов;
- обеспечения безопасного судоходства и выбора оптимальных маршрутов судов;

- обнаружения районов загрязнения поверхности морей и океанов;
- изучения деятельного слоя в океане;
- изучения континентального шельфа;
- определения и прогнозирования динамического и термодинамического состояния Мирового океана;
- определения поля ветров по движению облаков;
- определения водозапаса облаков, границ зон осадков и их интенсивности;
- определения физического состояния ледового покрова;
- распознавания типов почв;
- распознавания типов лесов;
- контроля состояния растительности и почв;
- обнаружения лесных и степных пожаров;
- экологического и кризисного мониторинга;
- исследования физико-геологических структур;
- сбора контактных данных с платформ.

Космический аппарат «Океан-О» был оснащен комплексом исследовательской аппаратуры, который обеспечивал получение и передачу по радиоканалам на пункты приема:

- радиолокационной информации;
- радиометрической информации на двух длинах волн;
- многоканальной радиометрической информации сверхвысокочастотного диапазона;
- многоканальной информации видимого и инфракрасного диапазона;
- спектрометрической информации;
- информации, получаемой с платформ.

Разнообразие типов исследовательской аппаратуры (радиолокаторы, радиометры, сканеры видимого и инфракрасного диапазонов), широкий диапазон пространственных разрешений аппаратуры, широкие функциональные возможности обеспечивающего комплекса аппаратуры определили уникальность космического аппарата «Океан-О» как инструмента синхронного многоспектрального дистанционного наблюдения поверхности океана и континентов.

Космический аппарат «Океан-О» был выведен на орбиту 19 июля 1999 г. ракетой-носителем «Зенит». Решением Российско-Украинской межгосударственной комиссии от 25 октября

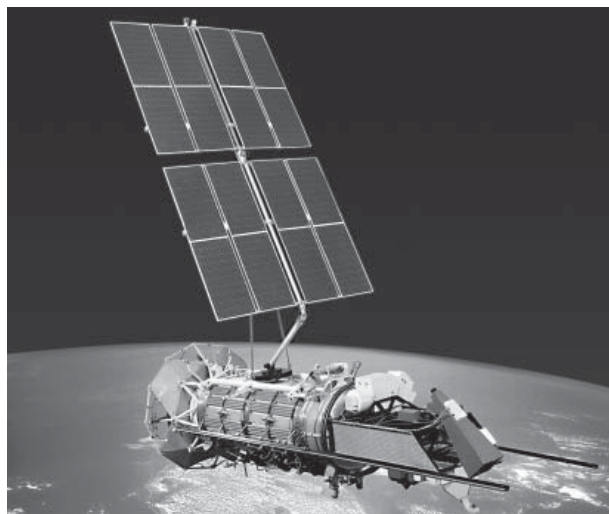


Рис. 6. Космический аппарат «Океан-О»

1999 г. аппарат был принят в эксплуатацию с 1 ноября 1999 г. За время эксплуатации аппарата потребители широкого круга ведомств, академических и отраслевых институтов Российской Федерации и Украины получили информацию с аппарата, использование которой позволило определить перспективу и пути дальнейшего развития космической техники дистанционного зондирования Земли.

Продолжением работ КБ «Южное» по созданию космических аппаратов природоресурсного направления было создание КА «Січ-1М» (рис. 7) и микроспутника «Микрон» (рис. 8). Проведение работы по КА «Січ-1М» предусматривалось Национальной космической программой Украины на 2003—2007 гг. и Федеральной космической программой России на 2001—2005 гг. Финансирование работ по реализации этого совместного проекта проводилось обеими странами на паритетных основах в рамках госзаказов. Микроспутник «Микрон» являлся космическим аппаратом, создаваемым в рамках Национальной космической программы Украины, и предназначался для обработки технологий проведения наблюдения поверхности Земли из космоса с помощью телевизионной камеры в реальном масштабе времени и для проведения технических экспериментов по отработке перспективного бортового оборудования для будущих космических аппаратов.

Рис. 7. Космический аппарат «Січ-1М»

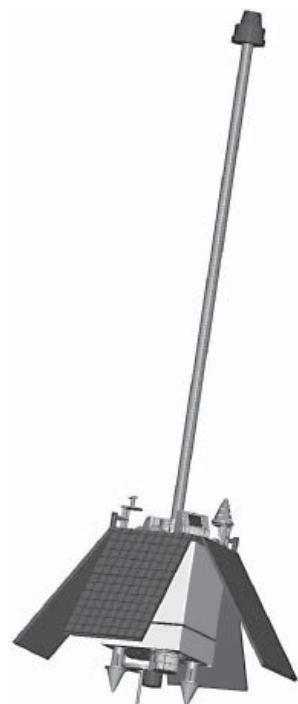
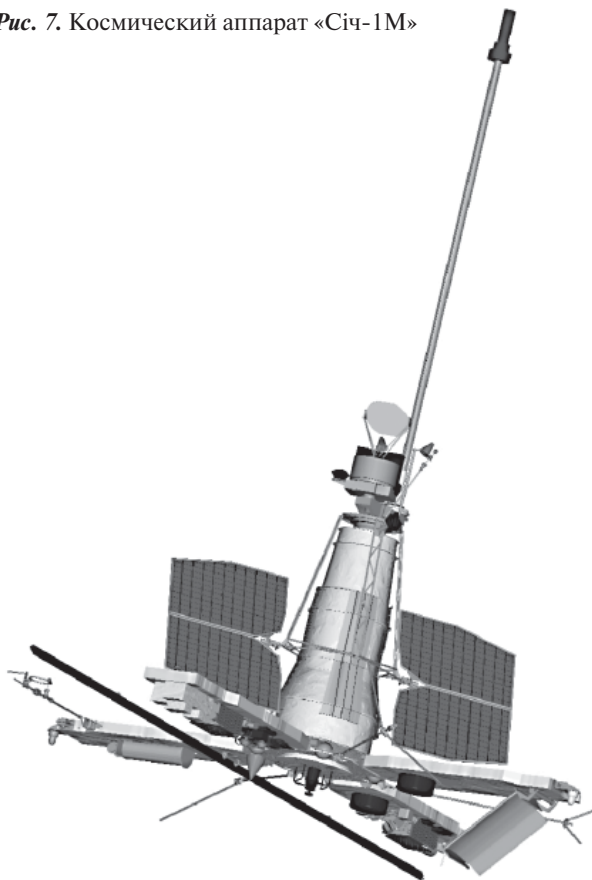


Рис. 8. Космический аппарат «Микрон»

Запуск космического аппарата «Січ-1М» являлся продолжением работ по проекту, первым этапом которого был запуск в 1995 г. КА «Січ-1», отработавшего на орбите более шести лет, в течение которых он обеспечил получение большого объема ценной информации для различных ведомств Украины. В основу модифицированного КА «Січ-1М» была положена та же конструкция, что использовалась для КА «Січ-1». Вместе с тем в процессе создания нового аппарата было сделано многое для его совершенствования: разнообразнее и более совершенной стала целевая и обеспечивающая аппаратура, в состав КА был введен ряд новых научных приборов, была расширена полоса обзора при зондировании Земли в видимом (оптическом), инфракрасном и сверхвысокочастотном диапазонах, повысилась разрешающая способность бортовой исследовательской аппаратуры. Кроме комплекса бортовой аппаратуры дистанционного зондирования Земли, на КА «Січ-1М» был установлен комплекс научной аппаратуры «Вариант» назначением которого являлось проведение исследований электромагнитных явлений в ионосфере Земли.

Если КА «Січ-1» управлялся российским центром управления полетом (ЦУП), то управление аппаратом «Січ-1М» лишь на начальном этапе его полета проводилось из подмосковного центра управления, подведомственного Роскосмосу, а затем функции управления осуществлял расположенный в Евпатории Национальный центр управления и испытаний космических средств, подведомственный НКАУ. Операции, обеспечивающие эксплуатацию украинского микроспутника «Микрон», с момента выведения его на орбиту обеспечивал украинский центр.

Выведение на орбиту космического аппарата «Січ-1М» с установленным на нем микроспутником «Микрон» ракетой-носителем «Циклон-3» состоялось 24 декабря 2004 г. Однако в процессе выведения его на круговую орбиту, высота которой должна быть равной 650 км, из-за нарушений в работе третьей ступени ракеты-носителя аппарат был выведен на эллиптическую орбиту с высотой апогея 644 км и высотой перигея 285 км. Эта орбита оказалась несколько худшей для проведения съемок из космоса, но зато

более выгодной для проведения исследований электромагнитных явлений в атмосфере Земли в рамках международного научного проекта «Вариант», в котором участвовали ученые Украины, России, Франции и Великобритании. Эллиптическая орбита предоставила уникальные возможности для исследования ионосферы на различных высотах в шаровом слое с толщиной около 400 км.

Результаты, полученные в процессе работы космических аппаратов «Сич-1М» и микроспутника «Микрон», как в области дистанционного зондирования Земли, так и в области исследования ионосферы Земли были использованы при создании следующего поколения космических аппаратов, разрабатываемых КБ «Южное».

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Важным разделом работ КБ «Южное» по созданию космических аппаратов являются работы, проведенные в рамках международного сотрудничества. Практическая деятельность предприятия по этому направлению работ осуществлялась во взаимодействии с Советом по международному сотрудничеству при Академии наук СССР «Интеркосмос», созданным в 1966 г. для координации работ министерств, ведомств, научных учреждений и промышленных предприятий СССР.

Конструкторское бюро «Южное» в 1965 г. выступило с инициативой использовать для постановки совместных международных научных экспериментов унифицированные космические аппараты серии ДС-У собственной разработки, а в 1976 г. — автоматические универсальные орбитальные станции. Эта инициатива была поддержана АН СССР и правительственными организациями, что позволило научным организациям СССР в кооперации с научными организациями НРБ, ВНР, ГДР, Республики Куба, МНР, ПНР, СРР, ЧССР, СРВ, а в дальнейшем с участием научных организаций Франции, Индии, Швеции и Австрии осуществить широкомасштабную комплексную программу космических исследований (программу «Интеркосмос»).

Первый аппарат «Интеркосмос-1» был запущен ракетой-носителем «Космос» с космодрома Капустин Яр 14 октября 1969 г. Из 25 авто-

матических аппаратов, выведенных на орбиту в СССР в период с 1963 г. по 1991 г. по программе «Интеркосмос», 22 были созданы в КБ «Южное» и были изготовлены в ПО «Южный машиностроительный завод».

В начале 1970-х годов ГП КБ «Южное» начало работы по созданию космических аппаратов, предназначенных для изучения околоземного космического пространства в рамках совместного проекта с учеными Франции. Постановщиками эксперимента по проекту «Аркад», целью которого были исследования явлений и процессов, происходящих в высокоширотных областях верхней атмосферы Земли, и изучение природы полярных сияний, выступали: с советской стороны — Институт космических исследований АН СССР, с французской — Национальный центр космических исследований (CNES). Комплекс научной аппаратуры, которая должна была устанавливаться на аппарате, разрабатывался этими же организациями. Реализация проекта была осуществлена с использованием разработанных КБ «Южное» космических аппаратов: ДС-У2-ГКА («Ореол»), который дважды (в 1971 и 1973 гг.) был выведен на орбиту, и станции АУ-ОС-3-М-А-ИК («Ореол-3»), выведенный на орбиту в 1981 г.

В результате исследований, проведенных в рамках проекта «Аркад», впервые в мире были получены сведения о новых типах низкочастотных волновых излучений в земной атмосфере и впервые были зарегистрированы плазменные эффекты в магнитосфере, вызванные наземным взрывом средней мощности. С учетом результатов, полученных во время нахождения на орбите в период с 1971 по 1984 гг. трех космических аппаратов: «Ореол-1», «Ореол-2» и «Ореол-3», проект «Аркад» получил высокое международное признание и в 1985 г. был признан лучшим экспериментом по изучению околоземного космического пространства.

В тот же период начались работы ГП КБ «Южное» по сотрудничеству с Индией в области исследования и использования космического пространства. 10 мая 1972 г. между АН СССР и Индийской организацией космических исследований Правительства Индии (ISRO) было подписано Соглашение, предусматривающее

оказание индийской стороне консультаций и технической помощи в создании научного космического аппарата, обеспечение его запуска советской ракетой-носителем с территории СССР. Практическая реализация указанного соглашения решением Совета Министров СССР была возложена на КБ «Южное». Используя накопленный с 1960-х годов опыт проектирования космических аппаратов, КБ «Южное» оказало индийской стороне консультативную помощь при выборе конструктивно-компоновочной схемы и разработке конструкции КА при проведении прочностных, тепловых расчетов и оценке динамических характеристик. Специалисты КБ «Южное» провели конструкторскую и электрическую увязку КА с ракетой-носителем, приняли участие в экспериментальной наземной отработке и разработке эксплуатационной документации, а также обеспечили проведение работ на космодроме и на начальной фазе управления КА на орбите. В кооперации со смежными предприятиями КБ «Южное» изготовило и укомплектовало индийский КА газореактивной системой закрутки, солнечной и химической батареями, запоминающим устройством для регистрации информации научной и обеспечивающей аппаратуры, термическими покрытиями.

Первый индийский космический аппарат «Ариабата» был запущен 19 апреля 1975 г. ракетой-носителем «Интеркосмос» с космодрома Капустин Яр. После запуска первого индийского космического аппарата сотрудничество КБ «Южное» с ISRO было продолжено в рамках создания и запуска второго КА, предназначенного для экспериментальной отработки системы дистанционного зондирования Земли в интересах исследования природных ресурсов. Результатом совместных работ специалистов СССР и Индии явился успешный запуск 7 июня 1979 г. космического аппарата «Бхаскара» ракетой-носителем «Интеркосмос».

Дальнейшее сотрудничество с Индией проводилось в соответствии с новым Соглашением между АН СССР и ISRO от 11 июня 1979 г. Результатом проведения этих работ было изготовление и выведение на орбиту 20 октября 1981 г. ракетой-носителем «Интеркосмос» третьего модернизированного индийского КА «Бхаска-

ра-2». Совместная разработка и успешный запуск первых индийских космических аппаратов «Ариабата», «Бхаскара» и «Бхаскара-2» способствовали осуществлению Национальной космической программы Индии. Общественность и правительственные круги этой страны высоко оценили помощь советской стороны и в частности специалистов КБ «Южное», которую они оказали Индии в тот период при реализации ее Национальной космической программы.

Продолжением работ КБ «Южное» по космической тематике в рамках международного сотрудничества являются работы с Арабской Республикой Египет. В 2001 г. КБ «Южное» приняло участие в тендере, объявленном Национальным управлением дистанционного зондирования Земли и космических наук (NARSS) Египта на создание космической системы наблюдения поверхности Земли. Среди космических организаций и компаний, принявших участие в тендере, были известные компании из Великобритании, России, Южной Кореи. Победив в тендере, КБ «Южное» подписало контракт на проведение работ по проектированию, изготовлению, запуску, обучению и передаче технологий для спутника дистанционного зондирования Земли «EgyptSat-1».

В результате работ, выполненных по этому контракту ГП КБ «Южное» в кооперации с украинскими предприятиями-соисполнителями работ ОАО АО НИИРИ, ГПП «Хартрон-Консат», ГПП «Хартрон-Юком», ГНИП КОНЭКС, КП ЦКБ «Арсенал», был разработан космический аппарат «EgyptSat-1». Он был изготовлен в ПО «Южный машиностроительный завод» и 17 апреля 2007 г. был выведен ракетой-носителем «Днепр» на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 688 км.

Наряду с космическим аппаратом в рамках работ по тому же контракту в Египте была создана наземная станция управления спутником в полете, в состав которой входят центр управления в полете и технические средства приема и передачи информации с КА, а также доработана египетская наземная станция приема данных, полученных на космическом аппарате в процессе проведения съемки участков Земной поверхности. Все работы по созданию наземного

сегмента космической системы «EgyptSat» были выполнены специалистами ГП КБ «Южное» совместно со специалистами ОАО АО НИИРИ, ГНИП КОНЭКС и ГП «Днепркосмос».

В Египет были поставлены также разработанные и изготовленные на Украине терминалы пользователей электронной почты, которые во взаимодействии с бортовой аппаратурой электронной почты, установленной на космическом аппарате, дали возможность египетским потребителям пользоваться услугами этой почты. В процессе работы по контракту украинские специалисты провели обучение египетских операторов для работы на технических средствах египетского наземного сегмента космической системы «EgyptSat-1», после чего она в марте 2010 г. была принята египетской стороной в эксплуатацию.

Очередным достижением КБ «Южное» совместно с предприятиями и организациями, подведомственными Государственному космическому агентству Украины, является создание космической системы «Січ-2» (рис. 9) для наблюдений Земли в оптическом диапазоне, осуществленное в рамках «Общегосударственной целевой научно-технической космической программы Украины на 2008—2012 гг.».

Разработка космической системы «Січ-2» была осуществлена КБ «Южное» в кооперации с ОАО АО НИИРИ, НПП «Хартрон-Юком», НПП «Хартрон-Аркас», ГНИП КОНЭКС, ЦКБ «Арсенал», ГП «Днепркосмос». Изготовление аппарата «Січ-2» было осуществлено в ПО «Южный машиностроительный завод». В дополнение к целевой аппаратуре дистанционного зондирования Земли на аппарате установлен комплекс научной аппаратуры «Потенциал», назначением которого является отработка методов мониторинга космической погоды и поиска геофизических эффектов в ионосфере.

17 августа 2011 г. космический аппарат «Січ-2» был запущен ракетой-носителем «Днепр» на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 700 км. После выведения на орбиту он стал 401-м космическим аппаратом разработки КБ «Южное», успешно функционирующим на орбите. С августа по сентябрь 2011 г. были проведены летные испытания космической системы «Січ-2»,

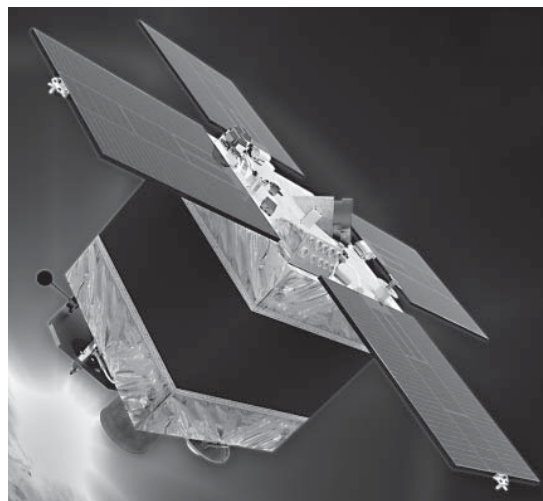


Рис. 9. Космический аппарат «Січ-2»

на основании результатов которых решением Государственной комиссии от 16 ноября 2011 г. она была принята в опытную эксплуатацию. Управление космическим аппаратом «Січ-2» в полете, получение и обработка информации с него в настоящее время проводится персоналом Национального центра управления и испытаний космических средств с использованием технических средств, расположенных в Евпатории и Дунаевцах.

Научно-прикладной программой использования данных дистанционного зондирования КА «Січ-2» предусматривается:

- отработка методов оценки:
 - экологического состояния ландшафта Украины;
 - прогноза урожайности на основе комплексной обработки наземной и космической информации;
 - оценки влияния геодинамических факторов на экологическое состояние урбанизированных территорий;
 - поиска месторождений нефти и газа на суше и шельфе;
 - комплексного мониторинга акваторий Черного и Азовского морей.
- опытная эксплуатация методик:
 - определения видового состава и состояния лесов;

- дистанционного контроля снегового покрова;
- обнаружения лесных и степных пожаров;
- оценки состояния озимых культур и других.

В настоящее время космическая система «Січ-2» функционирует в нормальном эксплуатационном режиме.

Ожидаемыми результатами ее эксплуатации являются:

- информационная поддержка деятельности высшего военно-политического руководства страны;
- решение общегосударственных задач мониторинга природных ресурсов, рационального природоиспользования, технических и природных катаклизмов;
- решение задач сельского хозяйства, земледользования, градостроительства, контроля и оценки загрязнения окружающей среды, использование данных съемки для получения цифровых карт местности;
- разработка методик диагностики природных и технических катастрофических явлений;
- разработка методов диагностики газоплазменных и электродинамических характеристик геополосы;
- международное сотрудничество в области дистанционного зондирования Земли с целью решения глобальных и национальных проблем путем обмена спутниковой информацией.

В соответствии с перспективными планами и концепцией развития космической отрасли Украины до 2032 г. намечается осуществить модернизацию упомянутого выше космического аппарата «Січ-2», в результате которой он должен обеспечивать проведение съемки участков земной поверхности с разрешением не хуже 2.5 м (вместо достигнутых 8 м) и провести разработку ряда космических аппаратов оптического наблюдения поверхности Земли с разрешением около 1 м.

Кроме того, в планах КБ «Южное» — создание космических аппаратов всепогодного радиоло-

кационного наблюдения среднего и высокого разрешения и перспективных аппаратов научного назначения.

В настоящее время Украина обладает всеми составляющими — научной, инженерной, производственной и кадровой, необходимыми для осуществления современных крупномасштабных космических проектов. Важная роль в реализации этих проектов отводится ГП КБ «Южное», как головному предприятию в ведомстве Государственного космического агентства Украины. Весомое место в планах дальнейших работ предприятия занимают работы по созданию конкурентоспособных ракет-носителей и космических аппаратов по обеспечению получения и распространения информации, являющейся результатом проведения съемок поверхности Земли и исследования космического пространства.

Вся история и опыт ГП КБ «Южное», а также накопленный им в течении 50 лет работы в области создания образцов космической техники научно-технический потенциал, вселяют уверенность в том, что еще многие задачи, стоящие перед космической отраслью Украины, являющейся частью мирового космического сообщества, будут успешно решены.

Надійшла до редакції 12.03.12

A. V. Degtyarev

50 YEARS IN SPACE ORBITS

We describe some conditions of the beginning and further development of a new direction of activity, namely, the elaboration of launch vehicles and spacecraft (SC), at the Yuzhnoye SDO which was one of the leading enterprises-developers of strategic missile complexes. A list of SC developed at the Yuzhnoye SDO is given and an overview of directions of space researches carried out with the help of these SC from 1962 to 2012 is presented. The stages of SC creation work at the Yuzhnoye SDO are considered and a brief description of SC characteristics and design features is given. We show the contribution of the Yuzhnoye SDO to the solution of scientific-technical problems of the elaboration of several spacecraft generations and the role of the Yuzhnoye SDO in the study and usage of space within the framework of Kosmos and Interkosmos programs as well as in the framework of the national space programs of Ukraine.

До 60-річчя від дня народження доктора технічних наук професора Валерія Олександровича ПУЛЯЄВА



30 квітня 1952 р. виповнюється шістдесят років **Валерію Олександровичу Пуляєву**, видатному фахівцеві з 30-річним стажем у галузі дистанційного моніторингу навколоземного космічного простору, спеціалісту по радіолокаційним системам радіофізичного призначення, розробнику нових методик одержання іоносферних даних та комп'ютерного аналізу параметрів геокосмосу.

Родився В. О. Пуляєв на Херсонщині. Після закінчення Харківського політехнічного інституту в 1979 р. був направлений в Окреме конструкторське бюро радіофізичних досліджень іоносфери при інституті, де в 1990 р. захистив кандидатську дисертацію, а потім отримав вчене звання старшого наукового співробітника за спеціальністю «Радіотехнічні системи спеціаль-

ного призначення, включаючи техніку НВЧ, та технологія їхнього виробництва».

Валерій Олександрович до 1995 р. займався розробкою спеціалізованих комп'ютерних систем, призначених для використання при радіофізичних дослідженнях іоносфери методом некогерентного розсіяння радіохвиль. Ініціатор впровадження у практику методів цифрової обробки інформації в глобальній системі дистанційного зондування іоносфери. Під його керівництвом подальшого розвитку у методі некогерентного розсіяння набули принципи радіолокаційного зондування з використанням маніпуляції рядом параметрів сигналів та була створена апаратура для їхнього аналізу.

В 2006 р. в Інституті іоносфери, організованому на базі конструкторського бюро, В. О. Пуляєву присуджено науковий ступінь доктора технічних наук за спеціальністю «Дистанційні аерокосмічні дослідження», а через два роки — звання професора. Проводячи модернізацію апаратури, В. О. Пуляєв вперше в Україні зумів одержати параметри іоносфери для висоти 1500 км, максимально досяжної для радіолокаторів некогерентного розсіяння. За результатами модернізації Постановою Кабінету Міністрів радіолокаційним системам Інституту іоносфери надано статус національного надбання України.

Весь час В. О. Пуляєв є керівником ряду державних науково-дослідних робіт, координує спільні дослідження ближнього космічного простору спільно з Обсерваторіями некогерентного розсіяння США та Росії. Неодноразово виступав з доповідями, зокрема перед студентами і

провідними науковцями в обсерваторії Хайстек (Бостон, США), на Національній конференції радіосоюзу в Боулдері (Колорадо) та на координаційних зустрічах спілки європейських радіолокаторів HP EISCAT (Санкт-Петербург, Росія).

В теперішній час наукові інтереси В. О. Пуляєва пов'язані з підвищенням ефективності аналізу та використання іоносферної інформації. Він є ініціатором створення єдиної в Україні бази даних некогерентного розсіяння за результатами спостережень за станом космічної погоди над Європейським регіоном. Автор багатьох фахових праць та методичних посібників з обробки радіофізичних даних. Має біля 150 публікацій, в тому числі дві монографії. Активний винахідник.

В. О. Пуляєв є членом експертної ради Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (секція «Ядерна фізика, радіофізика та астрономія»), членом програмного комітету молодіжної та міжнародної науково-практичної конференцій, відповідальним редактором науково-технічного збірника.

Підготував до захисту кандидата наук, керує роботою аспірантів.

В теперішній час В. О. Пуляєв працює заступником директора Інституту іоносфери по науковій роботі. Як керівник НДР активно працює в рамках Програм фундаментальних досліджень іоносфери з метою розширення Європейської інтеграції України. За багаторічну плідну працю, значний високий внесок у розвиток вітчизняної науки нагороджений Грамотами Президії Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України.

В. О. Пуляєв одночасно є професором кафедри радіоелектроніки Національного технічного університету ХПІ, веде активну викладацьку діяльність. За вагомий особистий внесок у розвиток освіти і науки, плідну наукову і педагогічну діяльність, високий професіоналізм у підготовці наукових та студентських кадрів нагороджений грамотою Харківської облдержадміністрації.

І. Ф. ДОМНІН

*директор Інституту іоносфери,
доктор технічних наук, професор*

М. В. ЛЯШЕНКО

*вчений секретар Інституту іоносфери,
кандидат фізико-математичних наук*

АРТЕМЕНКО Ігор Геннадійович — інженер I категорії Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрямок науки — кліматологія, моделювання, аналіз ризиків, дистанційне дослідження Землі.

БІЛІНСЬКИЙ Андрій Іванович — молодший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка.

Напрямок науки — оптичні спостереження штучних супутників Землі, розробка програмного забезпечення для проведення астрономічних спостережень.

БЛАГОДИР Ярослав Тимофійович — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка.

Напрямок науки — оптичні спостереження штучних супутників Землі, розробка та вдосконалення апаратурного забезпечення для електрофотометричних та лазерних спостережень ШСЗ.

ВОВЧИК Єва Богданівна — старший науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — оптичні спостереження штучних супутників Землі.

ВОРОБІЙОВ Анатолій Іванович — старший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат геолого-мінералогічних наук.

Напрямок науки — геофізика, розробка способів прогнозу землетрусів та комплексування супутникової і геолого-геофізичної інформації з метою прогнозування зон нафтогазоносності.

ДЕГТЯРЬОВ Олександр Вікторович — Головний конструктор — Генеральний директор Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», академік Міжнародної академії астронавтики, Заслужений машинобудівник України, кандидат економічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

ДУГІН Станіслав Сергійович — головний приладист Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрямок науки — дистанційне зондування Землі та обробка даних наземної спектроскопії.

ЖОЛОБАК Галина Михайлівна — старший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат біологічних наук, доцент.

Напрямок науки — фізіологія рослин, ботаніка, дистанційне дослідження Землі.

ЗАХАРОВ Ігор Володимирович — аспірант Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — фізика верхньої атмосфери, хвильові процеси в іоносфері.

ІВЧЕНКО Василь Миколайович — завідувач кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — навколосезонний космічний простір.

КАБЛАК Наталія Іванівна — докторант кафедри вищої геодезії та астрономії Національного університету «Львівська політехніка», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — обробка ГНСС-спостережень.

КЛОКОВ Іван Сергійович — студент кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — навколосезонний космічний простір.

КОЗАК Людмила Володимирівна — доцент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — навколосезонний космічний простір.

КОЗАК Павло Миколайович — науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика метеорних явищ.

КОСТИЮЧЕНКО Юрій Васильович — провідний науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — аерокосмічні дослідження Землі, надзвичайні ситуації, аналіз ризиків, геофізика.

ЛАПЧУК Віктор Петрович — завідувач навчальної лабораторії кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — навколоземний космічний простір.

ЛЕВЧИК Олена Іванівна — вчений секретар Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат біологічних наук.

Напрямок науки — фізіологія рослин, ботаніка, дистанційне дослідження Землі.

ЛУЇ Тоні Тат Їн (Lui Anthony Tat Yin) — професор лабораторії прикладної фізики університету Джона Хопкінса, Лаурел, Меріленд, США

Напрямок науки — навколоземний космічний простір.

ЛЯЛЬКО Вадим Іванович — директор Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», академік НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державних премій України, член-кореспондент Міжнародної академії астронавтики.

Напрямок науки — географія, енергомасообмін в геосистемах, дистанційні дослідження природних ресурсів.

МОВЧАН Дмитро Михайлович — молодший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрямок науки — дистанційне дослідження Землі, енергомасообмін в геосистемах, кліматичні зміни.

ОДЗИМЕК Анна — науковий співробітник Лестерського університету, Великобританія.

Напрямок науки — атмосферна електрика.

САВІН Сергій Петрович — провідний науковий співробітник Інституту космічних досліджень Російської академії наук.

Напрямок науки — магнітосфера Землі.

САВЧУК Степан Григорович — професор кафедри вищої геодезії та астрономії Національного університету «Львівська політехніка», доктор технічних наук.

Напрямок науки — вища геодезія та астрономія.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч — завідувач лабораторії Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», доктор геологічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — гідрогеологія, дослідження процесів енергомасообміну в геосистемах методами математичного моделювання, обробка даних космічної зйомки з метою вирішення природоохоронних та природоресурсних задач.

СИБІРЦЕВА Оксана Миколаївна — молодший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрямок науки — математичне моделювання та методи обробки даних дистанційного зондування Землі.

ШПОРТЮК Зіновія Михайлівна — старший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — математичне моделювання процесів енергомасообміну в геосистемах, методи обробки даних дистанційного зондування Землі.

ЦУПКО Олександр Олександрович — магістр кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — магнітосфера Землі.

ФЕДОРЕНКО Алла Костянтинівна — старший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика верхньої атмосфери, хвильові процеси в іоносфері.