НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК + ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ Том 19 4(83) + 2013

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



3MICT

Горбулін В. П., Шевцов А. І., Шеховцов В. С. Особливості використання технологічної та виробничої бази ракетно-космічної галузі в інтересах розвитку машинобудівного комплексу України

Меланченко А. Г. Реконфигурация системы управления космического аппарата в условиях отказов

Донец В. В. Анализ физических и технологических аспектов создания бортового гиперспектрометра AVIRIS первого поколения

Мовчан Д. М. Оцінка динаміки параметрів лісового покриву на території України (Західне Полісся) на основі даних дистанційного зондування

Соколовська А. В. Космічний моніторинг екологічного стану міських території (на прикладі міста Києва)

© НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ, 2013 © ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ, 2013

CONTENTS

- **3** *Gorbulin V. P., Shevtsov A. I., Shekhovtsov V. S.* Some peculiarities of the use of technological and production base of the rocket and space field for machine-building complex development
- 8 *Melanchenko A. G.* Spacecraft control system's reconfiguration in the presence of failures
- **17** *Donets V. V.* An analysis of physical and technological aspects of air-based hyperspectrometer AVIRIS of the first generation
- **29** *Movchan D. M.* Estimation of Ukrainian forest cover (Western Polissia) using remote sensing data
- **44** *Sokolovska A. V.* Space monitoring of ecological condition of urban territories (the Kyiv city is used as an example)

швидкості нейтральних частинок та іонів у полярних областях

табных МГД-мод в магнитосфере Земли

Кордюм Є. Л. Біологія рослин в космосі: наукові результати та проблеми

НАШІ АВТОРИ

- Беспалова А. В., Федоренко А. К. Хвильові збурення 50 Bespalova A. V., Fedorenko A. K. Wave velocity disturbances of neutral particles and ions in the polar regions
- Черемных С. О. О поляризации поперечно-мелкомасш- 57 Cheremnykh S. O. On the polarization of transversally smallscale MHD modes in the Earth's magnetosphere
 - 65 Kordyum E. L. Plant biology in space: scientific results and problems

78 OUR AUTHORS

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

Підписано до друку 12.09.13. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс. Ум. друк. арк. 8,19. Обл.-вид. арк. 8,60. Тираж 100 прим. Зам. № 3682.

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. П. Горбулін¹, А. І. Шевцов², В. С. Шеховцов²

¹ Президія Національної академії наук України, Київ ² Регіональний філіал Національного інституту стратегічних досліджень, Дніпропетровськ

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ТА ВИРОБНИЧОЇ БАЗИ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ГАЛУЗІ В ІНТЕРЕСАХ РОЗВИТКУ МАШИНОБУДІВНОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ

Одним з важливих напрямів діяльності ракетнокосмічної галузі є застосування її технологічної та виробничої бази в інтересах розвитку машинобудівного комплексу країни. При цьому спектр можливих напрямів такого застосування потенціально є досить широким — від використання власних розробок ракетно-космічної галузі (космічних апаратів різного цільового призначення до використання наявної проектної, технологічної та виробничої бази для створення цивільної високоякісної продукції машинобудівного профілю та розробки нових технологій, матеріалів, обладнання, пілотних установок й технічних систем.

Метою статті є розгляд сучасних наробок в цій сфері, визначення проблемних питань та напрямів їхнього вирішення.

Використання космічних розробок. Космічний апарат «Січ-1» — це перший вітчизняний КА, який виконав дистанційне зондування території України, результати якого було використано для оцінки стану грунту та рослинного покриву, визначення наявності вологи у грунті та стану озимих культур, контролю динаміки паводків, зон і рівня забруднення території країни. З використанням другого космічного апарата «Січ-2» було створено космічну систему з однойменною назвою, до складу якої увійшли власне КА «Січ-2», центр управління польотом, станції прийому інформації та комплекси попередньої тематичної обробки інформації. КА «Січ-2» було виве-

© В. П. ГОРБУЛІН, А. І. ШЕВЦОВ, В. С. ШЕХОВЦОВ, 2013

дено на орбіту у серпні 2011 р. ракетою-носієм «Днепр». Протягом року ним було сфотографовано територію земної поверхні площею понад 4.5 млн кв. км, з них на територію України припало 2 млн кв. км. Космічні знімки, отримані за допомогою КА «Січ-2», було надано структурам Міністерства надзвичайних ситуацій, Міністерства екології і природних ресурсів та Міністерства оборони України. Нині виконано більш ніж 1670 заявок на проведення зйомок території регіонів України. Отримані знімки використовуються для контролю за експлуатацією аграрних ресурсів, земле- і лісокористуванням, для моніторингу надзвичайних ситуацій та усунення їхніх наслідків, розвідки корисних копалин. Сьогодні апарат «Січ-2» припинив своє активне функціонування. Найближчими роками планується створення КА «Січ-2М» з підвищеною точністю зйомок, а також радіолокаційних КА, які допомагатимуть отримувати дані зондування поверхні Землі незалежно від метеорологічних умов та часу проведення зйомок.

Геостаціонарний КА «Либідь». Розробка КА перебуває в стадії завершення. Його запуск планується провести у четвертому кварталі 2013 року ракетою-носієм «Зеніт ЗЅІ.Б» з космодрому Байконур. Перебуваючи в орбітальній позиції 48° східної довготи, КА «Либідь» буде забезпечувати покриття Центральної та Східної Європи, Індії, Центральної і Західної Африки та надавати послуги в сферах зв'язку, супутникового телебачення та широкополосного доступу до інтернету. Планується, що половина ресурсу супутника використовуватиметься державними компаніями, а друга половина здаватиметься в оренду іноземним компаніям для показу своїх каналів на території України.

Міжнародний проект РКК «Циклон-4-Алкантара». Розробка проекту завершується. Основним призначенням ракетно-космічного комплексу є створення носія для виведення вітчизняних космічних апаратів промислового призначення та комерційна експлуатація РКК спільно з Бразилією. При цьому українськими організаціями і підприємствами вперше забезпечується повний цикл розроблення та виготовлення комплексу. Для проведення пусків ракет-носіїв «Циклон-4» використовуватиметься новий бразильський космодром «Алкантара», розташований в приекваторіальній зоні. Останнє дає змогу запускати космічні апарати в широкому спектрі нахилів орбіт.

Випуск машинобудівної продукції. Державне підприємство «КБ «Південне» разом з Виробничим об'єднанням «Південний машинобудівний завод» в кооперації з вітчизняними організаціями і підприємствами створили сімейство тролейбусів (ПМЗТ-1, ПМЗТ-2, ПМЗТ2.09), розроблені на основі блочно-модульного принципу з використанням сучасних технологій та максимального використання уніфікованих деталей, вузлів та агрегатів. Тролейбуси експлуатуються в Москві, Оренбурзі, Ростові-на-Дону (Російська Федерація), Кишиневі (Республіка Молдова), Ашгабаді (Туркменістан), Мінську (Республіка Білорусь).

Розроблено також сімейство самохідних зернозбиральних комбайнів «Славутич» з барабанним та роторним молотильно-сепаруючими пристроями (K3C-9-1, K3CP-9M, K3C-9M-1), які оснащені косаркою з робочою шириною захвату 6 м, платформою-підбирачем, пристроями для збирання незернової частини врожаю. Комбайни призначені для використання в усіх зернових зонах і дозволяють якісно, з мінімальними втратами збирати зернові колоскові культури, а за допомогою спеціальних пристроїв — зернобобові, кукурудзу, соняшник, круп'яні культури, сою, сорго, рапс та люпин. Комбайн K3C-9-1 виробляється серійно з 2000 р. і працює на ланах України; для комбайнів K3CP-9M і K3C-9M-1 створено дослідні зразки. Комбайни спроможні забезпечувати якісне збирання зернових та інших культур у несприятливих агротехнічних умовах при значно меншій питомій вартості збирання порівняно з іноземними аналогами.

Значна увага приділяється розробці новітніх технологій машинобудівного профілю, матеріалів та обладнання. Розроблено близько 70 проектів, певну частку яких завершено створенням пілотних установок. Серед них можна зазначити:

•експериментальну установку, яка забезпечує надтонкий розмел соломи (фракція менше 100 мкм) як сировини для виготовлення високоякісної пластмаси;

• установку безперервного отримання водню з синтез-газу, який виробляється з низькосортового вугілля;

• озонові технології і сушарки для зерна та насіння;

• комп'ютерну технологію моніторингу експлуатаційного стану та аварійного ризику сховищ нафти та отруйної рідини;

• автоматизований моніторинг герметичності ємностей з вибухонебезпечною та отруйною рідиною при тривалій експлуатації.

Серед інших розробок можна зазначити:

пілотну установку, призначену для дослідження і відпрацювання процесів газифікації українського вугілля в умовах, наближених до промислового використання (відпрацьовані за допомогою цієї установки енергетичні технології дозволяють у майбутньому перейти на екологічно чисті технології переробки вугілля без використання природного газу й мазуту з підвищенням коефіцієнта корисної дії у 2.5—3 рази);

•котел автоматизований, жаротрубно-димогарного типу з горизонтальним розташуванням конвективної частини та триразовою зміною руху газового потоку, призначений для теплопостачання та гарячого водозабезпечення житлових, адміністративних та промислових приміщень (забезпечує високий коефіцієнт корисної дії, тривалий ресурс роботи та низьку теплову напругу елементів конструкції).

Проблемні питання. Фінансування. Головним чинником, що гальмує розширення діяльності ракетно-космічної галузі в інтересах вирішення

народногосподарських завдань, є нестача бюджетних фінансових ресурсів для забезпечення наукових досліджень та впровадження новітніх розробок. Саме з цієї причини при створенні переліченої продукції використовувалися як результати наукових досліджень і технологічні наробки, отримані галуззю раніше, так і різні джерела фінансування. Так, КА «Січ-1» було створено за рахунок бюджетного фінансування, а космічна система «Січ-2» — за умов використання результатів наукових досліджень і технологічних наробок, отриманих під час розробки єгипетського КА «Єгипсат» на комерційних засадах та за обмеженого бюджетного фінансування. Геостаціонарний КА «Либідь» створюється за рахунок кредитних коштів Канадського експортного агентства (на суму 254.6 млн доларів) під гарантії уряду та частково за рахунок бюджетного фінансування. Фінансування розробки українсько-бразильського РКК «Циклон-4-Алкантара» проводиться спільно з Бразилією на рівних паях. Причому фінансування розробок української частки проекту проводиться за рахунок кредитних коштів, які надаються галузі щорічно під гарантії уряду.

При розробці новітніх технологій машинобудівного профілю, матеріалів, обладнання та пілотних установок також використовувалися кошти Українського науково-технологічного центру.

Окрім згаданих позабюджетних джерел, для створення космічних апаратів народногосподарського призначення використовуються також кошти Загальнодержавної цільової науковотехнічної космічної програми України та кошти, зароблені галуззю за рахунок комерційних запусків космічних апаратів інших країн.

Слід зазначити, що кошти, які отримуються від держави, хоча і сприяють розробці нових зразків ракетно-космічної техніки народногосподарського призначення, проте їх обсяг вкрай недостатній. Наприклад, на провідному ДП «КБ «Південне» у 2012 р. структура фінансування склалася таким чином: 43.1 % — фінансування проектів іноземними замовниками, 18.8 % отримано від російських замовників, 33.9 % кредитні державні кошти проекту «Циклон-4-Алкантара» і тільки 3.3 % отримано від Державного космічного агентства України. Решту, 0.9 %, отримано за договорами з українськими замовниками.

При такому обмеженні на використання державних ресурсів основні зусилля галузі концентруються на розширенні діяльності зі створення у міжнародній кооперації перспективних РКК і наступної їхньої комерційної експлуатації, з розподілом коштів на пайовій основі. Окрім отримання комерційних коштів, які використовуються для фінансування розробок РКТ народногосподарського призначення, створення РКК у міжнародній кооперації дає змогу об'єднувати новітні технології різних країн та створювати конкурентоспроможні ракетно-космічні комплекси.

Створення нових технологій і розробок. Розширення міжнародної комерційної діяльності та створення новітніх зразків РКТ народногосподарського призначення потребує постійної модернізації і розробки нових технологій. Створення технологій нерозривно пов'язане з проведенням фундаментальних та прикладних досліджень. З метою їхнього посилення ДБ «КБ «Південне» спільно з Президією НАН України розроблено «Перспективний план спільної діяльності ДП «КБ «Південне» та наукових структур НАН України на період до 2017 року» та «Генеральну угоду про співробітництво ДП «КБ «Південне» та НАН України». Перспективний план затверджено постановою від 10.10.2012 р. План містить 93 теми конкретних досліджень з основних наукових напрямів. Серед них — загальне питання проектування перспективних зразків РКТ, балістика, аеродинаміка, теплотехніка, навантаження і міцність конструкцій, нові матеріали, технології їхнього виготовлення та методи контролю, рідинні та твердопаливні двигуни, системи керування, а також економіка та управління виробництвом.

Для організації робіт утворено Координаційну раду під керівництвом Президента НАН України та Генерального конструктора-генерального директора ДП «КБ «Південне». Сформовано спільні робочі групи за вказаними темами наукових досліджень. У грудні 2012 р. відбулося перше засідання Координаційної ради наукових установ НАН України та ДП «КБ «Південне», на якому сформовано та узгоджено план спільних робіт на 2013 рік.

Про види науково-технічної політики у машинобудівному комплексі. Однією з системних проблем отримання бюджетних коштів є відсутність узгодженої довгострокової науково-технічної політики у машинобудівному комплексі країни і, як наслідок, відсутність системи державних науково-технічних пріоритетів у цій сфері. Наявність пріоритетів слугувала б вихідним орієнтиром для визначення найважливіших галузей машинобудування та концентрації національних ресурсів на напрямах технологічного прориву і, таким чином, сприяла б збільшенню обсягів фундаментальних та прикладних досліджень, а також розробок в інтересах створення новітньої машинобудівної продукції.

Відсутність таких пріоритетів призвела, зокрема, до того, що серед прийнятих одинадцяти національних проектів, покликаних стати основою розвитку економіки країни, немає проекту технологічного розвитку машинобудівного комплексу країни.

Про доцільність впровадження державно-приватного партнерства. Збільшення ресурсів можна отримати через залучення приватних партнерів до співпраці з використанням ідей державно-приватного партнерства (ДПП). Однак на цьому шляху поки що є перешкоди. Так, у Законі не виписано механізм залучення приватних партнерів до ДПП з урахуванням їхніх інтересів. Крім того, на відміну від європейського законодавства першою статтею Закону України «Про державно-приватне партнерство» державним підприємствам заборонено залучати приватних партнерів у рамках ДПП до спільної діяльності. Є також обмеження для представників державної влади щодо відповідальності за своїми зобов'язаннями в рамках ДПП. Як визнають автори «Концепції інвестиційної реформи», прийнятої за участі Президента України, на сьогодні форми державно-приватного партнерства ще не отримали свого розвитку через відсутність практичних інструментів. Головна причина цього полягає в тому, що логіка організації ДПП передбачає підготовку професійних пропозицій з боку держави, а держава ще не має таких можливостей.

Комітетом економічних реформ відповідно до прийнятої Концепції передбачено для прискорення впровадження ідей ДПП створити спеціальну інституцію — Центр державно-приватного партнерства.

Про створення ракетно-космічного холдингу. Негативно впливає також наявна структура управління ракетно-космічною галуззю. У країнах з розвиненою ринковою економікою більша частина потенціалу галузевої науки працює у межах великих корпоративних структур. Такі структури є замовниками значної частини наукових досліджень і новітніх розробок. Створення холдингу на базі організацій і підприємств ракетно-космічної галузі, безсумнівно, сприяло б збільшенню обсягів фінансування в інтересах створення новітніх технологій, а його корпоратизація — залученню інвестицій від приватних партнерів.

З урахуванням викладеного для підвищення ефективності використання технологічної та виробничої бази ракетно-космічної галузі в інтересах розвитку машинобудівного комплексу країни доцільно:

• Міністерству економічного розвитку і торгівлі України підготувати матеріали «Національного проекту з технологічного розвитку машинобудівного комплексу України» та передати їх до Комітету економічних реформ для подальшого узгодження та прийняття. При підготовці матеріалів передбачити участь ракетно-космічної галузі у створенні нових технологій, матеріалів та обладнання машинобудівного профілю;

• Комітету економічних реформ та Державному агентству з інвестицій та розвитку прискорити створення Центру державно-приватного партнерства. У Положенні Центру передбачити одним з його основних завдань створення механізму залучення приватних партнерів до спільних робіт з технологічного розвитку машинобудівного комплексу країни з урахуванням інтересів;

•доповнити першу статтю Закону України «Про державно-приватне партнерство» Положенням, відповідно до якого державним підприємствам дозволятиметься залучення приватних партнерів до співпраці з правом створення відповідних юридичних осіб та визначенням державної власності державних підприємств як такої, що може використовуватися для реалізації бізнес-ідей, метою яких є сприяння збільшенню обсягів виробництва та експорту машинобудівної продукції;

• для концентрації ресурсів та створення можливостей залучення інвестицій приватних партнерів на базі організацій і підприємств ракетнокосмічної галузі створити холдинг, що сприятиме збільшенню обсягів фінансування в інтересах створення новітніх технологій.

Це, безумовно, далеко не повний перелік можливих пропозицій та заходів щодо збільшення ефективності використання технологічної та виробничої бази ракетно-космічної галузі, але достатній, щоб розпочати необхідні трансформації. *Стаття надійшла до редакції 06.06.13*

В. П. Горбулин, А. И. Шевцов, В. С. Шеховцов

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БАЗЫ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В ИНТЕРЕСАХ РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА УКРАИНЫ

V. P. Gorbulin, A. I. Shevtsov, V. S. Shekhovtsov

SOME PECULIARITIES OF THE USE OF TECHNOLOGICAL AND PRODUCTION BASE OF THE ROCKET AND SPACE FIELD FOR MACHINE-BUILDING COMPLEX DEVELOPMENT УДК 629.7.05

А. Г. Меланченко

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

РЕКОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ОТКАЗОВ

Рассматривается задача реконфигурации системы управления космического аппарата при возникновении отказов командных приборов и исполнительных органов. Предполагается, что обнаружение и локализация отказов осуществляется отдельной подсистемой системы управления в масштабе времени, близком к реальному. Моделирование задержек и других неопределенностей в работе подсистемы обнаружения и локализации отказов (СОЛО) осуществляется на основе предположения, что реальные отказы находятся внутри некоторых интервалов, охватывающих сообщения о них, формируемые СОЛО.

введение

Проектирование отказоустойчивых систем управления (СУ) является актуальной проблемой для многих отраслей, где системные отказы могут привести к значительному ущербу. К их числу, безусловно, относится и космическая техника. Для космических миссий важно, чтобы возможные отказы в системе управления были своевременно обнаружены, локализованы, и оперативно предприняты парирующие действия, позволяющие восстановить работоспособность системы и продолжить выполнение миссии.

Исследования и разработки в области проектирования отказоустойчивых СУ ведутся по двум основным направлениям: обнаружение и локализация отказов [3], и отказоустойчивое управление [2]. Однако, несмотря на существенный прогресс в каждом из указанных направлений, они развиваются практически независимо друг от друга. В большинстве работ внимание авторов сосредоточено на одном из направлений, а другое либо не рассматривается, либо принимается, что соответствующая «смежная» подсистема работает идеально. В результате большинство известных алгоритмов обнаружения и локализации отказов не учитывают динамику замкнутой СУ. С другой стороны, большинство алгоритмов отказоустойчивого управления базируются на гипотезе о том, что подсистема обнаружения и локализации отказов (СОЛО) решает свои задачи мгновенно и безошибочно.

Вместе с тем из практики известно, что при возникновении отказа в СУ в начальный момент времени СОЛО еще не располагает достаточной информацией для обнаружения и, тем более, для уверенной локализации этого отказа. Соответственно, информация об отказе, предоставляемая СОЛО подсистеме реконфигурации СУ (СРСУ) вначале является менее точной, или более неопределенной. И лишь по мере того как СОЛО получает все больший объем данных о состоянии системы, формируемая ею информация об отказе становится все более точной (уменьшается степень ее неопределенности).

Поэтому для обеспечения отказоустойчивости перспективных СУ актуальной является проблема согласования алгоритмов СОЛО и СРСУ таким образом, чтобы СУ в целом обеспечивала бы приемлемое качество управления (по крайней мере, устойчивость) КА в течение времени, необходимого СОЛО для решения своих функциональных задач с необходимой достоверностью.

В настоящей статье предлагается алгоритм СРСУ, учитывающий возможность возникновения отказов, полных или частичных, как команд-

[©] А. Г. МЕЛАНЧЕНКО, 2013

ных приборов, так и исполнительных органов СУ, а также неопределенность информации об этих отказах, формируемой СОЛО. При этом предполагается, что СОЛО формирует информацию об отказах в реальном масштабе времени, однако непосредственно после возникновения отказа эта информация содержит большую степень неопределенности, которая уменьшается с течением времени.

Такой подход предполагает предварительное проектирование некоторого множества алгоритмов регулятора СУ, в которых оптимизируемыми параметрами являются величины интервалов неопределенности оценок СОЛО. После обнаружения отказа СРСУ подключает один из этих алгоритмов. Несмотря на то что множество предварительно спроектированных алгоритмов регулятора СУ является конечным, работа СРСУ не ограничивается только предусмотренными отказами, а обеспечивает сохранение работоспособности СУ при произвольной комбинации отказов командных приборов и исполнительных органов до тех пор, пока система сохраняет свойства обнаружительной способности и стабилизируемости.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Практически все современные СУ космических аппаратов создаются на основе использования бортовых компьютеров с необходимым программным обеспечением. Поэтому будем рассматривать разомкнутую линейную систему C_p , работающую в дискретном времени. Такая разомкнутая система в нормальной ситуации, то есть при отсутствии отказов, описывается следующими уравнениями в пространстве состояний:

$$\mathbf{C}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{HOPM}} : \begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{B}_{d}\mathbf{d}_{k} + \mathbf{B}_{u}\mathbf{u}_{k}, \\ \mathbf{r}_{k} = \mathbf{C}_{r}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{D}_{rd}\mathbf{d}_{k} + \mathbf{D}_{ru}\mathbf{u}_{k}, \\ \mathbf{y}_{k} = \mathbf{C}_{y}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{D}_{yd}\mathbf{d}_{k}, \end{cases}$$
(1)

где $\mathbf{x}_k - n$ -мерный вектор состояния системы на *k*-м такте управления, $\mathbf{u}_k - m$ -мерный вектор управления на *k*-м такте управления, $\mathbf{y}_k - p$ -мерный вектор измерений на *k*-м такте управления, $\mathbf{r}_k - n$ -мерный опорный вектор на *k*-м такте управления, $\mathbf{d}_k - d$ -мерный вектор возмущений на k-м такте управления, **A**, **B**_{*i*}, **C**_{*i*}, **D**_{*ij*} – матрицы соответствующих размерностей.

В качестве командных приборов СУ современных космических аппаратов чаще всего используются датчики астроориентиров — Солнца и звезд, магнитометры и инерциальные датчики на базе гироскопов различного типа. Под отказом командного прибора ниже будем понимать резкое (в пределах одного такта управления) увеличение рассогласования между фактическим значением выходного сигнала системы $\mathbf{y}_{k}^{\text{норм}}$ и его измеренным значением $\breve{\mathbf{y}}_{k}^{\text{норм}}$, соответствующим отказу. Причинами такого отказа могут быть, как и в случае исполнительных органов, различные нарушения в электрической схеме прибора (обрыв, короткое замыкание), а также, например, затенение поля зрения датчика астроориентиров. Тогда модель отказа командного прибора можно представить в виде

$$\mathbf{\breve{y}}_{k}^{\text{HOPM}} = \mathbf{y}_{k}^{\text{HOPM}} + (1 - \mathbf{F}_{\text{K}\Pi})(\mathbf{y} - \mathbf{y}_{k}^{\text{HOPM}}), \qquad (2)$$

где у — p-мерный вектор смещения измерения, а матрица $\mathbf{F}_{\mathrm{K\Pi}}$ имеет вид

$$\mathbf{F}_{\mathrm{K}\Pi} = \mathbf{diag}\{[f_{\mathrm{K}\Pi 1}, f_{\mathrm{K}\Pi 2}, \dots, f_{\mathrm{K}\Pi p}]\}.$$

В рамках модели (2) $f_{\rm K\Pi i} = 0$ соответствует полному отказу *i*-го командного прибора, в результате чего измеряемое им значение $\tilde{\mathbf{y}}_{ki}^{\rm норм}$ выходного сигнала системы становится, начиная с *k*-го такта, равным *i*-му элементу нерегулируемого вектора смещения измерения **y**. Аналогично $f_{\rm K\Pi i} = 1$ означает, что *i*-й командный прибор функционирует нормально, поскольку $\tilde{\mathbf{y}}_{ki}^{\rm норм} =$ = $\mathbf{y}_k^{\rm норм}$. Значения $0 < f_{\rm K\Pi i} < 1$ соответствуют частичному отказу *i*-го командного прибора.

Наиболее распространенными исполнительными органами СУ космических аппаратов являются инерционные исполнительные органы (двигатели-маховики, силовые гироскопы) и электромагниты. Под отказом исполнительного органа будем понимать резкое (в пределах одного такта управления) снижение его эффективности, то есть величины создаваемого момента. Причинами такого отказа могут быть, например, обрыв проводника в электрической схеме прибора, короткое замыкание, внезапное повышение сухого трения в опорах ротора и т. п. Модель отказа исполнительного органа можно представить в виде резкого изменения управления на k-м такте от номинального значения $\mathbf{u}_{k}^{\text{нрм}}$ до нового значения $\mathbf{\tilde{u}}_{ki}^{\text{норм}}$, соответствующего отказу:

$$\mathbf{\breve{u}}_{k}^{\text{HOPM}} = \mathbf{u}_{k}^{\text{HOPM}} + (1 - \mathbf{F}_{\text{HO}})(\mathbf{u} - \mathbf{u}_{k}^{\text{HOPM}}), \quad (3)$$

где **u** — *m*-мерный вектор смещения управления, а матрица

$$\mathbf{F}_{\text{HO}} = \mathbf{diag}\{[f_{\text{HO1}}, f_{\text{HO2}}, ..., f_{\text{HOp}}]\}.$$

В рамках модели (3) $f_{\text{ИОi}} = 0$ соответствует полному отказу *i*-го исполнительного органа, в результате чего величина создаваемого им управляющего момента $\mathbf{\tilde{u}}_{ki}^{\text{норм}}$ становится, начиная с k-го такта, равной *i*-му элементу нерегулируемого вектора смещения управления **u**. Аналогично $f_{\text{ИOi}} = 1$ означает, что *i*-й исполнительный орган функционирует нормально, поскольку $\mathbf{\tilde{u}}_{ki}^{\text{норм}} = \mathbf{u}_{ki}^{\text{норм}}$. Значения $0 < f_{\text{ИОi}} < 1$ соответствуют частичному отказу *i*-го исполнительного органа.

Описанные выше модели отказов командных приборов и исполнительных органов позволяют учитывать не только смещение (в общем случае переменное во времени), но и изменение масштабного коэффициента, что дает возможность моделировать большинство встречающихся на практике отказов.

Далее для упрощения выкладок будем полагать, что векторы смещения **u** и **y** являются нулевыми, поскольку при наличии смещений их всегда можно включить в состав вектора **d** возмущений, действующих на систему. Тогда, подставляя модели отказов (2) и (3) в модель разомкнутой системы (1), получим:

$$\breve{\mathbf{C}}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{HOPM}} : \begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{B}_{d}\mathbf{d}_{k} + \mathbf{B}_{u}\mathbf{F}_{\mathrm{HO}}\mathbf{u}_{k}, \\ \mathbf{r}_{k} = \mathbf{C}_{r}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{D}_{rd}\mathbf{d}_{k} + \mathbf{D}_{ru}\mathbf{F}_{\mathrm{HO}}\mathbf{u}_{k}, \\ \mathbf{y}_{k} = \mathbf{C}_{y}\mathbf{F}_{\mathrm{K\Pi}}\mathbf{x}_{k} + \mathbf{D}_{yd}\mathbf{F}_{\mathrm{K\Pi}}\mathbf{d}_{k}. \end{cases}$$
(4)

Примем также, что для любого сочетания отказов исполнительных органов система (4) остается стабилизируемой. Это означает, что при наличии таких отказов существует хотя бы одна комбинация управляющих моментов, обеспечивающая устойчивость замкнутой системы. Кроме того, будем полагать, что в случае, если вследствие отказов командных приборов состояние системы (4) оказывается недоступным для измерения, система, тем не менее, сохраняет способность к обнаружению изменений своего состояния.

Как уже отмечалось выше, в составе системы управления имеется подсистема СОЛО, которая обеспечивает формирование оценок отказов командных приборов $\widehat{F}_{K\Pi}$ и исполнительных органов \widehat{F}_{HO} , удовлетворяющих с учетом неопределенностей следующим условиям:

$$\begin{split} \widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{K}\Pi} \left(1 - \Delta_{\mathrm{K}\Pi}\right) &\leq \mathbf{F}_{\mathrm{K}\Pi} \leq \widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{K}\Pi} \left(1 + \Delta_{\mathrm{K}\Pi}\right), \\ 0 &\leq \Delta_{\mathrm{K}\Pi_{\mathrm{H}}} \leq \Delta_{\mathrm{K}\Pi} \leq \Delta_{\mathrm{K}\Pi_{\mathrm{B}}}, \\ \widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{HO}} \left(1 - \Delta_{\mathrm{HO}}\right) &\leq \mathbf{F}_{\mathrm{HO}} \leq \widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{HO}} \left(1 + \Delta_{\mathrm{HO}}\right), \\ 0 &\leq \Delta_{\mathrm{HOB}} \leq \Delta_{\mathrm{HO}} \leq \Delta_{\mathrm{HOB}}. \end{split}$$
(5)

Здесь диагональные матрицы $\Delta_{\kappa \Pi}$ и $\Delta_{\mu o}$ представляют интервалы неопределенности оценок отказов $\hat{\mathbf{F}}_{\kappa \Pi}$ и $\hat{\mathbf{F}}_{\mu o}$ соответственно, а индексами «н» и «в» обозначены соответственно нижняя и верхняя границы указанных интервалов. Такая форма отражает тот очевидный с точки зрения практики факт, что непосредственно после возникновения отказа его оценка является наименее достоверной (стремится к верхней границе интервала неопределенности), а затем, по мере поступления в СОЛО все большего объема информации, достоверность оценки отказа растет (стремится к нижней границе интервала неопределенности).

Модель регулятора **Р** системы управления также сформируем в виде модели линейной динамической системы, работающей в дискретном времени, полагая при этом, что отказы в регуляторе отсутствуют:

$$\mathbf{P}^{\text{HOPM}}:\begin{cases} \mathbf{x}_{\text{P}_{k+1}} = \mathbf{A}_{\text{P}}^{\text{HOPM}} \mathbf{x}_{\text{P}_{k}} + \mathbf{B}_{\text{P}}^{\text{HOPM}} \mathbf{y}_{k}, \\ \mathbf{u}_{k} = \mathbf{C}_{\text{P}}^{\text{HOPM}} \mathbf{x}_{\text{P}_{k}} + \mathbf{D}_{\text{P}}^{\text{HOPM}} \mathbf{y}_{k}. \end{cases}$$
(6)

Тогда модель замкнутой СУ при отсутствии отказов принимает с учетом принятых обозначений и допущений вид $\mathbf{C}_{P}^{\text{норм}} = \mathbf{Д}\mathbf{J}_{H}(\mathbf{C}_{P}^{\text{норм}}, \mathbf{P}^{\text{норм}})$, где $\mathbf{J}\mathbf{J}_{H}(*, *)$ — нижнее дробно-линейное преобразование. Цель алгоритма регулятора при отсутствии отказов будем трактовать как минимизацию нормы H_{∞} для замкнутой системы управления, то есть

$$\min_{\mathbf{P}^{\text{HOPM}}} \left\| \mathbf{C}_{3}^{\text{HOPM}} \right\|_{\infty}.$$
 (7)





При возникновении в системе отказов исполнительных органов и командных приборов ее модель становится неопределенной. Для интервалов неопределенности, заданных в форме (6), задача проектирования алгоритма регулятора СУ в условиях отказов может быть сформулирована следующим образом: для любых фиксированных матриц оценок отказов $\hat{\mathbf{F}}_{\text{KII}}$ и $\hat{\mathbf{F}}_{\text{И0}}$, удовлетворяющих условиям сохранения стабилизируемости и обнаружительной способности замкнутой системы, необходимо с учетом параметров неопределенности Δ_{KII} и $\Delta_{\text{И0}}$ спроектировать алгоритм регулятора, удовлетворяющий критерию

$$\min_{\boldsymbol{P}^{\mu p m}(\Delta_{K\Pi}, \Delta_{HO})} \sup_{\boldsymbol{\Delta}_{K\Pi}, \Lambda_{HO}} \left\| \mathcal{A} \mathcal{I}_{\mathbf{H}} (\tilde{\mathbf{C}}_{\mathbf{P}}^{hopm} (\Delta_{K\Pi}, \Delta_{HO}), \\ \tilde{\mathbf{P}}^{hopm} (\Delta_{V\Pi}, \Delta_{HO}) \right\| . \tag{8}$$

 $\mathbf{P}^{\text{норм}}(\Delta_{\text{КП}},\Delta_{\text{ИО}}))\|_{\infty}$. (8) Здесь диагональные матрицы $\Lambda_{\text{КП}} = (\mathbf{F}_{\text{КП}} - \widehat{\mathbf{F}}_{\text{КП}})/\widehat{\mathbf{F}}_{\text{КП}}\Delta_{\text{КП}}$ и $\Lambda_{\text{ИО}} = (\mathbf{F}_{\text{ИО}} - \widehat{\mathbf{F}}_{\text{ИО}})/\widehat{\mathbf{F}}_{\text{ИО}}\Delta_{\text{ИО}}$ представляют неопределенности системы управления, вносимую отказами командных приборов и исполнительных органов соответственно. В важном с практической точки зрения случае, когда интервалы неопределенности $\Delta_{\text{КП}}$ и $\Delta_{\text{ИО}}$ не зависят от времени, задача (8) может быть упрощена следующим образом: для любых фиксированных матриц оценок отказов $\widehat{\mathbf{F}}_{\text{КП}}$ и $\widehat{\mathbf{F}}_{\text{ИО}}$, удовлетворяющих условиям сохранения обнаружительной способности и стабилизируемости замкнутой системы, необходимо спроектировать алгоритм регулятора, удовлетворяющий критерию

$$\min_{\boldsymbol{P}^{\text{hopm}}} \sup_{\boldsymbol{\Lambda}_{K\Pi},\boldsymbol{\Lambda}_{HO}} \left\| \boldsymbol{\mathcal{I}} \boldsymbol{\mathcal{I}}_{\boldsymbol{H}}^{}(\boldsymbol{\breve{C}}_{\boldsymbol{P}}^{\text{hopm}},\boldsymbol{\breve{P}}^{\text{hopm}}) \right\|_{\!\!\infty}$$

С учетом изложенного алгоритм реконфигурации СУ, структурная схема которой приведена на рис. 1, можно определить следующим образом.

1. Для предварительно выбранного набора фиксированных матриц оценок отказов командных приборов $\mathbf{\hat{F}}_{K\Pi}$ и исполнительных органов $\mathbf{\hat{F}}_{ио}$ соответственно, удовлетворяющих условиям сохранения обнаружительной способности и стабилизируемости замкнутой системы, синтезировать набор алгоритмов регулятора, удовлетворяющих критерию (8).

2. После наступления одной из комбинаций отказов командных приборов и исполнительных органов выбрать подходящий алгоритм регулятора по п. 1 и, при необходимости, масштабировать его, приведя к фактической степени отказа командных приборов и исполнительных органов.

3. Параметризировать масштабированный алгоритм регулятора по п. 2 с использованием текущих значений интервалов неопределенности для оценок отказов $\Delta_{\rm K\Pi}$ и $\Delta_{\rm HO}$.

4. Реконфигурировать систему управления, используя в регуляторе полученный алгоритм.

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ОТКАЗАХ

Введем в состав системы с отказами (4) параметрический регулятор вида

$$\mathbf{P}(\Delta_{\mathrm{K\Pi}}, \Delta_{\mathrm{HO}}) : \begin{cases} \mathbf{x}_{\mathrm{P}k+1} = \mathbf{A}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{\Pi}} \mathbf{x}_{\mathrm{P}k} + \mathbf{B}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{\Pi}} \mathbf{y}_{k}, \\ \mathbf{u}_{k} = \mathbf{C}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{\Pi}} \mathbf{x}_{\mathrm{P}k} + \mathbf{D}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{\Pi}} \mathbf{y}_{k}. \end{cases}$$
(9)

где верхний индекс «П» обозначает параметрическую зависимость матриц \mathbf{A}_{P}^{Π} , \mathbf{B}_{P}^{Π} , \mathbf{C}_{P}^{Π} и \mathbf{D}_{P}^{Π} от интервалов неопределенности $\Delta_{K\Pi}$ и Δ_{u0} . Перепишем уравнения системы с отказами в векторно-матричной форме следующим образом:

$$\begin{split} \tilde{\mathbf{C}}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{HOPM}}(\Delta_{\mathrm{K}\Pi}, \Delta_{\mathrm{HO}}) &: \begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} \\ \mathbf{r}_{\mathrm{HO},k} \\ \mathbf{r}_{\mathrm{K}\Pi,k} \\ \mathbf{r}_{k} \\ \mathbf{y}_{k} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_{1} & \mathbf{B}_{2} \\ \mathbf{C}_{1} & \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{C}_{2} & \mathbf{D}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k} \\ \Delta_{\mathrm{HO}} \mathbf{r}_{\mathrm{HO},k} \\ \Delta_{\mathrm{K}\Pi} \mathbf{r}_{\mathrm{K}\Pi,k} \\ \mathbf{d}_{k} \\ \mathbf{u}_{k} \end{bmatrix}, \end{split}$$
(10)

где

$$\mathbf{B}_{1}(\Delta_{\mathrm{HO}}) = [\mathbf{B}_{u} \mathbf{F}_{\mathrm{HO}} \Delta_{\mathrm{HO}} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{B}_{d}],$$

$$\mathbf{B}_{2} = \mathbf{B}_{u} \mathbf{\widehat{F}}_{\mathrm{HO}},$$

$$\mathbf{C}_{1}(\Delta_{\mathrm{K\Pi}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Delta_{\mathrm{K\Pi}} \mathbf{\widehat{F}}_{\mathrm{K\Pi}} \mathbf{C}_{y} \\ \mathbf{C}_{r} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{2} = \mathbf{\widehat{F}}_{\mathrm{K\Pi}} \mathbf{C}_{y},$$

$$\mathbf{D}_{11}(\Delta_{\mathrm{K\Pi}}, \Delta_{\mathrm{HO}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Delta_{\mathrm{K\Pi}} \mathbf{\widehat{F}}_{\mathrm{K\Pi}} \mathbf{D}_{yd} \\ \mathbf{D}_{zu} \mathbf{\widehat{F}}_{\mathrm{HO}} \Delta_{\mathrm{HO}} & \mathbf{0} \quad \mathbf{D}_{zd} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_{12} = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{D}_{zu} \mathbf{\widehat{F}}_{\mathrm{HO}} \end{bmatrix},$$

Теперь модель системы (10) можно разделить на две части, выделив составляющую, зависящую только от известных интервалов неопределенности Δ_{KII} и $\Delta_{\text{ИО}}$:

$$\begin{split} \breve{\mathbf{C}}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{hopm}}(\Lambda_{\mathrm{K}\Pi},\Lambda_{\mathrm{HO}}) = \\ = \mathcal{A} \mathcal{I}_{\mathrm{B}} \Biggl(\breve{\mathbf{C}}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{hopm}}(\Delta_{\mathrm{K}\Pi},\Delta_{\mathrm{HO}}), \begin{bmatrix} \Lambda_{\mathrm{K}\Pi} & \\ & \Lambda_{\mathrm{HO}} \end{bmatrix} \Biggr), \end{split}$$

где ДЛ_в(*, *) — верхнее дробно-линейное преобразование. С учетом этого модель замкнутой СУ при наличии отказов командных приборов и исполнительных органов принимает следующий вид:

$$\begin{split} \widetilde{\mathbf{C}}_{3}^{\text{hopm}} = \mathcal{A} \mathcal{I}_{\text{H}} \Bigg(\mathcal{I} \mathcal{I}_{\text{B}} \Bigg(\widetilde{\mathbf{C}}_{\text{P}}^{\text{hopm}}(\Delta_{\text{K}\Pi}, \Delta_{\text{HO}}), \begin{bmatrix} \Lambda_{\text{K}\Pi} & \\ & \Lambda_{\text{HO}} \end{bmatrix} \Bigg), \\ \mathbf{P}(\Delta_{\text{K}\Pi}, \Delta_{\text{HO}}) \Bigg). \end{split}$$

Известно [4], что для любой заданной положительной величины б

$$\sup_{\Lambda_{\mathrm{K}\Pi},\Lambda_{\mathrm{HO}}} \left\| \mathcal{I}_{\mathrm{H}} \mathcal{I}_{\mathrm{P}} (\check{\mathbf{C}}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{HOPM}}(\Delta_{\mathrm{K}\Pi},\Delta_{\mathrm{HO}}), \mathbf{P}(\Delta_{\mathrm{K}\Pi},\Delta_{\mathrm{HO}})) \right\|_{\infty} \leq \delta^{-1}$$

при условии, что

$$\sup_{\Lambda_{K\Pi},\Lambda_{\mu_{0}}} \left\| \mathcal{I}_{\Pi} \mathcal{I}_{H}(\breve{\mathbf{C}}_{P\delta}^{_{HPM}}(\Delta_{K\Pi},\Delta_{\mu_{0}})) \right\|_{\infty} \leq 1, \qquad (11)$$

где модель $\breve{C}_{P\delta}^{порм}$ получена из модели (10) путем умножения опорного вектора \mathbf{r}_k на *k*-м такте управления в ней на величину δ . Тогда задача (8) сводится к максимизации величины δ при выполнении ограничения (12). Зададим для определенности $\delta = 1$, т. е. $\breve{C}_{P\delta}^{порм} = \breve{C}_{P}^{порм}$. Теперь задача синтеза алгоритма регулятора (8) может быть решена с использованием любого алгоритма двоичного поиска.

РЕКОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ОТКАЗАХ КОМАНДНЫХ ПРИБОРОВ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

Как было показано выше, алгоритм работы СРСУ базируется на использовании множества \mathbb{P} :

$$\mathbb{P} = \{ \mathbf{P}_{1} (\Delta_{\mathrm{K}\Pi}, \Delta_{\mathrm{H}O}), ..., \mathbf{P}_{N} (\Delta_{\mathrm{K}\Pi}, \Delta_{\mathrm{H}O}) \}, \quad (12)$$

предварительно синтезированных параметрических алгоритмов регулятора СУ, учитывающих различные возможные отказы командных приборов и исполнительных органов. Методика синтеза алгоритма регулятора для заданной модели отказов была рассмотрена в предыдущем разделе. В результате СРСУ задействует в регуляторе масштабированную версию параметрического алгоритма из множества \mathbb{P} .

Выделим далее из множеств возможных отказов командных приборов $\mathbf{F}_{\mathrm{K\Pi}}$ и исполнительных органов $\mathbf{F}_{\text{ИО}}$ СУ подмножества $\mathbf{F}_{\text{КП}}^{\text{T}}$ и $\mathbf{F}_{\text{ИО}}^{\text{T}}$ соответственно, представляющие все возможные сочетания их полных ($f_i = 0$) отказов, при которых система еще остается способной обнаруживать изменения своего состояния и стабилизируемой. Тогда можно утверждать, что каждый параметрический алгоритм регулятора СУ из множества \mathbb{P} соответствует некоторым заданным $\widehat{\mathbf{F}}_{K\Pi i} \in \mathbf{F}_{K\Pi}^{T}$ и $\widehat{\mathbf{F}}_{NOi} \in \mathbf{F}_{NO}^{T}$ соответственно. Для того чтобы можно было парировать любую возможную комбинацию отказов командных приборов и исполнительных органов СУ, потребуем, чтобы матрицы $\widehat{\mathbf{F}}_{\mathbf{K}\Pi i}$ и $\widehat{\mathbf{F}}_{\mathbf{N}0i}$ (*i* = 1, 2, ..., *N*) удовлетворяли следующим условиям: $\widehat{\mathbf{F}}_{\mathbf{K}\Pi i} = \mathbf{F}_{\mathbf{K}\Pi} \mathbf{F}_{\mathbf{K}\Pi}^+$, $\widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{HO}i} = \mathbf{F}_{\mathrm{HO}} \mathbf{F}_{\mathrm{HO}}^+$ rge $\mathbf{M}^+ = \mathbf{M}^{\mathrm{T}} (\mathbf{M} \mathbf{M}^{\mathrm{T}})^{-1} - \mathrm{Mat}^{-1}$ рица, псевдообратная матрице М, и для любых $\mathbf{\tilde{F}}_{\mathrm{K\Pi}} \in \mathbf{F}_{\mathrm{K\Pi}}^{\mathrm{T}}$ и $\mathbf{\tilde{F}}_{\mathrm{HO}} \in \mathbf{F}_{\mathrm{HO}}^{\mathrm{T}}$ существует хотя бы одно значение индекса *i*, для которого $\mathbf{\tilde{F}}_{\mathrm{K\Pi}} =$ $= \widehat{\mathbf{F}}_{\mathbf{K}\Pi i} \ \mathbf{H} \ \widetilde{\mathbf{F}}_{\mathbf{H}\mathbf{O}} \ \widehat{\mathbf{F}}_{\mathbf{H}\mathbf{O}i} = \widehat{\mathbf{F}}_{\mathbf{H}\mathbf{O}i}.$

Это единственное ограничение, налагаемое на выбор алгоритма регулятора. В самом деле, поскольку рассматриваемая система управления остается способной обнаруживать изменения своего состояния с помощью каждого командного прибора и стабилизируемой с помощью каждого исполнительного органа, то минимальное значение мощности множества Рбудет определяться произведением количества командных приборов и исполнительных органов в составе СУ. Иными словами, для каждого сочетания «командный прибор — исполнительный орган» необходим только один параметрический алгоритм регулятора.

Обозначим символами $\widehat{\mathbf{F}}_{K\Pi}^{p}$ и $\widehat{\mathbf{F}}_{HO}^{p}$ невырожденные матрицы соответствующих размерностей, удовлетворяющие условиям

$$\widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{K}\Pi} = \widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{K}\Pi}^{p} \widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{K}\Pi i}, \ \widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{H}O} = \widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{H}O}^{p} \widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{H}Oi}.$$
(13)

Обозначим также

$$i_{opt} \in \{ \arg \max_{i} \{ \delta_{i} : \widehat{\mathbf{F}}_{K\Pi}^{p} \widehat{\mathbf{F}}_{K\Pi i} = \widehat{\mathbf{F}}_{K\Pi i},$$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

$$\widehat{\mathbf{F}}_{\text{NO}}^{p} \widehat{\mathbf{F}}_{\text{NO}i} = \widehat{\mathbf{F}}_{\text{NO}i} \} \}.$$

Тогда алгоритм регулятора

 $\mathbf{P}^*(\Delta_{\mathrm{K\Pi}}, \Delta_{\mathrm{HO}}) = (\widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{K\Pi}}^{p})^{-1} \mathbf{P}_{iopt}(\Delta_{\mathrm{K\Pi}}, \Delta_{\mathrm{HO}}) (\widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{HO}}^{p})^{-1}$ (14) обеспечивает выполнение условия

$$\sup_{\mathbf{K}_{\mathrm{K}\Pi}, \Delta_{\mathrm{HO}}} \left\| \mathcal{A} \mathcal{I}_{\mathrm{H}}(\mathbf{\breve{C}}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{hopm}}(\mathbf{\widehat{F}}_{\mathrm{K}\Pi}, \mathbf{\widehat{F}}_{\mathrm{HO}}, \Delta_{\mathrm{K}\Pi}, \Delta_{\mathrm{HO}}), \right.$$

$$\mathbf{P}^*(\Delta_{\mathrm{K}\Pi}, \Delta_{\mathrm{HO}})) \Big\|_{\infty} \leq \frac{1}{\delta_{iopt}}.$$

В самом деле, для любого *i* = 1, 2,..., *N*

$$\mathcal{J}_{\mathbf{H}}(\mathbf{\breve{C}}_{\mathbf{P}}^{\text{hopm}}(\mathbf{\widehat{F}}_{\mathbf{K}\Pi},\mathbf{\widehat{F}}_{\mathbf{M}O},\Delta_{\mathbf{K}\Pi},\Delta_{\mathbf{M}O}),$$
$$(\mathbf{\widehat{F}}_{\mathbf{K}\Pi}^{p})^{-1}\mathbf{P}_{i}(\Delta_{\mathbf{K}\Pi},\Delta_{\mathbf{M}O})(\mathbf{\widehat{F}}_{\mathbf{M}O}^{p})^{-1}) =$$

$$= \mathbf{\Pi}_{\mathrm{H}}(\mathbf{\widetilde{C}}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{hopm}}(\mathbf{\widehat{F}}_{\mathrm{K}\Pi}^{p},\mathbf{\widehat{F}}_{\mathrm{MO}}^{p},\Delta_{\mathrm{K}\Pi},\Delta_{\mathrm{HO}}),\mathbf{P}_{i}(\Delta_{\mathrm{K}\Pi},\Delta_{\mathrm{HO}})).$$

Поскольку алгоритм регулятора СУ $\mathbf{P}_i(\Delta_{\mathrm{KII}}, \Delta_{\mathrm{HO}})$ был спроектирован для случая полного отказа командных приборов и исполнительных органов, определяемого матрицами $\hat{\mathbf{F}}_{\mathrm{KII}}$ и $\hat{\mathbf{F}}_{\mathrm{HO}}$, то

$$\mathbf{P}_{i}(\Delta_{\mathrm{K}\Pi},\Delta_{\mathrm{H}O})=\mathbf{F}_{\mathrm{K}\Pi i}\mathbf{P}_{i}(\Delta_{\mathrm{K}\Pi},\Delta_{\mathrm{H}O})\mathbf{F}_{\mathrm{H}Oi},$$

и следовательно,

$$\begin{split} \mathcal{I}_{\mathcal{H}_{H}}(\breve{\mathbf{C}}_{P}^{\text{hopm}}(\widehat{\mathbf{F}}_{K\Pi}^{p}, \widehat{\mathbf{F}}_{MO}^{p}, \Delta_{K\Pi}, \Delta_{HO}), \mathbf{P}_{i}(\Delta_{K\Pi}, \Delta_{HO})) &= \\ &= \mathcal{I}_{\mathcal{H}_{H}}(\breve{\mathbf{C}}_{P}^{\text{hopm}}(\widehat{\mathbf{F}}_{K\Pi}^{p} \widehat{\mathbf{F}}_{K\Pi i}, \widehat{\mathbf{F}}_{HO}^{p} \widehat{\mathbf{F}}_{HOi}, \\ & \Delta_{K\Pi}, \Delta_{HO}), \mathbf{P}_{i}(\Delta_{K\Pi}, \Delta_{HO})). \end{split}$$

Таким образом, для любого *i*, для которого выполняются условия $\hat{\mathbf{F}}_{K\Pi}^{\rho} \hat{\mathbf{F}}_{K\Pi i} = \hat{\mathbf{F}}_{K\Pi i} \rtimes \hat{\mathbf{F}}_{HO}^{\rho} \hat{\mathbf{F}}_{HOi} =$ $= \hat{\mathbf{F}}_{HOi}$, алгоритм регулятора СУ $\mathbf{P}_{i}(\Delta_{K\Pi}, \Delta_{HO})$ будет удовлетворять критерию

$$\begin{split} \sup_{\substack{\Lambda_{\mathrm{K}\Pi},\Lambda_{\mathrm{HO}}\\\Delta_{\mathrm{K}\Pi},\Delta_{\mathrm{HO}}}} \left\| \mathcal{A}_{\mathrm{\Pi}}(\breve{\mathbf{C}}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{HOPM}}(\widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{K}\Pi},\widehat{\mathbf{F}}_{\mathrm{HO}},\Delta_{\mathrm{K}\Pi},\Delta_{\mathrm{HO}}), \right. \\ \mathbf{P}^{*}(\Delta_{\mathrm{K}\Pi},\Delta_{\mathrm{HO}})) \right\|_{\infty} \leq \frac{1}{\delta_{i}}. \end{split}$$

Для подтверждения эффективности предложенных алгоритмов было проведено имитационное моделирование работы СУ космического аппарата наблюдения Земли в условиях отказов командных приборов и исполнительных органов и неопределенностей в работе СОЛО. Моделировался режим программного разворота КА на 35 градусов по углу крена, используемый для наведения оптической оси целевой аппаратуры на объект съемки. Для моделирования использова-



Рис. 2. Параметры углового движения КА при развороте по углу крена



Рис. 3. Возмущающий момент в канале крена

лась модель одноканальной СУ, разработанная в работе [1]. Компоненты модели системы (4) на *k*-м такте управления были определены следующим образом. Вектор управления **u** определял момент $\mathbf{M}_{\varphi U}$, задаваемый для исполнения двигателю-маховику в канале крена (m = 1), командными приборами измерялись угол крена КА φ и соответствующая абсолютная угловая скорость ω_{χ} (p = 2), в качестве опорных векторов системе задавалось программные значения угла крена КА φ_{np} и угловой скорости $\omega_{\chi np}$ (n = 2), вектор возмущений определял возмущающий момент в канале крена $\mathbf{M}_{\varphi B}$ (d = 1).

Для моделирования было предварительно разработано два алгоритма регулятора — первый соответствовал отсутствию отказов в системе, а второй — полному отказу измерителя угловой



Рис. 4. Результаты моделирования работы СУ в отсутствие отказов (сплошные кривые $1 - \varphi_{np}, \omega_{\chi_{np}}$; штриховые кривые $2 - \varphi, \omega_{\chi}$)

скорости в канале крена ω_{χ} . Полный отказ измерителя угла крена φ не рассматривался, поскольку в этом случае система утрачивает способность обнаруживать изменения своего состояния. Для сравнения были взяты реальные данные разворота КА «Сич-2» по углу крена на тот же угол, полученные из телеметрической информации (рис. 2). Измеренные значения угла крена использовались при моделировании в качестве φ_{np} . Возмущающий момент в канале крена $\mathbf{M}_{\varphi B}$ моделировался ступенчатой функцией, представленной на рис. 3.

На рис. 4 представлены результаты моделирования работы СУ при отсутствии отказов. Видно, что спроектированный алгоритм регулятора обеспечивает хорошее качество отслеживания опорного вектора, несмотря на переменный возмущающий момент.



Рис. 5. Модель неопределенности оценок состояния командных приборов ($\Delta_{\text{КП}}$) и исполнительных органов (Δ_{μ_0}) СУ

Затем было проведено моделирование работы СУ при возникновении отказов командных приборов и исполнительных органов. При моделировании отказов было принято, что в момент возникновения отказа неопределенность его оценки скачком возрастает с 10 до 50 %, а затем в течение трех секунд постепенно снижается до 10 % (рис. 5). Сценарий моделирования отказов был задан следующим образом:

— в момент t = 9 с происходит частичный отказ измерителя угла крена $f_{K\Pi 1} = 0.5$;

— в момент t = 21 с происходит частичный отказ измерителя угловой скорости в канале крена $f_{\text{KH2}} = 0.7;$

— в момент t = 40 с происходит частичный отказ двигателя-маховика в канале крена $f_{\rm HO1} = 0.5$;

— наконец, в момент t = 48 с происходит полный отказ измерителя угловой скорости в канале крена $f_{\rm KH2} = 0$.

Все отказы сохранялись в течение всего сеанса моделирования, поэтому после возникновения четвертого отказа на 48-й секунде все командные приборы и исполнительные органы СУ работали в нештатных режимах.

Результаты моделирования работы СУ при возникновении отказов командных приборов и исполнительных органов представлены на рис. 6. Из графиков видно, что после возникновения каждого отказа качество управления ухудшалось, а затем постепенно улучшалось по



Рис. 6. Результаты моделирования работы СУ при возникновении отказов (сплошные кривые $1 - \varphi_{np}$, $\omega_{\chi_{np}}$; штриховые кривые $2 - \varphi, \omega_{\chi}$)

мере уменьшения неопределённости в оценке отказа. После третьего отказа вдвое снизилась эффективность управления ориентацией КА в канале крена, поэтому общее время разворота КА увеличилось с 65 до 90 с, однако на участке завершения разворота, несмотря на полный отказ измерителя угловой скорости в канале крена, стабилизация КА была обеспечена с приемлемым качеством.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен метод реконфигурации СУ космического аппарата в условиях отказов командных приборов и исполнительных органов системы. Предполагалось, что оценки отказов формируются с некоторой неопределенностью, которая постепенно уменьшается по мере накопления информации о них. Предложенный метод предусматривает предварительное проектирование нескольких алгоритмов регулятора СУ, в которых настраиваемыми параметрами являются величины интервалов неопределенности. После реконфигурации задействуется масштабированная по уровню отказа версия одного из ранее спроектированных алгоритмов. Работоспособность предложенного метода проиллюстрирована результатами моделирования маневра переориентации КА по углу крена с использованием реальной телеметрической информации.

- 1. Меланченко А. Г., Цисарж В. В., Цуканов А. Ф. Оптимизация параметров наблюдающего устройства с позиционной коррекцией в каналах управления космического аппарата // Гіротехнології, навігація й керування рухом: Тези доп. 1-й Нац. наук.-техн. конф. — К., 1997. — С. 25—26.
- Barron R. L. Alternative strategies for reconfigurable flight control // Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conf. — 1984. — P. 1313—1320.
- Massoumnia M.-A., Verghese G. C., Willsky A. S. Failure detection and identification // IEEE Trans. Automat. Contr. – 1986. – AC-31, N 9. – P. 839–846.
- Tao G., Chen S., Joshi S. M. An adaptive actuator failure compensation controller using output feedback // IEEE Trans. Automat. Contr. – 2002. – AC-47, N 3. – P. 506– 511.

Стаття надійшла до редакції 20.06.13

А. Г. Меланченко

РЕКОНФІГУРАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТА ПРИ ВИНИКНЕННІ ВІДМОВ

Розглядається задача реконфігурації системи керування космічного апарата при виникненні відмов командних приладів і виконавчих органів. Вважається, що виявлення і локалізація відмов здійснюється окремою підсистемою системи керування у масштабі часу, близькому до реального. Моделювання затримок та інших невизначеностей в роботі підсистеми виявлення і локалізації відмов (СВЛВ) здійснюється на основі припущення, що реальні відмови лежать всередині деяких інтервалів, що охоплюють повідомлення про них, сформовані СВЛВ.

A. G. Melanchenko

SPACECRAFT CONTROL SYSTEM'S RECONFIGURATION IN THE PRESENCE OF FAILURES

We consider the problem of spacecraft control system's (CS) reconfiguration in cases of sensors' and actuators' failures. It is suggested that near-real time failure detection and localization (FDL) are provided by some control system's subsystem. The simulation of delays and other uncertainties in the FDL subsystem's operation is performed based on the assumption that the real failures lie within some intervals around their estimates generated by FDL subsystem. The paper may be of interest for spacecraft's designers. УДК 681.785.555

В. В. Донец

Корпорація «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ СОЗДАНИЯ БОРТОВОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА AVIRIS ПЕРВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Анализируются особенности конструкции и характеристики гиперспектрометра авиационного базирования AVIRIS первого поколения для спектрометрического исследования земной поверхности и подспутниковой валидации спектрометрических данных, физические и технологические аспекты его создания и использования. Достижения передовых технологий, которые были апробированы в нем, были реализованы в космических гиперспектрометрах — сначала в SISEX (1990) и HIRIS (1994), а потом в гражданском HYPERION, военном ARTEMIS, а также в компактных приборах M3 и CRISM для исследования поверхности Луны и Марса и в авиационном гиперспектрометре AVIRIS нового поколения AVIRISng

введение

Спектрометрия изображения (Imaging Spectrometry) [2, 6], которую называют также «гиперспектрометрия», определяется как одновременное получение изображений в большом количестве смежных спектральных диапазонов (полос) с формированием так называемого информационного «гиперспектрального куба».

Спектрометрия изображения представляет большой интерес в качестве нового подхода к дистанционному зондированию Земли. За последние три десятилетия в мировой практике аэрокосмического мониторинга земной поверхности наблюдается все более активная разработка и внедрение методов гиперспектрометрии изображений и средств для гиперспектрольной съемки [6] с регистрацией количественных параметров изображения с помощью бортовых гиперспектрометров («видеоспектрометров»).

Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА, США) имеет специальные самолеты и системы датчиков, в том числе и гиперспектральных, предназначенные для валидации (заверки) данных исследований путем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они обеспечивают многоуровневую исследовательскую платформу для НАСА — сбор данных об атмосферных, наземных и океанических процессах [5, 16, 17].

Авиационные гиперспектральные системы имеются также и в других высокоразвитых странах (Канада, Финляндия, Австралия, Китай, Россия и др.) [1—3].

Наша работа посвящена обзору основных технических характеристик уникальной гиперспектральной оптико-электронной аппаратуры с некоторыми ее особенностями конструкции на примере уникального авиационного гиперспектрометра AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer). Ранее в обзоре [2] мы рассматривали гиперспектрометр AIS.

ГИПЕРСПЕКТРОМЕТР AVIRIS

Авиационный гиперспектрометр AVIRIS с внутренней калибровкой, разработанный в Naval Research Laboratory (NRL) Калифорнийского технологического института (HACA), оказался наиболее удачным проектом. Он является вторым после AIS [2, 8] в серии бортовых гиперспектрометров изображения высокого класса.

AVIRIS был задуман в качестве бортовой системы для регулярного и оперативного сбора спектральных изображений поверхности Земли.



Рис. 1. Блок-схема гиперспектрального сканера AVIRIS [5]: 1 — блок входной оптики, 2 — составные спектрометры, 3 — ССД-приемники, 4 — бортовой калибратор, 5 — шина управления детекторами, 6 — предварительные усилители, 7 — центральний процессор, 8 — устройство коррекции смещения, 9 — аналого-цифровой преобразователь, 10 — устройство записи и хранения информации, 11 — буфер данных



Рис. 2. Сенсорный блок AVIRIS первого поколения [7, 11, 13, 14]

Блок-схема гиперспектрального сканера AVIRIS первого поколения [5] на основе сенсорного блока с системами ввода излучения, его спектрометрической регистрации, обработки и хранения информации приведена на рис. 1. Внешний вид гиперспектрального сканера AVIRIS первого поколения [7, 11, 13, 14] с сенсорным блоком, системами обеспечения, обработки и хранения информации приведена на рис. 2 и 3. AVIRIS как воздушный гиперспектрометр был впервые поднят в воздух (на самолете NASA/ Lockheed U-2) в 1986 г. Первые научные данные были получены уже летом 1987 г., а в полном объеме этот приборный комплекс эксплуатируется с 1989 г. по сей день.

В июне-июле 1991 г. гиперспектральные исследования были выполнены с помощью прибора AVIRIS также на многих европейских полигонах.

Вес прибора AVIRIS составляет 340 кг [9]. Носителями, так называемыми платформами, гиперспектрометра AVIRIS являются четыре модели самолетов:

 турбовинтовые Twin Otter Platform (рис. 4, *a*), работающие на высоте 4 км со скоростью около 130 км/ч, и Douglas DC-8;

— турбореактивные New Capability (рис. 4, δ), работающие на средних высотах от 5 до 8 км;

— высотные турбореактивные ER-2 фирмы Lockheed, S-модель известного высотного самолета-разведчика U-2 (рис. 4, *в*), работающие на больших высотах около 20 км со скоростью 730 км/ч.

Все самолеты оснащены современными навигационными системами, которые могут непрерывно записывать кроме основных данных, GPS-местонахожение и данные платформы.

AVIRIS считается первым рабочим гиперспектральным инструментом. Прибор имеет внутреннюю спектральную и радиометрическую калибровку [16, 17]. AVIRIS является уникальным оптическим сенсором (датчиком), обеспечивающим получения достоверной гиперспектральной информации в цифровом формате об отраженной и рассеянной солнечной энергии с поверхности Земли и атмосферы в 224 смежных спектральных диапазонах от 400 до 2500 нм [16, 17] с высоким пространственным (< 20×20 м) и спектральным разрешением ($\Delta \lambda \le 10$ нм). Эти результаты крайне нужны как для научных исследований поверхности земли, водной среды, атмосферы и климата, так и в разведывательных целях.

Спектрометр AVIRIS до сих пор является приборным комплексом мирового класса. Он в течение 25 лет выдержал ряд модификаций, а с 2011 г. постепенно земеняется на современный



Рис. 3. Сенсорный блок AVIRIS: *а* — перед установкой в самолет [10], *б* — установленный в самолет (вид снизу)[12]



Рис. 4. Носители гиперспектрометра AVIRIS: a — самолет Twin Otter (рабочая высота полета 4 км), δ — самолет New Capability (рабочая высота полета от 5 до 8 км), e — самолеты ER-2 (рабочая высота полета до 20 км)

гиперспектрометр нового поколения (новой генерации) AVIRISng.

Принцип действия гиперспектрального сенсора AVIRIS. Принцип действия бортового гиперспектрометра AVIRIS первого поколения (рис. 5) базируется на конфигурации формирования и считывания аэрокосмоизображений — «whiskbroom» [1, 13].

Технология «whiskbroom» [1] (венчиком метлы — по дорожке, поперек трека сканера) в гиперспектральном исполнении базируется на использовании гиперспектрометра с входной зеркальной оптической системой со сканером, зеркало которого осуществляет механическое сканирование в пределах угла поля зрения (для AVIRIS — 30°, слева направо) анализируемого участка поверхности Земли поперек направления движения (траектории) носителя сканера и отражает каждый элемент участка через диспергирующий узел на линейный многоэлементный сенсор, который в гиперспектрометре регистрирует один элемент (пиксел) разложенного в спектр изображения участка одновременно всеми элементами сенсора. Мгновенное поле зрения (IFOV) прибора AVIRIS составляет $\beta \sim 1$ мрад, при этом частота сканирования составляет 12 Гц [14, 15].

Состав бортового авиационного гиперспектрального сенсора AVIRIS первого поколения. Состав бортового авиационного гиперспектрального сенсора AVIRIS первого поколения показан на блок-схеме (рис. 1) [5].

Оптическая схема гиперспектрометра AVIRIS со входной зеркальной оптической системой и оптическая схема отдельного спектрометра приведены на рис. 6. Для удобства на рис. 6—9 используется единая нумерация составных элементов. Этот уникальный бортовой гиперспектральный сенсор AVIRIS первого поколения имеет единую входную зеркальную оптическую систему (рис. 6, *a*) и оптически сопряженные с



Рис. 5. Принцип действия гиперспектрального сканера AVIRIS типа «whiskbroom»: a — направление сканирования, δ — порядок пошагового сканирования



Рис. 6. Оптические схемы: a - гиперспектрометра AVIRIS, $\delta -$ отдельного спектрометра [13]

ней четыре полихроматора (спектрометра) A, B, C, D. Все спектрометры выполнены по схеме Литрова с внеосевым телескопом Шмидта (рис. $6, \delta$). Расчетный спектральный диапазон гиперспектрометра AVIRIS (от 0.4 до 2.4 мкм) был разделен на четыре части [7]. Такое техническое решение позволило использовать спектрометры A, B, C, D с номинальными параметрами в спектральных диапазонах 400—750, 650—1250, 1200— 1820 и 1780—2400 нм соответственно совместно с индивидуальными оптическими волокнами для покрытия широкого рабочего спектрального диапазона от 360 до 2500 нм с обеспечением допустимого соотношения «сигнал/шум» по всей области спектра. Это разделение было необходимо для поддержания дифракционной эффективности решетки в заданных спектральных поддиапазонах [13].

Входная оптическая система (рис. 6, *a*) предназначена для ввода излучения в каждый из четырех полихроматоров (спектрометров) A, B, C и D. Oна состоит из составного входного теле-

скопического объектива на основе зеркального параболического зеркала 1, зеркального оптикомеханического сканатора 2, плоских поворотных зеркал 3-6 и эллиптического зеркального объектива 7, фокусирующего вошедшее от исследуемой сцены земной поверхности излучение на входные торцы четырех оптических волокон видимого (11–13) и инфракрасного (14) диапазонов. Полихроматоры A, B, C и D имеют асферические дифракционные решетки 8, асферические коллимирующие зеркала 9 и плоские охлаждаемые жидким азотом линейные многоэлементные сенсоры 10 (10A, 10B, 10C и 10D). AVIRIS имеет также внутренний калибратор для калибровки измерительного прибора на борту (см. рис. 9). При этом фокус параболического зеркала 1 совмещен с фокусом эллиптического зеркального объектива 7, второй фокус которого совпадает с плоскостью входных граней четырех оптических волокон 11-14.

Использование оптических волокон 11-14 в гиперспектрометре AVIRIS с составными спектрометрами A, B, C и D имеет важное значение, поскольку позволяет выполнить независимое использование входной оптики и отдельных спектрометров в компактной упаковке, необходимых для самолетного варианта. Оптические волокона 11, 12 из кварцевого стекла с числовой апертурой 0.55 используются для работы в спектральном диапазоне от 360 до 1300 нм. А оптические стекловолокна 13, 14 из фторида циркония с оболочкой из фторида бериллия с числовой апертурой 0.55 используются для работы в спектральном диапазоне с 1300 до 2500 нм.

Эти уникальные стекловолокна из фторида циркония, разработанные специально для AVIRIS, были первыми в своем роде. Следует отметить, что волокна из фторида циркония оказались менее надежными, чем из кварца. Тем не менее, первоначальные трудности в дальнейшем были преодолены.

Плоские зеркала 3—6 имеют защищенное серебряное покрытие, а параболическое (1) и эллиптическое (7) зеркала имеют алюминиевое покрытие. Этим обеспечивается высокая отражательная способность AVIRIS в широком рабочем спектральном диапазоне.

Эллиптическое зеркало 7 используется для обеспечения мгновенного поля зрения при согласовании выхода блока входной оптики с оптическими волокнами, имеющими числовую апертуру 0.45.

Свет от входного телескопа, выполненного на основе параболического зеркала 1, сфокусированный эллиптическим зеркалом 7 (один из фокусов которого совпадает с фокусом параболического зеркала 1) на объединенные входные торцы каждого из четырех оптических волокон 11-14, поступает на входы различных спектрометров A, B, C, D. Этим обеспечивается возможность одновременного измерения интенсивностей всех спектральних составляющих светового потока в большом диапазоне длин волн при максимальной эффективности каждой из дифракционных решеток 8 и индивидуальных линейчатых фотоприемников 10.

Так, в спектрометре А используется линейчатый массив кремниевых детекторов 10 из 32 элементов 200 × 200 мкм. Этот детектор, имеющий чувствительность и в синей области спектра, работает при температуре 77 К. Температура регулируется с помощью выходного клапана, прикрепленного к сосуду Дьюара с жидким азотом. В остальных спектрометрах используются линейчатые массивы детекторов 10 из арсенид галлия-индия и антимонида индия по 64 элементов каждый (таблица). Каждый из этих спектрометров и массивы их детекторов 10 оптимизированы для соответствующего спектрального диапазона.

После выходного торца каждого из оптических волокон в индивидуальном спектрометре (A, B, C или D) установлена своя входная шель, расположенная в фокусе индивидуального асферического зеркала 9 (с радиусами 378.5, 374.42, 370.51 и 359.75 мм соответственно) [13]. Далее эти зеркала в каждом из спектрометров коллимируют и направляют параллельный световой поток на свою асферическую дифракционную решетку 8[13], где свет раскладывается на спектральные компоненты, и в автоколлимационном режиме с помощью того же зеркала 9 фокусируется в плоскость каждого из линейных ССDприемников 10.



Рис. 7. Схематическое представление вращения блоков спектрометра сенсора AVIRIS при их юстировке [13]

Характеристика	Спектрометр А	Спектрометр В	Спектрометр С	Спектрометр D
Рабочий спектральный диапазон	360—670 нм (31 полоса)	660—1280 нм (63 полосы)	1260—1880 нм (63 полосы)	1880—2500 нм (63 полосы)
Расчетный спектральный диапазон	400—750 нм	650—1250 нм	1200—1820 нм	1780—2400 нм
λ _{тах} рабочего спектрального диапазона	550 нм	950 нм	1510 нм	2090 нм
Угол падения, град	7.07	8.83	10.70	14.08
Угол дифракции, град	3.35	1.84	0.16	3.98
Обратная линейная дисперсия, лин./мм	117.65 (шаг 8.5 мкм)	128.2 (шаг 7.8 мкм)	124.2 (шаг 8.05 мкм)	128.6 (шаг 7.775 мкм)
Выделяемый спектральный интервал, нм	9.7	9.5	10.0	10.0
Радиус выпуклой асферической диф- ракционной решетки 8, мм	2447.38	3235.2	3028.47	2872.74
Радиус вогнутого асферического кол- лимирующего зеркала 9, мм	379.50	374.41	370.51	359.75
Тип CCD линейки 10 и количество ее приемных площадок	Silicon 32	Silicon+ InGaAs (на кремниевой подложке) 64	Indium Antimonide 64	Indium Antimonide 64
Полуширина выделяемого спектрального интервала, нм	9.7	9.5	10.0	10.0
Отношение «сигнал/шум» при аль- бедо 0.5	> 100 (λ = 700 нм)	н/д	н/д	> 50 (λ = 2200 нм)

Основные и составных спектрометров гиперспектрометра AVIRIS

Поскольку углы падения и дифракции разнятся между собой, то в спектрометре Шмидта, который обладает большим полем зрения, имеется возможность пространственно разнести входную щель и плоскость охлаждаемого жидким азотом линейного массива приемников 10, перед каждым из которых установлен индивидуальный блокирующий фильтр 15 и полевая линза 16 — корректор плоского поля.

Телескопы системы Шмидта [4] обладают большим полем зрения, что очень важно при использовании оптических волокон с высокой числовой апертурой. Столь большое поле получается благодаря применению так называемой коррекционной линзы с весьма сложной поверхностью. В случае составных спектрометров прибора AVIRIS эта линза заменяется коррекционным зеркалом 9. Спектрометр стал полноотражательным. Однако он очень сложен в изготовлении. Дело в том, что коррекционное зеркало 9 в таком спектрометре приходится ставить под некоторым углом к его оптической оси (рис. 7). А это приводит к асферичности его поверхности, что существенно усложняет обработку.

Эффективное фокусное расстояние входной оптики (200 мм) и диаметр входного отверстия (сердцевины) оптического волокна (200 мкм) как раз и определяют мгновенное поле обзора из датчика AVIRIS на землю.

Во входной оптической системе энергия, отраженная от последнего, эллипсоидального зеркала сканирования диаметром 200 мм увеличивается в 1.3 раза (для достижения требуемого мгновенного поля обзора $\beta = 1$ мрад) и фокусируется на торцы четырех оптических волокон с диаметром 200 мкм. Эффективное фокусное расстояние входной оптики составляет 20 см, глубина резкости — 0.4 см.

Все четыре спектрометра прибора AVIRIS имеют одинаковые основные оптические схемы (рис. 6, δ), и только угол наклона дифракционной решетки δ существенно изменяется от спектрометра к спектрометру, как того требует рабочий спектральный диапазон каждого из спектрометров. В этой конфигурации системы Шмидта коррекционное зеркало 9 наклонено по отношению к оптической оси. Оптимальный



Puc. 8. Чертеж сканатора прибора AVIRIS с составным входным объективом (*a*) и механизмами нелинейного движения сканирующей призмы (δ) [14]

показатель поверхности для данной конфигурации — анаморфные асферические поверхности.

При создании прибора AVIRIS изготовление таких поверхностей было бы слишком рискованно и дорого. Поэтому был выбран проект с вращением (рис. 8) как блока охлаждаемого приемника излучения 10 с блокирующим фильтром 15, так и выхода индивидуального оптического волокна (11-14). Этот компромисс приводил лишь к незначительному ухудшению общих оптических характеристик, но все еще оставался в пределах спецификаций системы. На рис. 7 представлена схема вращения блоков спектрометра прибора AVIRIS при их юстировке. Фокусировка осуществляется осевым смещением крепления оптического волокна 11-14.

Оптические характеристики составных спектрометров AVIRIS приведены в таблице.

Для всех четырех спектрометров AVIRIS были разработаны уникальные дифракционные отра-

жающие выпуклые асферические решетки 8 второго порядка [13] с радиусами R от 2447 до 3235 мм). Уравнение, согласно которому задается поверхность решетки, приведено в [13]. Этим была выполнена коррекция поверхности. В таблице приведены и асферические коэффициенты каждой из решеток 8, их шаг, а также углы падения и дифракции.

Шаг каждой дифракционной решетки 8 (от 7.775 до 8.05 мкм) и длина волны максимального отражения установлены для каждого из рабочих спектральных поддиапазонов составного спектрометра с учетом параметров каждого из ССД-приемников *10* [13].

Для каждого спектрометра были созданы уникальные блокирующие фильтры *15* [13] для подавления света от длин волн, которые уже не соответствуют рабочему диапазону каждого из спектрометров. Так, в спектрометре D этот специализированный фильтр уменьшает шум в рабочем диапазоне спектрометра от 1800 до 2500 нм и подавляет фотоны вне его рабочего диапазона. Этим достигается увеличение соотношения «сигнал/шум», которое при значении альбедо 0.5 превышало 100 в спектрометре A (на длине волны $\lambda = 700$ нм) и 50 в спектрометре D (на длине волны $\lambda = 2200$ нм) [19].

Каждый спектр (в пределах каждого положения мгновенного поля зрения) измеряется и регистрируется последовательно, во время пошагового сканирования (рис. 5, δ) с частотой развертки 12 Гц [14, 15]. Для выполнения такого сканирования и был разработан специальный сканатор, который включает в себя подвижную зеркальную призму 2 и механическую систему на основе четырех нелинейных кулачков 16 [14]. Сканирующее зеркало призмы 2 размером 10 × 20 см имеет эффективный диаметр 14.5 см [7, 14].

На рис. 8 показаны оптическая схема и чертеж сканатора прибора AVIRIS с составным входным объективом (a), механизм нелинейного движения сканирующей призмы 2 (δ).

Эффективность привода AVIRIS сканирования приближается к 70 %, поскольку осциллирующая с частотой 12 Гц отражающая (в пределах угла 30°) плоскость призмы 2 находится в положении сканирования поверхности Земли около 70 % времени. За остальные 30 % времени она должна вернуться для сканирования следующей строки изображения [14].

Большим преимуществом whiskbroom-сканера является то, что свет для каждого пространственного элемента проходит тот же путь из оптической системы. Это дает исключительную однородность для 614 пространственных кросстреков в каждой линии сканирования изображения AVIRIS. При этом имеются значительные механические усилия, необходимые для отработки пошагового сканирования зеркальной плоскости развертки — линейно через 30° (что соответствует 10.4 км при номинальной высоте 19800 м) поля обзора, а затем вернуться назад с удвоенной скоростью, чтобы начать сканирование следующего изображения.

В работе [14] описана разработка сканатора, расчет производительности механизма сканирования, обсуждаются компромиссы между различными подходами и выбором привода кулачков 16 (рис. 8, δ). Описаны конструкция и исполнение приводного механизма сканирования, причины для выбора конкретного кулачка 16, метод проверки конструкции привода и измерения производительности, а также эффективность полученных результатов.

Принцип работы гиперспектрального сенсора AVIRIS первого поколения [7, 14]. Световой поток, отраженный от исследуемой сцены земной поверхности, входит в спектрометр изображений (сенсор) AVIRIS через оптический люк (иллюминатор), расположенный в днище самолета (рис. 3, δ). Иллюминатор толщиной 2.54 см, выполненый из плавленного кварца, имеет средний коэффициент пропускания не хуже 0.95 по всему рабочему спектральному диапазону.

Световой поток после прохода через иллюминатор проходит через оптический затвор, отражается от двух граней сканирующего зеркала призмы 2, изменяет свое направление с помощью набора плоских зеркал 3-6, затем фокусируется с помощью параболического (1) и эллиптического (7) зеркал входной оптической системы на массив из четырех информационных оптических волокон 11-14 с числовой апертурой 0.45



Рис. 9. Принцип действия бортового калибратора гиперспектрометра AVIRIS

(0.55 — для ИК-волокна 14) и диаметром сердцевины 200 мкм в каждом. Каждое из этих волокон передает световой поток из входной оптической системы на входные щели каждого из четырех составных спектрометров (A, B, C и D), которые используются для покрытия спектральном диапазоне от 360 до 2500 нм.

Как указано выше, $\beta \approx 1$ мрад. Это составляет 19.8 м по земле с высоты 19800 м (рис. 8, δ). Далее, при использовании технологии сканирования «whiskbroom» выполняются 614 шагов последовательного сканирования пространственных элементов. Таким образом, формируется одна строка изображения земной поверхности (рис. 5) [14].

Электрические сигналы от охлаждаемых жидким азотом линейных датчиков 10, расположенных на выходе каждого из спектрометров, усиливаются в индивидуальном предварительном усилителе и оцифровываются блоком электроники, который тоже охлаждается из сосуда Дьюара. Полученная с помощью прибора AVIRIS информация оцифровывается в 12-битный сигнал и записывается как данные 224 спектральных каналов. (Каждая оцифрованная сцена с высоты 20 км имеет размер на земле 11 × 9 км). Затем информационные цифровые сигналы объединяются с сигналами управления, навигационными данными и усиленными темновыми сигналами приемников. Навигационные данные включают позиции *X*, *Y* и *Z* платформы от GPS, а также крена, тангажа и рыскания с интервалами в одну секунду. Этот поток данных затем записывается на 10.4-Гб накопитель высокой плотности (в первых приборах — цифровой ленточный магнитофон, со скоростью записи 20.4 Мб/с).

Механическая шторка (оптический затвор) расположена на выходе из входной оптики перед волоконной оптикой. Затвор автоматически открывается только тогда, когда происходит сканирование изображения по спектру и закрывается как во время сканирования обратного хода, так и для определения темнового тока и во время калибровки — в начале и в конце снятия данных. Шестьдесят четыре значения темнового сигнала усредняются для каждой строки развертки. Такое усреднение необходимо для подавления шума при измерении на темном фоне. Оптический затвор в нерабочем состоянии закрыт для защиты сканирующего зеркала и входной оптики.

Бортовой калибратор. Бортовой калибратор, имеющийся в составе прибора AVIRIS

предназначен для спектральной и радиометрической калибровки гиперспектрометра на борту самолета [7, 13, 16]. Он проверяет спектральное соответствие и радиометрическую устойчивость спектрометров до и после каждого запуска гиперспектрометра на регистрацию данных для обеспечения данных с необходимой точностью.

Источником опорного сигнала в бортовом калибраторе служит кварцевая галогенная лампа *17* (10 Вт), рассчитаная на 5000 ч горения со стабилизированой интенсивностью излучения, с узкополосным фильтром, имеющим рабочую длину волны в максимуме пропускания $\lambda = 543.5$ нм. Он оптически связан через четыре оптоволокна *18—21* со спектрометрами (рис. 9).

Для улучшения стабильности температура всего бортового калибратора (+40 °C) поддерживается с помощью контроллера температуры (на рис. 9 не показан).

Калибратор прибора AVIRIS включается до и после каждого полета. Свет от бортового калибратора передается последовательно через восемь различных фильтров, расположенных на турели 22, обеспечивающих как радиометрическую, так и спектральную калибровку. Турель 22 с фильтрами имеет два нейтральных фильтра, пять узкополосных фильтров с различными рабочими длинами волн и темную позицию для регистрации темновых токов ССD-приемников 10.

Гиперспектрометр AVIRIS и встроенный в него калибратор системы калибруются в лаборатории до и после каждого полетного сезона. Во время лабораторных испытаний спектральная, радиометрическая и геометрические характеристики прибора AVIRIS определяются по отношению к лабораторным стандартам.

выводы

Рассмотрены и проанализированы основные физические и технологические аспекты, а также особенности конструкций семейства гиперспектрометров авиационного базирования AVIRIS для спектрометрического исследования земной поверхности.

Проведенный анализ показал, что научно-технический уровень разработок семейства бортовых гиперспектрометров авиационного базирования AVIRIS первого поколения соответствует современным требованиям.

При создании этих уникальных приборов были внедрены и апробированы достижения передовых технологий. Основные из них:

асферическая оптика во входном телескопе;

 асферические зеркала в составных спектрометрах;

 асферические зеркальные дифракционные решетки;

 охлаждаемые жидким азотом линейные ССD-фотоприемники видимого и ближнего ИК-диапазонов;

 индивидуальные блокирующие фильтры в каждом спектрометре для увеличения отношения сигнал/шум;

 полевые линзы, выравнивающая плоскость изображения на линейных ПЗС-приемниках;

 нелинейный механизм привода сканирующего зеркала;

 уникальные инфракрасные оптические световолокна из фторида циркония с оболочкой из фторида бериллия для оптоволоконного ввода излучения в составные спектрометры (наряду с использованием кварцевых волокон);

— термостабилизированный (+40 °C) бортовой калибратор в оптоволоконном тракте;

 оригинальный многопозиционный бортовой калибратор, обеспечивающий как радиометрическую, так и спектральную калибровку;

 — бортовой вычислитель с накопителями информации до нескольких ТерраБайт.

Гиперспектрометр авиационного базирования AVIRIS до сих пор является приборным комплексом мирового класса. Он в течение 25 лет выдержал ряд модификаций, а с 2011 г. постепенно земеняется на гиперспектрометр нового поколения (новой генерации) AVIRISng.

Передовые технологии, апробированные в авиационных комплексах AVIRIS, были внедрены в космических гиперспектральных комплексах: общего назначения SISEX, HIRIS, HYPERION, военного применения ARTEMIS, в компактных приборах для спектрометрического исследования поверхности Луны и Марса, а также в авиационном гиперспектрометре нового поколения AVIRISng. Некоторые из них могут и сейчас использоваться при создании перспективних бортових мульти- и гиперспектральных комплексов для дистанционного исследования земной поверхности из-за их большой информативности и возможности использования для решения различных тематических задач.

Работа поддержана и ведется в рамках проекта УНТЦ № 5240.

- 1. Донец В. В., Муравский Л. И. Особенности применения приемников излучения в бортових гиперспектрометрах // Космічна наука і технологія. —2012. — 18, № 3. — С. 20—37.
- 2. Донец В. В. Особенности конструкций бортовых гиперспектрометров AIS // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 5. — С. 5—11.
- 3. Попов М. О., Піонтківський П. М., Гринюк С. В. Стан і перспективи розвитку гіперспектральних систем аерокосмічної розвідки [Електронний ресурс] // Наука і оборона. 2012. № 2. С. 39—47. Режим доступу: http://www.nio.mil.gov.ua/pdf/2012-2.pdf
- 4. *Товмасян Г. М.* Ультрафиолетовые телескопы на орбите [Электронный ресурс] // Новое в жизни, науке, технике. Сер. космонавтика, астрономия. 1989. № 5. Режим доступа: http://epizodsspace.airbase.ru/bibl/znan/1989/5/5-uf-tel.html
- 5. AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https:// directory.eoportal.org/web/eoportal/airborne-sensors/ aviris
- 6. *Goetz A. F. H.* Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view Alexander F. H. Goetz // Remote Sens. Environ. 2009. **113**. P. S5—S16. Режим доступа: ftp://laspftp.colorado.edu/pub/harvey/ Gamblin/IDL_code/Geotz_2009.pdf
- Green R. O., Eastwood M. L., Sarture C. M., et al. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) [Электронный ресурс] // Remote Sens. Environ. — 1998. — 65. — Р. 227—248. — Режим доступа: http://www.utsa.edu/lrsg/Teaching/ ES6973/AVIRIS.pdf
- Fay M. E. An analysis of hyperspectral imagery data collected during operation Desert Radiance [Электронный pecypc]. 1995. Р. 9—13. Режим доступа: www.nps.edu/faculty/olsen/Student_theses/Fay_Jun_1995. pdf
- 9. *The AVIRIS* Instrument [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ltid.inpe.br/html/pub/docs/ html/instr.htm

- 10. Green R. O. Green and the Imaging Spectroscopy Team [Электронный ресурс] // Measurement of the Earth's Terrestrial Ecosystems from Space: Concept for a 21st Century Global Biochemistry and Biodiversity Mission 2011. — Режим доступа: http://www.fapesp.br/-14330week2011/media/pres/green.pdf
- Green R. O., Eastwood M. L., Sarture C. M., et al. Imaging spectroscopy and the Aihome VisibleAnfrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) [Электронный ресурс]. — Режимдоступа: http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/ 2014/20277/1/98-1179.pdf
- 12. MacDonald J., Ustin S. L, Chaepman U., Schaepman M. A Review of the contributions of Dr. Alexander F. H. Goetz to imaging spectrometry [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.wageningenur.nl/upload_mm/ 5/8/1/ca27ce44-6549-4f9f-b85f-5ce3bef6634d_ MacDonald_GoetzAchievements.pdf
- 13. *Macenka S. A., Chrisp M. P.* Infrared imaging spectrometer (AVIRIS) spectrometer design and performance // 1987. N 88. P. 14327 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://adsabs.harvard.edu/abs/1988SPIE.. 834...32M
- Miller D. C. AVIRIS scan drive design and performance, Proc. SPIE 0834, Imaging Spectroscopy II, 55 (January 1, 1987).
- 15. Martinez P. J., Hermosel D., Green R. O., et al. An improved data structure for AVIRIS-type imaging spectrometer measurements // 13th JPL Airborne Earth Science Workshop, Pasadena, California, May 24-27, 2005. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://trsnew.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/39590/1/05-0851.pdf
- 16. Sarture C. M., Chovit C. J., Faust J. A., et al. High altitude hyperspectral remote sensing with AVIRIS [Электронный ресурс] // California Institute of Technology. — Режим доступа: http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/ 2014/33488/1/94-1397.pdf
- 17. Sensor systems of the NASA airborne science program [Электронный ресурс]. Режим доступа: http:// asapdata.arc.nasa.gov/sensors.doc
- Vane G. First results from the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) // Proc. SPIE. – 1987. – 834. – P. 166–174. – (Imaging Spectroscopy II / Ed. by G. Vane).
- Vane G., Porter W. M., Reimer J. H., et al. AVIRIS performance during the 1987 flight season: an AVIRIS project assessment and summary of the NASA-sponsored performance evaluation // Proceedings of the AVIRIS performance Evaluation Workshop. — 1988. The Jet Propulsion Laboratory. JPL 83-88. S. 1—20.

Стаття надійшла до редакції 10.06.13

В. В. Донец

АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ СТВОРЕННЯ БОРТОВОГО ГІПЕРСПЕКТРОМЕТРА AVIRIS ПЕРШОГО ПОКОЛІННЯ

Аналізуються особливості конструкції та характеристики гіперспектрометра авіаційного базування AVIRIS першого покоління для спектрометричного дослідження земної поверхні та підсупутникової валідації спектрометричних даних, фізичні і технологічні аспекти його створення та використання. Досягнення передових технологій, які були апробовані в ньому, було реалізовано в космічних гіперспектрометрах — спочатку в SISEX (1990) та HIRIS (1994), а потім в цивільному HYPERION, військовому ARTEMIS, а також в компактних приладах M3 та CRISM для дослідження поверхні Місяця та Марса і в авіаційному гіперспектрометрі AVIRIS нового покоління AVIRISng.

V. V. Donets

AN ANALYSIS OF PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF AIR-BASED HYPERSPECTROMETER AVIRIS OF THE FIRST GENERATION

We considered some design features and characteristics of on-board air-based 1st generation hyperspectrometer AVIRIS for spectrometric remote sensing of the Earth's surface and for hyperspectrometer satellite data validation. Physical and technological aspects of the elaboration and use of the hyperspectrometer were analysed. The technological advances realized and approved in the case of the hyperspectrometer were used for the space-based hyperspectrometers SISEX (1990) and HIRIS (1994), for the civil-based hyperspectrometer HYPERION, army-based hyperspecyrometer ARTEMIS, compact instruments M3 and CRISM for remote sensing of the Moon's and Mars' surface, and for the aviation-based AVIRIS hyperspectrometer of new generation, AVIRISng. ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4. С. 29–43.

УДК 528.88:(551.588.6:546.26)(477-15)

Д. М. Мовчан

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

ОЦІНКА ДИНАМІКИ ПАРАМЕТРІВ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ (ЗАХІДНЕ ПОЛІССЯ) НА ОСНОВІ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Аналізується динаміка біофізичних параметрів лісового покриву на основі даних дистанційного зондування території України (Західного Полісся) для оцінки інтенсивності поглинання вуглецю лісовим покривом. Аналізувались сезонні коливання основних біофізичних параметрів (NDVI, EVI, LAI, FPAR, ET, GPP та NPP) з 2000 по 2011 рр., отриманих на основі даних MODIS. Виявилось, що сезонні зміни параметрів рослинного покриву тісно пов'язані з сезонним розвитком рослинності протягом вегетаційного сезону. Проаналізовано коливання метеорологічних умов в дані періоди. Оцінювався кореляційний зв'язок між GPP і NPP та різними вегетаційними параметрами і кліматичними чинниками. Було розраховано та проаналізовано ефективність поглинання води (WUE) рослинним покривом як відношення GPP до евапотранспірації, та ефективність поглинання вуглецю як відношення NPP/GPP для порівняння з WUE.

ВСТУП

На сьогодні кліматичні та екологічні зміни, що відбуваються в земних системах, є надзвичайно важливими і являють собою значні виклики для всього людства [8, 9]. Такі зміни дуже тісно пов'язані з глобальним вуглецевим циклом [3]. Тому оцінка та аналіз сучасного стану, динаміки та просторового поширення стоків та джерел вуглецю є надзвичайно важливим завданням. Лісовий покрив є одним з найважливіших наземних стоків вуглецю і відіграє значну роль в зменшенні його концентрації в атмосфері. Кліматичні зміни значною мірою можуть впливати на продуктивність лісів, їхній видовий склад, частоту та інтенсивність порушень, які впливають на інтенсивність поглинання вуглецю лісовим покривом (рис. 1). Такі зміни (перш за все температури та кількості опадів) впливають на земний покрив через зміни в енергетичному та водному балансах та зміни в біогеохімічних циклах (вуглецевий, азотний та ін.). Тому вивчення

сучасного стану та динаміки параметрів лісового покриву на регіональному рівні може бути досить корисним для покращення нашого розуміння і уточнення регіональних та глобального циклів вуглецю.

На сьогодні методи, направлені на вивчення стану земного покриву, можуть бути поділені на три групи. Перша група — наземні вимірювання. Ці методи забезпечують хорошу точність даних, проте характеризуються точковими вимірюваннями. Для покриття значної території потрібно мати добре розвинену мережу вимірювальних станцій. Зазвичай дані методи є досить корисними для досліджень на локальному рівні, проте вони не дозволяють робити глобальні оцінки.

Друга група методів — дистанційне зондування, що забезпечують дані з меншою точністю і потребують валідації, проте вони можуть покривати значні території. Вони можуть бути корисними для досліджень на регіональному та глобальному рівнях. Методи дистанційного зондування забезпечують постійний і систематичний моніторинг параметрів рослинного покриву та екосистем і відіграє все більшу роль в оцінці

[©] Д. М. МОВЧАН, 2013



Рис. 1. Взаємозв'язок земних систем з кліматичними змінами



Рис. 2. Основні параметри рослинного покриву, що можуть бути оцінені методами дистанційного зондування і які використовуються для оцінки продуктивності рослинного покриву

продуктивності рослинного покриву (рис. 2) [4, 16, 19, 20].

Третя група методів — моделювання. На сьогодні ми маємо велику кількість розроблених різноманітних моделей, що описують продуктивність рослинного покриву та інших параметрів земного покриву. Це, наприклад, процесні [21], динамічні [17] та інші [2] глобальні моделі чистої первинної продуктивності. Звичайно, всі моделі є певними наближеннями, що впливає на кінцеві результати, проте ці методи можуть бути досить корисними у випадку, коли певних даних немає. Найкраще, коли всі методи вимірювань та оцінки використовуються одночасно і доповнюють один одного. Як приклад такого об'єднання в останнє десятиліття широкого розповсюдження набуло моделювання біологічної продуктивності на основі даних ДЗЗ [15, 21, 25, 26]. Продукт MODIS, що містить дані оцінки первинної продуктивності наземної рослинності (MOD17) є широко використовуваною і найбільш відомою моделлю, розробленою на базі даних ДЗЗ [7, 19, 26]. Даний продукт є першим регулярним глобальним набором даних, що забезпечує неперервний моніторинг первинної продуктивності рослинного покриву на вкритих рослинністю територіях.

Алгоритм MOD17 забезпечує оперативний розрахунок валової (*GPP*) та чистої (*NPP*) первинної продуктивності на глобальному рівні на основі даних, отриманих з сенсора MODIS, встановленого на супутниковій платформі EOS. Даний продукт складається з двох субпродуктів: MOD17A2, що вміщує дані 8-денної композиції *GPP* і чистого фотозинтезу (PsnNet) та MOD17A3, що вміщує річні оцінки *GPP* та *NPP*. Ці дані є у вільному доступі і можуть бути отримані через Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG) (http://www.ntsg.umt.edu) чи через EROS Data Center Distributed Active Archive Center (EDC DAAC).

Дане дослідження сфокусоване на: 1) збирання, оцінювання та аналізування даних різних параметрів рослинного покриву, продуктивності українських лісів та кліматичних чинників; 2) пошук та оцінка залежностей між цими параметрами, 3) аналіз динаміки та трендів для українських лісів. Результати цих досліджень є важливими для покращення нашого розуміння, як кліматичні чинники та інші умови навколишнього середовища можуть впливати на продуктивність лісового покриву та ролі лісів як вуглецевого стоку. Вони також можуть бути корисними для прогнозування реакції лісів на різні сценарії кліматичних змін в майбутньому.

ДАНІ ТА ТЕРИТОРІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Територія дослідження розташовується в українській частині Західного Полісся на межі Рівненської та Житомирської областей. Географічні координати ділянки лежать у межах 50°47'— 51°22' N та 26°57'—27°24' Е. Рослинний покрив дослідної території представлений переважно хвойними лісами з домінуванням світлої сосни (*Pinus silvestris*) та певними вкрапленнями мішаних сосново-дубових лісів (*Pino-Quercetea*). Грунти в основному глинисто-піщані дернові з вкрапленням торфових ґрунтів. Річна усереднена кількість опадів в регіоні складає 600—700 мм. Фотосинтетично-активна радіація протягом вегетаційного сезону складає 1600—1700 МДж/м². Середня місячна температура повітря для липня складає близько 18 °C [1].

В даному дослідженні було використано дані з двох ресурсів (табл. 1). Перший (дані ДЗЗ) продукти MODIS, які містять оцінки цілого ряду параметрів рослинного покриву: вегетаційного індексу нормалізованої різниці (*NDVI*), покращеного вегетаційного індексу (*EVI*), індексу листової поверхні (*LAI*), частки поглинутої фотосинтетично-активної радіації (*FPAR*), евапотранспірації (*ET*), валової первинної продуктивності (*GPP*) та чистої первинної продуктивності (*NPP*). Всі ці дані доступні з 8- чи 16-денним розділенням. Для *ET*, *GPP* і *NPP* є також усереднені місячні і річні оцінки. Просторове розділення складає 1 км.

Другий ресурс даних — Всесвітня метеорологічна організація (WMO), що забезпечує наземні вимірювання метеорологічних показників. Це оцінки мінімальної, максимальної, середньодобової температури повітря та кількості опадів. Було зібрано і проаналізовано набір даних за 12 років (з 2000 по 2011 рр.). Оцінка проводилася лише для активного вегетаційного сезону (середина квітня — середина жовтня).

КОРОТКИЙ ОПИС ПАРАМЕТРІВ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ

Теоретична основа для емпірично визначених вегетаційних індексів отримана на базі вивчення типових сигнатур спектрального відбиття листя. Коефіціент відбивання р радіації зеленим листям у видимому діапазоні є досить низьким в результаті значного поглинання фотосинтетично активними пігментами, з максимумами поглинання в синьому (470 нм) та червоному (670 нм) діапазонах. В ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR) відбувається розсіювання радіації (відбивання та пропускання) з незначним поглинанням, у спосіб, що залежить від структурних особливостей покриву (індексу листової площі (LAI), кута розміщення листя, морфології листя). Як результат, різниця між коефіціентами відбивання радіації у червоному (р_{red}) та ближньому інфрачервоному (р_{NIR}) діапазонах є досить чутливою до кількості зеленої біомаси і може бути використана для оцінки щільності рослинного покриву. Максимум відношення р_{red}/р_{NIR} спостерігається над територіями, щільно вкритими рослинним покривом, тоді як мінімум — над розрідженим покривом чи непокритими територіями. При низькій та середній щільності рослинного покриву контраст red/NIR забезпечується змінами як у червоному, так і у ближньому інфрачервоному діапазонах, тоді як при значній щільності лише зміни в NIR-діапазоні впливають на зростання контрасту, оскільки поглинання в червоному діапазоні досягає точки насичення за рахунок значного поглинання хлорофілом.

Вегетаційний індекс нормалізованої різниці (*NDVI*) відображає нормалізовану різницю співвідношення коефіцієнтів відбиття в червоному

Таблиця	1.	Наб	ір усер	ед	нених	даних,
що викој	эис	тову	валис	я в	дослі	дженні

Параметр	Інтервал усереднення					
Дані ДЗЗ (MODIS)						
Вегетаційний індекс нормалізованої різ- ниці (<i>NDVI</i>)	16 днів					
Покращений вегетаційний індекс (EVI)	16 днів					
Індекс листової поверхні (<i>LAI</i>)	8 днів					
Частка поглинутої фотосинтетично-ак- тивної радіації (<i>FPAR</i>)	8 днів					
Евапотранспірація (ЕТ)	8 днів, місяць, рік					
Валова первинна продуктивність (GPP)	8 днів, місяць, рік					
Чиста первинна продуктивність (<i>NPP</i>)	8 днів, місяць, рік					
Наземні дані WMO						
Середньодобова температура <i>Т</i> _{ср}	доба					
Максимальна температура Т _{тах}	доба					
Мінімальна температура <i>Т</i> _{min}	доба					
Кількість опадів W	доба					

та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах [18]:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}}$$

де ρ_{red}, ρ_{NIR} — коефіцієнти відбиття в червоному та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах відповідно. При розрахунку *NDVI* використовуються перший (580—680 нм — червоний) та другий (720—1000 нм — NIR) спектральні канали MODIS.

Основою для мінімізації впливу атмосфери є використання різниці між синім і червоним спектром відбивання для оцінки рівня впливу атмосфери. Ця концепція базується на властивостях аерозолів по-різному розсіювати випромінювання з різними довжинами хвиль. Загалом розсіювання в синьому діапазоні відбувається більш інтенсивно у порівнянні з червоним діапазоном. Зі зростанням концентрації аерозолю в атмосфері ця різниця теж збільшується. Дана інформація використовується для врахування впливу аерозолю в атмосфері.

EVI включає в собі дану концепцію мінімізації атмосферного впливу через індекс резистентності атмосфери *ARVI* разом з урахуванням впливу яскравості ґрунтів на *BI* через індекс *SAVI*. Додатково *EVI* розділяє впливи ґрунтового фону і атмосфери на сигнал від рослинного покриву [19]:

$$EVI = G \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue} + L}$$

де ρ_x — повністю чи частково відкориговані від атмосферного впливу (для релеївського розсіювання та поглинання озоном) коефіцієнти відбивання земної поверхні, L — поправка на фон земного покриву для корекції нелінійної різниці розсіяння покривом NIR- та гед-випромінювання, C_1 та C_2 — коефіцієнти аерозольної корекції (що використовують синій спектральний діапазон для корекції впливу аерозолів на червоний спектральний діапазон), G — коефіцієнт масштабування. Прийняті значення коефіцієнтів, що використовуються в алгоритмі MODIS при розрахунку *EVI*, дорівнюють: L = 1, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, G = 2.5.

Індекс *LAI* листової поверхні є відношенням площі верхньої листової поверхні до площі зем-

ного покриву (для широколистяних рослин), чи площі проекції поверхні хвої до площі земного покриву (для хвойних) для даної конкретної території. LAI безпосередньо визначає структуру покриву і може бути використаний для прогнозування первинної продуктивності рослинного покриву та урожайності. Велика кількість моделей екосистемних процесів використовують LAI як вхідну змінну. LAI може бути виміряний наземними методами безпосереднім вимірюванням площі листової поверхні чи непрямими вимірюваннями, такими як напівсферичне фотографування чи з використанням оптичних інструментів. Проте для оцінок LAI над значними територіями найбільш придатними є дані дистанційного зондування.

Частка поглинутої фотосинтетично-активної радіації (FPAR) визначається як частка фотосинтетично-активної радіації, що була поглинута зеленою рослинністю. FPAR широко використовується в екосистемному моделюванні, оскільки має важливе значення для обміну енергією, водою та вуглецем між земною поверхнею та атмосферою. Опади та температура — найголовніші фактори, що визначають FPAR. Вона є важливим параметром для визначення продуктивності біомаси, оскільки розвиток рослинного покриву залежить від швидкості, з якою сонячна енергія поглинається рослинністю. FPAR може бути виміряна наземними методами за допомогою портативних вимірювальних приладів чи за допомогою методів дистанційного зондування (для значних територій) [5].

КОРОТКИЙ ОПИС ПРОДУКТИВНОСТІ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ І АЛГОРИТМУ МОДЕЛІ MOD17

Наземні екосистеми накопичують вуглець через процеси фотосинтезу і втрачають його як CO_2 через автотрофне (рослини та фотосинтетичні бактерії) і гетеротрофне (гриби, тварини та деякі бактерії) дихання [6]. Загальна кількість вуглецю, який асимілюється рослинним покривом через фотосинтез, отримала назву валової первинної продукції (*GPP*). Чиста первинна продукція (*NPP*) є залишком зафіксованого вуглецю після вирахування автотрофного дихан-

ня. Значна кількість зафіксованого вуглецю накопичується в живій рослинності та органічній частині ґрунтів, і вивільнення цього вуглецю в атмосферу як СО, чи метану може мати значний вплив на клімат [6]. Вуглець листової підстилки та ґрунтів також вивільняється через гетеротрофне дихання (HR). Різниця між NPP та HR отримала назву чистої екосистемної продукції (NEP). Якщо в екосистемах виникають порушення, такі як пожежі, вирубки лісів та ін., може втрачатися значна кількість вуглецю. В результаті ми отримуємо чистий екосистемний обмін (NEE) як різницю між NEP та втратами вуглецю внаслідок цих порушень. Накопичений чистий екосистемний обмін представлений запасом вуглецю, що зосереджується переважно в трьох головних вуглецевих пулах: рослинність, підстилка і ґрунти. Разом з тим NEE визначає, чи є екосистема стоком вуглецю, чи його джерелом [12].

Продукт MOD17A2 є 8-денною сумою валової первинної продукції і фотосинтетичної продукції (PsnNet). Річні значення *GPP* та *NPP* для продукту MOD17A3 отримуються сумуванням цих двох параметрів за весь рік. Фотосинтетична продукція визначається як

$$PsnNet = GPP - R_{ml} - R_{mr}$$

де R_{ml} і R_{mr} — частина, що витрачається на дихання для підтримки життєдіяльності листя і коренів рослин відповідно. Дихання приросту не враховується в 8-денному PsnNet. Річна *NPP* визначається як

$$NPP - \sum_{i=1}^{365} PsnNet - (R_{mo} + R_g),$$

де R_{mo} — частина, що витрачається на дихання для підтримки життєдіяльності всіх живих частин за виключенням листя і коренів (наприклад сирої деревини), R_g — частина для дихання приросту [26].

Модель MOD17 має три джерела вхідних даних. Для кожного пікселя інформація про тип земного покриву отримується з продукту MOD12Q1, добові метеорологічні дані отримуються з моделі DAO (Data Assimilation Office), оцінки *FPAR* і *LAI* отримуються з продукту MOD15A2. Невизначеності в MOD12Q1, DAO, MOD15A2 і самому алгоритмі моделі можуть впливати на вихідні дані MOD17.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

По-перше, достовірність MOD12Q1 лежить у межах 70-80 %, і найбільші похибки характерні для подібних класів земного покриву [22]. Подруге, набір метеорологічних даних, що містяться в DAO, не отримано шляхом безпосередніх вимірювань, внаслідок чого можуть мати місце систематичні похибки для певних регіонів. Невизначеності метеорологічних даних роблять головний внесок в нереалістичні значення NPP на деяких невеликих ділянках. Для таких пікселів, що відповідають територіям з суворими кліматичними умовами, переоцінка лише температури, для прикладу, може бути достатньою, щоб отримати негативне значення *NPP*. Вища температура призводить до переоцінки дихання и недооцінки GPP внаслідок вищих значень дефіциту водяної пари (VPD). У результаті можна отримати негативне значення *NPP*. Іншими словами, алгоритм моделі MOD17 є досить чутливим до вхідних метеорологічних даних. Детальніше ці аспекти були обговорені в роботі [27].

Попіксельні дані MOD15A2 досить слабко корелюють з даними наземних вимірювань для *LAI*, який має тренд до переоцінки для більшості умов [23]. В алгоритмі MOD17 *FPAR* безпосередньо визначає величину поглинання вуглецю, а *LAI* відповідає за оцінку дихання. Тому переоцінений *LAI*, отриманий з MOD15A2, може впливати на недооцінку *NPP* навіть при достатньо точній оцінці *FPAR*.

РЕЗУЛЬТАТИ

Динаміка продуктивності рослинного покриву, вегетаційних параметрів та метеорологічних чинників. Було проаналізовано набір даних за 12 років (2000—2011 рр.) для даних частки поглинутої фотосинтетично-активної радіації, індексу листової площі, *EVI*, *NDVI*, евапотранспірації, валової первинної продукції та чистої первинної продукції (рис. 3—6). Аналіз сезонної динаміки параметрів провадився для періоду активного вегетаційного сезону (дні року 105...289).

Як і очікувалося, всі параметри мають чітку сезонну динаміку, яка добре корелює з сезонним розвитком рослинного покриву. Проте в окремі роки деякі параметри мають нетипово високі чи низькі значення. Так, значення *FPAR*



Рис. 3. Сезонна динаміка: *а* — частки поглинутої фотосинтетично-активної радіації, *б* — індексу листової площі

на початку 2001 р. та 2002 р. приблизно на 6 % перевищують середні значення. На початку 2005 р. ці значення були нетипово низькими. Це може пояснити різним температурним режимом на початку вегетаційного сезону. Тепла і рання весна (2000, 2001 та 2002 рр.) сприяла інтенсивнішому розвитку рослинного покриву і зростанню біомаси. Це призвело до зростання *LAI* і *FPAR*. Холодна і пізня весна (2005 р.) спричинила зворотний ефект.

Сезонні коливання евапотранспірації, *GPP* та *NPP* з 8-денним інтервалом показали подібну динаміку (рис. 5). Сезонні коливання величин евапотранспірації лежать у межах від 0.5 кіло-

грамів водяної пари на квадратний метр за добу (кг/(м²доба)) на початку та в кінці вегетаційного сезону (дні року 105, 289) до 3—4 кг/(м²доба) протягом літнього періоду (дні року 169...233).

Сезонні значення *GPP* лежать у межах від 2— 4 грамів вуглецю на квадратний метр за добу ($r/(m^2 доба)$) на початку та в кінці вегетаційного сезону (дні року 105, 289) до 7—9 $r/(m^2 доба)$ протягом літнього періоду (дні року 169...233).

Сезонні значення *NPP* знаходяться в межах від 2—3 г/м²(м²доба) на початку та в кінці вегетаційного сезону (дні року 105, 289) до 5— 6 г/(м²доба) протягом літнього періоду (дні року 169...233).



Рис. 4. Сезонна динаміка: *а* — індексу *EVI*, *б* — індексу *NDVI*

Видно, що значення *GPP* \approx 5...6 і *NPP* \approx 2... 3 г/(м²доба) для літніх періодів 2002 та 2007 рр. значно нижчі, ніж у інші роки. Як було показано в роботі [24], *GPP* і *NPP* сильно залежать від коливань вегетаційних і метеорологічних показників. Тому для покращення нашого розуміння коливань *GPP* і *NPP* необхідно проаналізувати коливання метеорологічних показників для відповідної території дослідження.

Аналіз сезонних коливань максимальних і середніх температур повітря (рис. 6, a, δ) показав також чітку сезонну динаміку цих параметрів.

Разом з тим у 2001, 2002 та 2007 рр. мали місце нетипово спекотні і сухі літні періоди. Особливо тривалою була посуха в 2002 р., чим можна пояснити значне зниження продуктивності рослинного покриву в цей період.

Аналіз сезонних коливань кількості опадів (рис. 6, *в*) показав, що опади не мають чіткої сезонної залежності. Більшість даних мають рівномірне розподілення протягом вегетаційного сезону виключаючи деякі екстремальні значення.

Наступним кроком був аналіз даних річної продуктивності рослинного покриву для тери-



Рис. 5. Сезонна динаміка: *а* — евапотранспірації, *δ* — валової первинної продукції *GPP*, *в* — чистої первинної продукції *NPP*




ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

торії дослідження (табл. 2). Результати показали коливання продуктивності лісових території в різні роки, проте без чіткої тенденції. Але ми можемо виділити два роки, коли простежувалися мінімальні значення продуктивності лісів. Це посушливі 2002 та 2007 рр.

Взаємозв'язок продуктивності лісів з вегетаційними параметрами та метеорологічними чинниками. Оцінка кореляції *GPP* та *NPP* з різноманітними вегетаційними параметрами та кліматичними чинниками (рис. 7, 8) показали існування залежності між цими параметрами.

Показник *GPP* досить добре корелює з *NDVI*, *EVI* та *LAI* ($r^2 = 0.606$, 0.638, 0.654 відповідно). Між *GPP* та *FPAR* кореляція не така сильна ($r^2 = 0.418$). Простежується досить сильна залежність *GPP* від температури повітря ($r^2 = 0.658$ для максимальної та 0.705 для середньої). Немає кореляції між *GPP* та кількістю опадів *W* ($r^2 = 0.021$). Це значить, що продуктивність рослинного покриву не має прямої залежності від кількості опадів. Проте ми знаємо, що наземний водний цикл відіграє ключову роль в динаміці рослинного покриву, вуглецевому та азотному біогеохімічних циклах [28]. Тому нам необхідно застосовувати інші параметри для відображення залежності водного та вуглецевого циклів.

Оцінка подібних залежностей для *NPP* показала слабшу кореляцію, ніж з *GPP*. Кореляція

Таблиця 2. Щорічні значення валової та чистої первинної продукції (*NPP*, *GPP*) і їхнього відношення *NPP/GPP* для дослідної території

Рік	<i>GPP</i> , кг/м ²	<i>NPP</i> , кг/м ²	NPP/GPP
2000	1.31667	0.78732	0.597963
2001	1.24264	0.70002	0.563333
2002	1.13898	0.59562	0.522942
2003	1.17636	0.66078	0.561716
2004	1.14353	0.64485	0.563912
2005	1.22889	0.70331	0.572313
2006	1.23007	0.70155	0.570333
2007	1.16104	0.60083	0.517493
2008	1.15462	0.62106	0.537891
2009	1.18283	0.67079	0.567106
2010	1.25416	0.71121	0.567081
2011	1.29307	0.74222	0.573998

NPP з *NDVI* та *EVI* складає 0.373 та 0.422 відповідно. Кореляція між *NPP* та *LAI* і *FPAR* складає 0.375 та 0.204 відповідно. Коефіцієнт кореляції *NPP* з температурою повітря дорівнює $r^2 = 0.365$ для максимальних температур і 0.387 для середніх. Як і у випадку з *GPP*, також немає кореляції між *NPP* та кількістю опадів $W(r^2 = 0.011)$.

Ці більш слабкі залежності для *NPP* можна пояснити впливом невизначеностей оцінок *NPP*. В алгоритмі MOD17 величина *FPAR* безпосередньо пов'язана з поглинанням вуглецю, а *LAI* визначає дихання. Невизначеності оцінок *LAI*, отриманих з MOD15A2, можуть впливати на оцінки *NPP* навіть при достатньо точних оцінках величини *FPAR*. В роботах [23, 26] було показано, що оцінки *LAI*, отримані з MOD15A2, слабо корелюють з оцінками, отриманими з наземних вимірювань. Тому дане питання ще потребує детального вивчення.

обговорення

Оцінки залежності продуктивності українських лісів від різноманітних вегетаційних параметрів та кліматичних чинників показали хорошу кореляцію між продуктивністю, вегетаційними параметрами та температурою повітря. Проте немає будь-якої залежності між продуктивністю та кількістю опадів. Тому були зроблені спроби використати інші характеристики для опису взаємодії водного та вуглецевого циклів. Наприклад, накопичена ґрунтова волога є дуже важливим елементом для продуктивності рослинного покриву. Проте даний параметр є досить складним для оцінки на значних територіях за допомогою даних ДЗЗ. Натомість величина евапотранспірація (ET) дуже добре корелює з продуктивністю рослинного покриву ($r^2 = 0.705$ та 0.585 для *GPP* і *NPP* відповідно).

Величина $ET \in другим$ за величиною компонентом (після опадів) наземного водного циклу, оскільки ET повертає більш ніж 60 % опадів, що випадають на поверхню, назад в атмосферу у вигляді водяної пари [10] і таким чином визначає доступність вологи на земній поверхні.

Евапотранспірація включає в себе втрати води внаслідок випаровування із земної поверхні, випаровування з рослинного покриву, дихання



Рис. 7. Корелятивні залежності валової продукції *GPP* лісів Західного Полісся від різних кліматичних та біофізичних параметрів рослинного покриву



Рис. 8. Корелятивні залежності чистої продукції *NPP* лісів Західного Полісся від різних кліматичних та біофізичних параметрів рослинного покриву

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4





Рис. 9. Сезонна динаміка ефективності використання води (a) та ефективності поглинання вуглецю рослинним покривом (δ) для дослідного регіону

рослинності і сублімації з снігової поверхні [13]. Використовуючи значення *ET*, ми можемо оцінити ефективність використання води (*WUE*). *WUE* характеризується кількістю поглинутого вуглецю на кількість водяної пари, втраченої внаслідок евапотранспірації [14]. Це один з найважливіших факторів, що контролюють продуктивність рослинного покриву на територіях з посушливим кліматом. Тому дослідження реакції *WUE* на зміни в навколишньому середовищі може покращити можливості прогнозування впливу негативних чинників кліматичних змін на екосистеми. Є кілька шляхів розрахунку *WUE* [14]. В нашому випадку *WUE* був розрахований як відношення валової первинної продукції до евапотранспірації [11, 14]. Також було розраховано ефективність поглинання вуглецю рослинним покривом як відношення *NPP/GPP*.

Величини *WUE* і *NPP/GPP* показали подібну сезонну динаміку (рис. 9) і характеризуються тенденцією до зниження в літній період (дні року 169...249). Це можна пояснити реакцією рослин-

ного покриву на збільшення температури в цей період. Вищі температури призводять до інтенсифікації процесів дихання, що є фізіологічною відповіддю рослинного покриву, пов'язаною з процесами терморегуляції. У свою чергу, інтенсифікація дихання рослин призводить до більших втрат вуглецю і водяної пари через продихи в листі, що призводить до зниження продуктивності рослинного покриву.

Видно також, що величина *NPP/GPP* у літні періоди 2002 та 2007 рр. мала значно нижчі значення, ніж у інші роки. Це узгоджується з посухами, що мали місце в ці роки і могли призвести до зниження ефективності поглинання вуглецю рослинним покривом.

Також було розраховано кореляцію між WUE та NPP/GPP (рис. 10). Як і очікувалося, досить сильна кореляція ($r^2 = 0.748$) показує досить сильний взаємозв'язок між водним і вуглецевим циклами. Можна також помітити, що ефективність поглинання вуглецю має певний рівень насичення, після якого зростання припиняється навіть при подальшому зростанні WUE.

ВИСНОВКИ

Враховуючи сучасні глобальні кліматичні зміни та зміни в навколишньому середовищі, оцінка і аналіз сучасного стану і динаміки балансу вуглецю є надзвичайно важливим питанням.

Розвиток супутникових технологій, який відбувається протягом останніх десятиліть, дозволяє залучати для таких досліджень методи дистанційного зондування Землі. Такі методи разом з традиційними наземними вимірюваннями дозволяють покращити оцінки і наше розуміння тенденцій, що відбуваються в екосистемах взагалі і у вуглецевому балансі зокрема.

Дане дослідження було направлене на вивчення динаміки параметрів лісового покриву з використанням даних дистанційного зондування Землі для оцінки інтенсивності поглинання вуглецю рослинним покривом. Аналіз оцінок різних параметрів рослинного покриву, що були отримані з даних ДЗЗ (*LAI*, *FPAR*, *NDVI* та *EVI*), продуктивності лісового покриву отримані на основі моделі MOD17 за даними ДЗЗ та з метеорологічних даних показав високу кореляцію продуктивності лісів з



Рис. 10. Корелятивна залежність ефективності поглинання вуглецю від величини *WUE*

біофізичними параметрами рослинного покриву і температурою повітря. Проте не було виявлено жодної прямої кореляції продуктивності лісового покриву з кількістю опадів.

Додатковий аналіз ефективності використання вологи (*WUE*) все ж показав чітку залежність між продуктивністю рослинного покриву та водним циклом. Це значить, що кількість опадів для даного регіону дослідження не відіграє ключової ролі у продуктивності рослинного покриву, оскільки ґрунти можуть отримувати достатньо вологи з підземних джерел. Проте в інших регіонах (наприклад в степу) ми можемо мати зовсім іншу картину. Тому важливо розширити подібні дослідження на інші ландшафтно-кліматичні зони та інші типи рослинного покриву.

Аналіз даних також показав значний вплив високих температур на продуктивність рослинного покриву. Майбутні дослідження слід сфокусувати на оцінку впливів інтенсивності і тривалості посушливих періодів на продуктивність рослинного покриву. Це може бути досить корисним для передбачення змін в екосистемах і вуглецевому балансі, пов'язаних з кліматичними змінами.

Крім того, потрібно враховувати невизначеності оцінок, отриманих на основі даних ДЗЗ. Зокрема, як показали роботи [23, 26, 27], модель MOD17, розроблена на основі даних Д33, має велику кількість джерел вхідних даних, що може збільшити невизначеність вихідного результату. Тому необхідно також залучати дані прямих наземних вимірювань для валідації і уточнення отриманих результатів.

Дослідження виконувалося в рамках участі в літній програмі для молодих науковців (YSSP-2012) Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (IIASA), Австрія, за фінансової підтримки Української національної членської організації. Автор висловлює вдячність всім, хто сприяв проведенню даного дослідження.

- 1. *Національний* атлас України. Картографія, 2008. 440 с.
- Cramer W., Kicklighter D. W., Bondeau A., et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results // Global Change Biology. – 1999. – 5. – P. 1–15.
- Earth systems change over Eastern Europe / Ed. by P. Y. Groisman, V. I. Lyalko. — Kyiv: Akademperiodyka, 2012. — 487 p.
- Field C. B., Randerson J. T., Malmstrom C. M. Global net primary production – combining ecology and remotesensing // Remote Sens. Environ. – 1995. – 51. – P. 74–88.
- Gobron N., Verstraete M. ECV T10: Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR) / Essential Climate Variables. Rome: Global Terrestrial Observing System; 2008.
- Heimann M., Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // Nature. – 2008. – 451. – P. 289–292.
- Heinsch F. A., Reeves M., Votava P., et. al. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm. Version 2.0, December 2, 2003. – 57 p.
- IPCC (2001). Climate change 2001: The scientific basis: Cambridge: University Press, 2001. – 881 p.
- IPCC (2007). Climate change 2007: The physical science basis: — Cambridge: University Press, 2007. — 996 p.
- Korzoun V. I., Sokolov A. A., Budyko M. I., et al. World water balance and water resources of the Earth. In: Studies and Reports in Hydrology (UNESCO), no. 25/United Nations Educational, 1978, Scientific and Cultural Organization, 75 – Paris (France); International Hydrological Decade, Moscow (USSR). USSR National Committee. – 663 p.
- Lu X., Zhuang Q. Evaluating evapotranspiration and wateruse efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data // Remote Sens. Environ. – 2010. – 114. – P. 1924–1939.

- 12. Mu Q., Zhao M., Running S. W., et al. Contribution of increasing CO_2 and climate change to the carbon cycle in China's ecosystems // J. Geophys. Res. -2008. -113. G01018.
- Mu Q., Zhao M., Running S. W. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm // Remote Sens. Environ. – 2011. – 115. – P. 1781–1800.
- Mu Q., Zhao M., Running W. Evolution of hydrological and carbon cycles under a changing climate // Hydrol. Processes. – 2011. – 25. – P. 4093–4102.
- Prieto-Blanco A., North P., Barnsley M. J., et al. Sattelitedriven modelling of Net Primary Productivity (NPP): Theoretical analysis // Remote Sens. Environ. — 2009. — 113. — P. 137—147.
- Prince S. D., Goward S. N. Global primary production: A remote sensing approach // J. Biogeography. – 1995. – 22. – P. 815–835.
- Quegan S., Beer C., Shvidenko A., et al. Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and Dynamic Global Vegetation Models // Global Change Biology. 2011. 17. P. 351–365.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third ERTS Symposium, 1973. – NASA SP-351 I. – P. 309–317.
- Running S. W., Nemani R., Glassy J. M., et al. MODIS daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17), Algorithm Theoretical Basis Document, Version 3.0, April 29, 1999.
- Running S. W., Thornton P. E., Nemani R., et al. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System // Methods in ecosystem science / Eds O. E. Sala, R. B. Jackson, H. A. Mooney, R. W. Howarth. – New York: Springer, 2000. – P. 44–57.
- Smith B., Knorr W., Widlowski J., et al. Combining remote sensing data with process modeling to monitor boreal conifer forest carbon balances // Forest Ecology and Management. – 2008. – 225. – P. 3985–3994.
- 22. *Strahler A. H., Friedl M., Zhang X., et al.* The MODIS land cover and land cover dynamics products. Presentation at remote sensing of the Earth's environment from TERRA in l'Aquila, 2002, Italy.
- Wang Y., Woodcock C.E., Buermann W., et al. Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland // Remote Sens. Environ. – 2004. – 91. – P. 114–127.
- Wu C., Nui Z., Gao S. Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize // J. Geophys. Res. 2010. 115. D12127. doi:10.1029/2009JD013023.
- Xiao X., Hollinger D., Aber J., et al. Sattelite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest // Remote Sens. Environ. — 2004. — 89. — P. 519—534.

- 26. Zhao M., Heinsch F. A., Nemani R. R., et al. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set // Remote Sens. Environ. – 2005. – 95. – P. 164–176.
- 27. Zhao M., Running S. W., Nemani R. R. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses // J. Geophys. Res. 2006. 111. G01002, doi:10.1029/2004JG000004.
- Zhao M., Running S.W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 // Science. – 2010. – 329. – P. 940–943.

Стаття надійшла до редакції 01.04.13

Д. М. Мовчан

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ (ЗАПАДНОЕ ПОЛЕСЬЕ) НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Анализируется динамика биофизических параметров лесного покрова на основе данных дистанционного зондирования территории Украины (Западного Полесья) для оценки интенсивности поглощения углерода лесным покровом. Анализировались сезонные колебания основных биофизических параметров (*NDVI*, *EVI*, *LAI*, *FPAR*, *ET*, *GPP* и *NPP*) с 2000 по 2011 гг., полученных на основе данных MODIS. Оказалось, что сезонные изменения параметров растительного покрова тесно повязаны с сезонным развитием растительности на протяжении вегетационного сезона. Проанализированы колебания метеорологических условий в данный период. Оценивалась корреляционная связь между *GPP*, *NPP* и разными вегетационными и климатическими параметрами. Рассчитана и проанализирована эффективность поглощения воды (*WUE*) растительным покровом как отношение *GPP* к эвапотранспирации и эффективность поглощения углерода как отношение *NPP/GPP* для сравнения с *WUE*.

D. M. Movchan

ESTIMATION OF UKRAINIAN FOREST COVER (WESTERN POLISSIA) USING REMOTE SENSING DATA

The dynamics of biophysical parameters of forest cover is analysed on the basis of remote sensing data for Ukrainian Western Polissia to estimate the intensity of carbon absorption by the forest cover. Seasonal changes of the basic vegetation cover parameters (*NDVI*, *EVI*, *LAI*, *FPAR*, *ET*, *GPP* and *NPP*) from 2000 to 2011 are analysed using MODIS data. Our results show that seasonal variations of vegetation cover parameters are closely connected with seasonal growth of vegetation. Weather variables for the periods under consideration are studied. Some correlations between *GPP* and *NPP* and different vegetation parameters and climatic factors are estimated. Water use efficiency (*WUE*) as the ratio of *GPP* to evapotranspiration (*ET*) and carbon uptake efficiency as *NPP/GPP* ratio are calculated and analysed. УДК 528.8.04

А. В. Соколовська

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

КОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЇ (НА ПРИКЛАДІ МІСТА КИЄВА)

Обґрунтовується можливість використання космічної інформації ДЗЗ і методу багатокритеріальної оптимізації для оцінки екологічного стану урбанізованих територій на прикладі м. Києва шляхом формування функції близькості, обчислювання, на основі статистичних зв'язків, функції відповідності та інтегрального визначення структури складових урболандшафтів.

вступ

Сучасний екологічний стан міст вимагає постійного вдосконалення методів контролю і оцінки екологічних наслідків урбанізації та впливу техногенних факторів. Для цього необхідне створення оперативних і поточних методів контролю та прогнозу розвитку екологічного стану міст та розробка заходів до зниження наслідків техногенного впливу. Серед сучасних методів найбільш перспективними є космічні методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які в режимі реального часу виконують моніторинг досліджуваних територій. За допомогою космічних знімків можна отримувати інформацію як для оперативного використання в разі аварійних ситуацій, так і для поточного контролю ландшафтнофункціональних зон міських агломерацій та прилеглих до них територій. Отримана інформація використовується для моделювання різноманітних сценаріїв перспективного розвитку території міст, розробки довгострокових прогнозів і накопичення статистичних даних динаміки змін екологічного стану міських територій [7].

Сьогодні вже складно уявити ефективне управління екологічною безпекою мегаполісу, прийняття раціональних рішень у сфері охорони навколишнього природного середовища без застосування аерокосмічних та ГІС-технологій. Це дозволяє не тільки вести оперативний контроль за потенційно небезпечними територіями, але й отримувати поточну інформацію для оцінювання, моделювання і прогнозу складних природних та техногенних процесів міських агломерацій. Створення на цій основі нових методик дозволяє значно розширити функціональні можливості космічного геомоніторингу та підвищити ефективність вирішення екологічних задач міських територій.

Відомо багато досліджень, присвячених оцінці стану міських агломерацій, а саме: геологоекологічне районування міських агломерацій, прогноз факторів геологічного ризику, оцінка техногенного навантаження, інвентаризація та контроль гідрографічної і гідротехнічної мережі, контроль забруднення водних об'єктів та атмосфери та інші [8, 1]. Однак методи інтегральної оцінки екологічного стану міських територій на основі космічної інформації ДЗЗ ще розроблені недостатньо.

Мета роботи полягає в обгрунтуванні та апробації на прикладі території міста Києва використання космічної інформації ДЗЗ до оцінки екологічного стану міської території шляхом установлення на основі багатокритеріальної оптимізації зв'язку інтегральної характеристики (функції *F*) складових урболандшафту (включно з деякими геоекологічними факторами) за 1984—2011 рр. з

[©] А. В. СОКОЛОВСЬКА, 2013

статистичною оцінкою екологічного стану міста за цей же період, отриманою на основі наземних спостережень.

МЕТОДИ ОБРОБКИ ДАНИХ

Для дешифрування було використано 24 «безхмарні» знімки території Києва, отримані із супутників «Landsat 7/ETM+», «Landsat 5 TM», «Aqua» (сенсор AIRS) у 1984—2011 рр.

За офіційними даними площа Києва дорівнює 835.6 км². Своєрідність і різноманітність природних умов Києва пов'язані з його розташуванням на межі фізико-географічних зон: лісостепової та мішаних лісів. Північна частина міста розташована на Поліській низовині, південно-західна (правобережна) — на Придніпровській височині, південно-східна (лівобережна) — на Придніпровській низовині.

Велику площу займають численні парки і сквери. Проте вирубка дерев у парках та прибудинкових територіях протягом останнього десятиріччя зменшує площу зелених насаджень.

На кліматичні та екологічні особливості Києва впливає наявність поверхневих водних об'єктів: річок, озер, ставків. За офіційними даними, їхня площа у межах міста становить 47 км², або 8.0 % від загальної. Ландшафтна структура території Києва дуже складна. За функціональним використанням територія м. Києва розділяється на п'ять основних типів міських ландшафтів: селітебний (міська і сільська забудова), селітебнотранспортний, агротехнічний, промисловий, рекреаційний (лісові масиви, парки, сквери, зелені насадження загального користування, об'єкти природоохоронного фонду, водоймища).

Основними речовинами, що забруднюють атмосферне повітря, є оксид вуглецю, сполуки азоту, леткі органічні сполуки, діоксид та інші сполуки сірки (понад 96.9 % від загальної кількості викидів). Найвище забруднення повітря в Києві спостерігається в місцях, прилеглих до автомагістралей та перехресть. У Києві автомобільний транспорт дає 83.4 % усіх шкідливих викидів в атмосферу [4, 5, 2].

Виходячи з параметрів космічних знімків для подальших досліджень ми відібрали такі складові урболандшафту міста Києва і геоекологічні фактори: техногенне навантаження, зелені насадження, водойма, забудована територія, пустирі і будівельні майданчики.

Для обробки та інтерпретації матеріалів дистанційного зондування використовувались програмні комплекси Erdas Imagine та ArcGIS, які мають розвинутий інструментарій просторового аналізу. Для точнішої обробки та класифікації космічних знімків доцільне спільне використання автоматичної класифікації та спектральних індексів, отриманих на основі значень яскравості об'єктів в різних спектральних зонах.

Автоматична класифікація виконувалася методом неконтрольованої класифікації кластерів (Iso Cluster Unsupervised Classification), в якому застосовується ітеративний процес для обчислення мінімальної евклідової відстані при віднесенні кожної найближчої комірки до певного кластера [3]. При розрахунку спектральних індексів було використано нормалізований різницевий індекс рослинності *NDVI* [14], який є показником кількості біомаси:

$$NDVI = (I_{NIR} - I_{RED}) / (I_{NIR} + I_{RED}), \qquad (1)$$

де I_{RED} і I_{NIR} — спектральні яскравості в червоному і ближньому інфрачервоному діапазоні відповідно.

Також було розраховано нормований водний індекс *NWI*, який використовує зелений діапазон та середній інфрачервоний діапазон [11]:

$$NWI = (R_{560} - R_{1650}) / (R_{560} + R_{1650}), \qquad (2)$$

де R_{560} , R_{1650} — коефіцієнти відбиття в зеленому та ІЧ-діапазонах ($\lambda \approx 560$ і 1650 нм).

Для оцінки динаміки складових урболандшафту, що включає техногенне навантаження, були використані алгоритми методу багатокритеріальної оптимізації, які складаються з таких етапів [12]: введення функції близькості $S_j(b_j, a_j)$ порівнюваних величин *a* і *b*, обчислення оцінки для функції близькості та функції відповідності F_1 . Ця функція описує ступінь близькості значень порівнюваних величин, наприклад середньорічних значень складових урболандшафту за період 1984—2011 рр. відносно їхнього стану в 1984 р.:

$$F_1(B,A) = \sum_{j=1}^{n} \rho(b_j, a_j) \cdot [1 - S(b_j, a_j)], \qquad (3)$$

де $\rho(b_i, a_i)$ — вагові коефіцієнти, j = 1, ..., n.

Близькість значення параметра a до параметра b визначається за допомогою функції близькості $S_i(b_i, a_i)$:

$$S_{j}(b_{j},\bar{a}_{j}) = \begin{cases} (\bar{a}_{j}-b_{j})/\bar{a}_{j} & \text{при } b_{j} < \bar{a}_{j}, \\ (b_{j}-\bar{a}_{j})/\bar{a}_{j} & \text{при } b_{j} > \bar{a}_{j}. \end{cases}$$
(4)

Тоді класифікація процесів або об'єктів може бути формалізована як завдання багатокритеріальної оптимізації *m* критеріїв, кожний з яких виступає як функція відповідності характеристики *b* параметрові *a*. У даній роботі для обчислення та моделювання складних систем на основі викладеної теорії було використано спеціальну комп'ютерну програму, розроблену у Державній установі «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі дешифрування і аналізу космічних зображень міста Києва за період 1984 — 2011 рр. було отримано значення основних складових характеристик урболандшафту, вплив яких на екологічний стан міської території досліджується далі (див. таблицю). Екологічний стан міста оцінувався на основі комплексного індексу *К* забруднення

Обчислені значення площ складових урболандшафту, функції відповідності F, чисельних оцінок E екологічного стану в умовних одиницях, техногенного навантаження та вагових коефіцієнтів $\rho(b, a)$

Роки	Е, у. о.	Техногенне наванта- ження (min), мг/м ³	Зелені насадження (max), км ²	Забудова (min), км ²	Пустирі і будівельні майданчики (min), шт	Водойма (max), км ²	F
1984		1	618.5	161.6	895	50.6	1.000
1986		0.89	613.2	162.4	931	50.2	0.954
1987		0.87	606.9	163.2	942	51.5	0.943
1988		0.88	607.0	167.0	1012	51.1	0.937
1989		1.02	607.1	167.8	1046	50.2	0.974
1990	0.112	1.38	603.4	161.6	1045	50.9	0.980
1992	0.086	1.48	603.1	165.4	1034	49.8	0.975
1993	0.094	1.71	604.6	170.7	1057	49.9	0.969
1994	0.102	1.72	602.2	174.4	1184	48.3	0.951
1995	0.100	1.68	601.8	177.6	1165	48.0	0.949
1996	0.099	1.74	601.4	177.9	1107	48.4	0.954
1998	0.097	2.1	600.7	178.4	1156	47.2	0.946
1999	0.092	2.05	600.3	178.1	1080	47.8	0.953
2000	0.090	2.13	598.6	175.4	994	48.4	0.964
2001	0.074	2.1	592.6	179.1	1060	46.9	0.948
2002	0.069	2.0	591.2	182.7	1069	45.2	0.939
2004	0.067	2.32	584.7	190.9	1204	45.8	0.923
2005	0.066	2.4	585.1	190.1	1139	45.6	0.928
2006	0.065	2.59	585.3	192.5	1098	45.6	0.929
2007	0.064	2.6	584.5	194.9	1020	45.7	0.934
2008	0.062	2.81	573.7	202.9	1005	45.9	0.926
2009	0.056	3.0	568.6	210.9	1042	46.4	0.918
2010	0.055	2.95	568.2	211.8	1003	45.6	0.919
2011	0.054	3.18	567.8	217.6	1100	45.6	0.907
$\rho(b_j)$	(a_j)	0.35	0.25	0.15	0.1	0.15	r = 0.85

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4



Рис. 1. Фрагменти зображень міста Києва, отримані в результаті дешифрування космічних знімків «Landsat 5 TM» за період 1984—2011 рр.

атмосфери, значення якого були отримані Центральною геофізичною обсерваторією в результаті наземних спостережень. При цьому як критерій оцінки екологічного стану міста використовувалася обернена величина E = 1/K (умовних одиниць). Значення техногенного навантаження у 2002—2009 рр. вважалось рівним значенню концентрації СО₂ в атмосфері, яке було отримане сенсором AIRS космічного апарата «Aqua» [13], а для інших років використовувалося значення загазованості атмосфери міста газом СО на основі даних Центральної геофізичної обсерваторії [9]. При цьому коефіцієнт кореляції супутникових і наземних вимірювань складав 0.9.

На рис. 1 представлено деякі фрагменти зображень міста Києва, отримані в результаті дешифрування космічних знімків за період з 1984 р. по 2011 р. Зіставлення зображень дозволяє побачити істотні зміни розмірів площ складових міської території, які відбулися за цей період.

Функцію відповідності F_1 для складових міської території (таблиця) обчислено для кожного

року досліджень (1986—2011 рр.) на основі рівняння (3) відносно складових за 1984 р., які були умовно прийняті за еталон.

Для обчислення F_1 згідно із рівнянням (3) необхідно врахувати значення вагових коефіцієнтів $\rho(b_j, a_j)$ для кожної складової урболандшафту. Для цього виконувалось експертне оцінювання впливу кожної складовій на екологічний стан міської території [10]. Значення експертних оцінок вагових коефіцієнтів і функції F_1 наведено в таблиці. На рис. 2 показано, як змінювалися значення функції відповідності з часом.

Наступним етапом досліджень стали пошуки зв'язку екологічного стану міста з функцією відповідності F_1 , яка характеризує структуру складових урболандшафту. Для цього оцінювався коефіцієнт кореляції *г* між значеннями функції F_1 та показником *E* екологічного стану міста за період 1990—2011 рр. Значення коефіцієнта кореляції *г* виявилось рівним R = 0.85.

Аналізуючи зміни значень E і F_1 , бачимо, що з 1988 р. відбувається плавне збільшення по-



Рис. 2. Обчислені значення функції F_1 в умовних одиницях

казників F_1 , а з 1990 р. значення E і F_1 починають зменшуватися. Враховуючи, що наприкінці минулого століття техногенне навантаження на міську територію стрімко зростало, тенденцію зменшення E і F_1 можна пояснити як свідчення погіршення екологічної ситуації у місті.

Оскільки дані, наведені в таблиці, здобуто на відносно обмеженому експериментальному матеріалі, для підтвердження наявності статистично суттєвої кореляційної залежності між дослідженими величинами необхідно показати, що значення коефіцієнтів кореляції г дійсно не дорівнюють нулю. З огляду на те, що розподіл *r* повільно сходиться до нормального, дану операцію було проведено з використанням статистики $U = \frac{\sqrt{n-3}}{2} \cdot \ln \frac{1+r}{1-r}$ шляхом перевірки гіпотези про рівність нулю одержаних коефіцієнтів кореляції *г* для певної кількості експериментів [6]. Відсутність статистично вірогідної кореляційної залежності виявляється у випадку, коли значення функції статистики потрапляють в інтервал $-Z_{\alpha/2} \leq U < Z_{\alpha/2}$, де $Z_{\alpha/2}$ — обмеження по площі гауссівського розподілу за ординатами $\pm \alpha$. При рівні значущості $\alpha = 0.1 Z_{\alpha/2} = 1.65$, тоді як для n = 19 років і r = 0.85 значення статистики Uдорівнює 5.2. Таким чином, підтверджується наявність статистично вірогідної кореляційної залежності та достовірність результатів досліджень.

ВИСНОВКИ

На прикладі дослідження міста Києва обґрунтовано можливість використання інформації космічного геомоніторингу для оцінки екологічного стану міської території шляхом інтегрального визначення структури складових урболандшафтів (включаючи деякі геоекологічні фактори), обчислювання функції відповідності F_1 , яка має кореляційний взаємозв'язок з наземною оцінкою екологічного стану міської території з ймовірністю 0.85, що цілком достатньо для оперативного контролю екологічного стану території на основі космічного геомоніторингу.

- Глебова О. В. Становление и развитие учения о городских ландшафтах // Природный комплекс большого города. — М.: Наука, 2000. — 2428 с.
- Екологічний паспорт Київської області (2011 р.) // Державне управління охорони навколишнього природного середовища в Київській області. Київ, 2011. 154 с.
- Ермошин И.С. Современные средства автоматизированного дешифрирования космических снимков и их использование в процессе создания и обновления карт // ARCREVIEW. — 2009. — № 1. — С. 12—13.
- Замятин Д. Н. Географические образы города // География и экология в школе XXI века. 2006. № 3. С. 13—21.
- Звіт про стан навколишнього природного середовища в місті Києві у 2010 р. // Державне управління екології та природних ресурсів в м. Києві. Київ, 2011. 122 с.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1974. — 831 с.
- Лялько В. И., Федоровский А. Д., Попов М. А. и др. Использование данных спутниковой съемки для изучения природоресурсных проблем // Космічні дослідження в Україні 2002—2004. Київ, 2004. С. 7—14.
- Методология и методы оценки состояния городской среды / Отв. ред. Г. Л. Кофф, Э. А. Лихачёва, Д. А. Тимофеев. — М.: Медиа-пресс, 2006. — 200 с.
- *Праці* Центральної геофізичної обсерваторії / Під ред. О. О. Косовця. — К.: Інтерпрес ЛТД, 2009. — Вип. 5 (19). — 116 с.
- Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 186 с.
- Сахацький О. І. Досвід використання водних індексів супутникових зйомок TERRA/MODIS для моніторингу засухи південних районів України на прикладі вегетаційного періоду 2007 року // Доп. НАН України. — 2008. — № 5. — С. 127—130.
- Федоровский А. Д., Даргейко Л. Ф., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Системный подход к оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія. — 2001. — 7, № 5–6. — С. 75—79.

- Engelen R. J., Serrar S., Chevallier F. Four dimensional data assimilation of atmospheric CO₂ using AIRS observations // J. Geophys. Res. – 2009. – 114, D03303. – doi:10.1029/2008JD010739.
- Huete A., Justice C., van Leeuwen W. Modis vegetation index (MOD13). Algorithm theoretical basis document. Verion 3. April, 1999.

Стаття надійшла до редакції 11.06.13

А. В. Соколовская

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА КИЕВА)

Обосновывается возможность использования космической информации ДЗЗ и метода многокритериальной оптимизации для оценки экологического состояния урбанизированных территорий на примере г. Киева путем формирования функции близости, вычисления на основе статистических связей функции соответствия и интегрального определения структуры составляющих урболаншафтов.

A. V. Sokolovska

SPACE MONITORING OF ECOLOGICAL CONDITION OF URBAN TERRITORIES (THE KYIV CITY IS USED AS AN EXAMPLE)

We substantiate the possibility to use the Earth remote sensing space information and multiobjective optimization method for the estimation of ecological condition of an urban territory. The Kyiv city is used as an example. For this purpose, the compliance function is formed, accordance function is calculated on the basis of statistical data, and integral determination of urban landscape components is performed. УДК 550.388, 551.520.32

А. В. Беспалова, А. К. Федоренко

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

ХВИЛЬОВІ ЗБУРЕННЯ ШВИДКОСТІ НЕЙТРАЛЬНИХ ЧАСТИНОК ТА ІОНІВ У ПОЛЯРНИХ ОБЛАСТЯХ

Досліджено хвильові збурення полярної іоносфери за вимірюваннями швидкості нейтральних частинок та іонів на низькоорбітальному супутнику «Dynamic Explorer 2». Амплітуди горизонтальних і вертикальних складових швидкості нейтральних частинок складають десятки метрів за секунду, при цьому досягають максимальних значень переважно над центральними областями полярних шапок. Показано, що вертикальні швидкості іонів фактично збігаються з вертикальними швидкостями нейтральних частинок. Горизонтальні швидкості іонів максимальні на границях полярних шапок і в авроральних овалах, де вони досягають сотень метрів за секунду. В нічних секторах авроральних овалів амплітуди в середньому більші, ніж у денних секторах.

ВСТУП

Поширення акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) у верхній атмосфері супроводжується збуреннями іоносферної плазми і може бути зареєстроване у вигляді рухомих іоносферних збурень (PI3) як з борту супутника, так і наземними методами. Традиційно основна експериментальна інформація щодо хвильових збурень верхньої атмосфери отримується в наземних спостереженнях іоносфери. Суттєвими перевагами таких спостережень, у порівнянні з вимірюваннями на космічних апаратах, є значно менші фінансові затрати та можливість отримання довгих рядів неперервних спостережень. Проте під час інтерпретації наземних спостережень PI3 виникають труднощі, пов'язані зі складним характером іоносферного відгуку на поширення хвиль в нейтральній атмосфері. Перш за все цей відгук залежить від висоти. На висотах приблизно до 100 км, де частоти v_i зіткнень іонів з нейтральними частинками значно перевищують гірочастоту іонів Ω_i , іони рухаються в тому ж напрямку, і з тією ж швидкістю, що й нейтральна складова. На висотах F2-області іоносфери, де $v_i << \Omega_i$, відгук іоносферної плазми на поширення хвиль у нейтральній атмосфері стає значно складнішим і залежить від напрямку коливань частинок відносно геомагнітного поля. У високих широтах при наявності електричних полів і висипань частинок зв'язок АГХ/РІЗ ускладнюється ще більше. В зв'язку з цим в ідеальному випадку дані наземних вимірювань хвильових процесів слід комбінувати з одночасними супутниковими вимірюваннями параметрів нейтральної атмосфери та іоносфери. Проте кількість низькоорбітальних супутників з контактними вимірюваннями атмосферних параметрів на іоносферних висотах є дуже обмеженою. В основному це супутники NASA серій «Atmosphere Explorer» і «Dynamic Explorer», які функціонували у 1970—1980 рр.

В даній роботі проведено порівняння властивостей АГХ та РІЗ у полярній F2-області іоносфери за даними прямих супутникових вимірювань швидкості нейтральних частинок та іонів. У полярних областях зосереджені найпотужніші джерела збурень верхньої атмосфери, такі як висипання заряджених частинок, дисипація струмів магнітосферного походження та ін. Внаслідок цього тут часто спостерігаються хвильові збурення великих амплітуд [1, 6—9]. Для дослідження цих збурень будуть використані дані

[©] А. В. БЕСПАЛОВА, А. К. ФЕДОРЕНКО, 2013

вимірювань на низькоорбітальному супутнику «Dynamics Explorer 2» (DE2). Попередній аналіз даних вимірювань на цьому супутнику показав, що хвильові збурення систематично спостерігаються над полярними шапками в інтервалі висот 250—400 км [1, 5, 6]. Амплітуди полярних АГХ у відносних варіаціях концентрації нейтральних частинок і температури складають в середньому кілька відсотків, і у кілька разів перевищують амплітуди хвиль у середніх і низьких широтах.

Дослідження взаємозв'язку АГХ/РІЗ на основі аналізу синхронних супутникових вимірювань швидкостей нейтральних частинок та іонів раніше не провадились. Такі дослідження є важливими для інтерпретації наземних спостережень РІЗ в полярних областях.

ДАНІ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

Супутник «Dynamic Explorer 2» було запущено на полярну орбіту з нахилом 89.9°, перигеєм близько 250 км і апогеєм 1000 км. Комплекс наукової апаратури вимірював різні параметри нейтральної атмосфери та іоносфери, а також електричне і магнітне поле. Концентрації різних сортів нейтральних газів вимірювались на DE2 за допомогою мас-спектрометра в експерименті NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) [3]. Температура і швидкість нейтральних частинок вимірювались в експерименті WATS (Wind and Temperature Spectrometer) [10]. Три складові швидкості іонів вимірювались в експерименті RPA (Retarding Potential Analyzer). Синхронні вимірювання цих параметрів дозволяють одночасно аналізувати хвильові процеси у нейтральному середовищі, іоносферній плазмі та варіаціях полів і встановлювати їхній можливий взаємозв'язок.

Швидкості нейтральних частинок та іонів представлено у базі даних вимірювань DE2 в системі координат супутника (CKC), де вісь X_s вибрано вздовж вектора швидкості супутника \mathbf{V}_s , вісь Y_s напрямлена вертикально вгору, Z_s доповнює праву трійку векторів. Кожні півроку з метою теплового контролю супутник перевертався, що відповідає переходу із системи координат $\{X_s, Y_s, Z_s\}$ в $\{X_s, -Y_s, -Z_s\}$. Це необхідно враховувати при аналізі вимірюваних складових

швидкості. В експерименті WATS проводились контактні вимірювання двох складових швидкості нейтральних частинок — вертикальної та горизонтальної, перпендикулярної до \mathbf{V}_s . При нахилі орбіти 89.9° супутника DE2 в експерименті WATS фактично вимірювалась горизонтальна зональна V_{nz} (вздовж паралелі) і вертикальна V_{nv} складові швидкості нейтральних частинок. В експерименті RPA вимірювались вертикальна V_{iv} , горизонтальна зональна V_{iz} і горизонтальна меридіональна V_{im} (вздовж \mathbf{V}_s) складові швидкості іонів.

ШВИДКІСТЬ НЕЙТРАЛЬНИХ ЧАСТИНОК

Поширення АГХ відображається в різних параметрах нейтральної атмосфери, зокрема у швидкості нейтральних частинок. Вимірювання вертикальної і зональної складових швидкості нейтральних частинок показано на рис. 1, а, б на двох послідовних витках над північною полярною областю. У вертикальній складовій хвильові варіації добре помітно навіть без попередньої обробки даних. У горизонтальній зональній складовій швидкості проявляються ефекти, пов'язані з зональними вітрами та обертанням Землі, внаслідок чого хвильові збурення спостерігаються на фоні цих великомасштабних змін. Відокремлення хвильових варіацій від трендів здійснювалося за методом ковзного середнього. Кількість точок усереднення вибиралась з умови максимальної кореляції варіацій вертикальної і горизонтальної складових швидкості за методикою, описаною в роботі [1].

Після виключення великомасштабної складової хвильові варіації в обох складових швидкості є узгодженими (рис. 1, *в*, *г*). При цьому синфазний характер хвильових варіацій вказує на поширення хвилі вправо відносно \mathbf{V}_s , а протифазний — вліво [2]. Відмітимо, що вертикальна V_{nv} і зональна V_{nz} складові швидкості близькі за величиною. Хоча в загальному випадку супутник летить під деяким кутом до хвильового фронту, повна горизонтальна швидкість частинок $V_{hor} = \sqrt{V_{nz}^2 + V_{nm}^2}$ також буде близька до V_{nv} . З теоретичних співвідношень АГХ випливає, що для близьких значень горизонтальної і вертикальної складових швидкості частота хвилі наближаєть-



Фис. 2. Акустико-гравітаційні хвилі над північною полярною областю у варіаціях вертикальної швидкості нейтральних частинок V_{nv} та іонів V_{iv}

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

0

-50

-100

22.5

22.6

UT, год

22.7



Рис. 3. Горизонтальні компоненти швидкості іонів на північній полярній ділянці витка 8100: *а* — вихідні ряди вимірювань зональної та меридіональної складових швидкості іонів, *б* — хвильові варіації зональної та меридіональної складових, *в* — варіації вертикальної та меридіональної складових, *с* — варіації зональної швидкості іонів та меридіональної складових, *с* — варіації зональної швидкості іонів та меридіональної складових, *с* — варіації зональної швидкості іонів та меридіональної ного електричного поля

ся до частоти Брента — Вяйсяля [4]. Цей факт узгоджується з незалежними оцінками частоти полярних АГХ у ряді робіт [2, 5, 7].

ШВИДКІСТЬ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК

На висотах спостережень на супутнику DE 2 (вище 250 км) $v_i \ll \Omega_i$, що обумовлює різний характер рухів іонів вздовж **В** і перпендикулярно до нього. Вздовж силових ліній магнітного поля іони рухаються разом з нейтральними частинками. Оскільки у полярних областях си-

лові лінії геомагнітного поля майже вертикальні, коливання нейтральних частинок та іонів у вертикальному напрямку фактично збігаються $V_{iv} \approx V_{nv}$ (рис. 2).

У полярній F2-області іоносфери рухи іонів у горизонтальному напрямку (перпендикулярно до **B**) підтримуються за рахунок $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфу. На рис. 3, *а* показано вимірювання зональної та меридіональної горизонтальних компонент швидкості іонів на полярній ділянці витка 8100. Супутник рухається з нічного сектора у денний, при цьому перехід ніч — день відбувається приблизно в UT = 22.52^{*h*}. Від'ємні значення швидкості в центральній частині рисунка відповідають полярній шапці, зміна знаку швидкості відбувається на границях полярної шапки і авроральних овалів. Хвильові варіації зональної та меридіональної швидкості іонів після виключення тренду представлено на рис. 3, б. Періодичні варіації горизонтальної швидкості іонів повинні підтримуватися відповідним періодичним електричним полем. В нічній частині компоненти швидкостей є синфазними, у денній частині — протифазними, що вказує на зміну знаку електричного поля, яке підтримує цей дрейф. Порівняння вертикальної та меридіональної складових швидкостей іонів демонструє близькі просторові масштаби, чітко виражений синфазний характер коливань у нічній частині та менш виражений протифазний характер коливань у денній частині (рис. 3, в). На відміну від швидкості нейтральних частинок, амплітуда коливань горизонтальної складових швидкості іонів приблизно у п'ять разів перевищує вертикальну. Якщо варіації горизонтальної швидкості обумовлені дрейфом у схрещених полях, для північної півкулі мають виконуватися співвідношення $V_{iz} = -E_m / B$ і $V_{im} = E_z / B$, де B — величина магнітного поля, E_m і E_z — меридіональна і зональна горизонтальні складові електричного поля. Якщо швидкість вимірюється в м/с, а електричне в поле в мВ/м, тоді при B = 50 мкТл матимемо $V_{iz} = -20E_m$. Фактичний збіг кривих V_{iz} і $-20E_m$ (рис. 3, *г*) свідчить, що горизонтальні варіації швидкості іонів дійсно контролюються відповідними варіаціями електричного поля.

Таким чином, щоб пояснити періодичні варіації швидкості іонів у полярних областях у горизонтальному напрямку, необхідно припустити наявність періодичного горизонтального електричного поля з масштабами, що відповідають горизонтальній довжині АГХ. При цьому поле підтримує дрейф іонів у меридіональному напрямку з швидкістю, яка у п'ять разів більша, ніж швидкість нейтральних частинок у цьому ж напрямку. Періодичне електричне поле, перпен-

Виток	<i>UT</i> , год	Швидкість нейтральних частинок (АГХ), м/с		Швидкість іонів (РІЗ), м/с				
		V _{nv}	V _{nz}	V_{iv}	V_{iz}		V _{im}	
					овал, ніч	овал, день	овал, ніч	овал, день
8011	6.15-6.3	40	25	40	400	300	200	200
8019	19.8-20.05	35	35	30	300	300	250	150
8087	1.3-1.45	50	40	60	350	50	500	150
8088	2.7—3	30	20	30	350	300	250	300
8096	16.4—16.6	50	50	50	300	200	150	150
8100	20.95-21.15	50	50	50	600	400	600	200
8101	22.5-22.65	60	40	60	400	400	400	250
8104	3-3.2	30	20	30	300	200	200	250
8106	6.0-6.2	25	25	30	500	500	250	150
8108	9-9.2	20	20	20	450	350	250	150
8115	19.65-19.9	40	40	40	400	200	400	150
8192	16.0—16.2	50	30	30	200	100	200	50

Значення швидкостей нейтральних частинок та іонів у північній полярній області

Примітка: V_{nv} — вертикальна і V_{nz} — горизонтальна зональна складові швидкості нейтральних частинок; V_{iv} — вертикальна, V_{iz} — горизонтальна зональна, V_{im} — горизонтальна меридіональна складова швидкості іонів

дикулярне до **B**, може бути викликане варіаціями поздовжніх струмів, майже вертикальних в області аврорального овалу, або бути наслідком поширення альвенівської хвилі. У будь-якому випадку отримані результати вказують на зв'язок АГХ, що поширюються в нейтральній атмосфері, з електромагнітними процесами в іоносфері. Як мінімум, спостерігаються узгоджені періодичні структури в нейтральній атмосфері, швидкості іонів та в електричному полі. Цей факт потребує подальших експериментальних і теоретичних досліджень.

Основні результати вимірювань швидкості нейтральних частинок та іонів у полярних областях узагальнено в таблиці на прикладі 12 прольотів супутника DE2 над північною полярною областю. У полярних областях чітко виділяються два типи періодичних рухів іонів: 1) дрейфові рухи, що проявляються в горизонтальних компонентах швидкості іонів (перпендикулярно до В) з швидкостями в сотні метрів за секунду; 2) вертикальні рухи вздовж В з швидкістю нейтральної складової за рахунок зіткнень іонів з нейтральними частинками. Особливу увагу привертає той факт, що дрейфові рухи іонів демонструють періодичну структуру з горизонтальними масштабами, які збігаються з масштабами АГХ. В той час як амплітуди швидкості нейтральних частинок максимальні над центральними областями полярних шапок, амплітуди швидкості іонів максимальні на границях шапок і в авроральних овалах. Відмітимо також, що в нічному секторі аврорального овалу амплітуди хвильових варіацій горизонтальних складових швидкості іонів систематично перевищують відповідні денні значення.

висновки

На основі аналізу даних супутникових вимірювань встановлено такі особливості відгуку іоносферної плазми на поширення АГХ в полярних областях.

1. Горизонтальні масштаби коливань швидкості іонів та нейтральних частинок приблизно збігаються і складають сотні кілометрів.

2. Над полярними шапками коливання нейтральних частинок досягають максимальних амплітуд переважно над центральними областями шапок, при цьому вертикальна і горизонтальна складові швидкості близькі за величиною $(V_{nhor} / V_{nvert} \approx 1)$.

3. Вертикальна складова швидкості іонів практично збігається з вертикальною швидкістю нейтральних частинок. Оскільки у полярних областях силові лінії геомагнітного поля майже вертикальні, це вказує на спільні рухи плазми і нейтральних частинок вздовж геомагнітного поля.

4. Горизонтальні компоненти швидкості іонів досягають максимальних амплітуд на границях полярних шапок і в авроральних овалах. В цих областях горизонтальні швидкості іонів значно перевищують швидкості нейтральних частинок і вертикальні швидкості іонів ($V_{ihor} / V_{ivert} \approx 5...10$).

Отримані результати вказують на те, що поширення АГХ у нейтральній атмосфері спричиняє відгук не тільки в іоносферній плазмі, а й у полях, ймовірно, через модуляцію провідності іоносфери. Оскільки полярні АГХ поширюються квазігоризонтально [2], коливання плазми разом з нейтральними частинками по вертикалі відбуваються в одній фазі у всій товщі іоносфери, а модуляція провідності іоносфери має бути глобальною по висоті. Як наслідок, відгук на поширення АГХ у поздовжніх струмах і обумовлених ними варіаціях горизонтальних складових δE_{hor} і δB_{hor} є дуже відчутним.

Вказані особливості хвильових варіацій нейтральних частинок та іонів повинні бути враховані при інтерпретації наземних спостережень PI3 у високоширотній іоносфері. Зокрема, не всі іоносферні хвильові збурення, що реєструються у полярних областях, можуть бути пов'язані з поширенням АГХ. Той факт, що амплітуди РІЗ максимальні в областях авроральних овалів і на границях полярних шапок, можна інтерпретувати як локалізацію РІЗ поблизу гіпотетичних джерел їхньої генерації в овалах. Такими джерелами можуть бути, наприклад, висипання заряджених частинок. Проте у варіаціях швидкості нейтральних частинок збільшення амплітуди в овалах не спостерігається, а їхні амплітуди переважно максимальні над центральними областями полярних шапок.

Робота виконана за фінансової підтримки ДУ НАНЦ Держінформнауки України (проект № Н/2-2013) та ДФФД (проект № Ф53/177-2013).

- 1. *Федоренко А. К.* Спутниковые наблюдения среднемасштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 5. — С. 65—73.
- Федоренко А. К. Направления распространения акустико-гравитационных волн над полярными шапками Земли // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 3. — С. 34—44.
- 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.
- Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. – 1960. – 38. – P. 1441– 1481.
- Innis J. L., Conde M. Characterization of acoustic-gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data // J. Geophys. Res. – 2002. – 107, N A12. – doi: 10.1029/2002JA009370.
- Ishii M., Conde M., Smith R. W., et al. Vertical wind observations with two Fabry-Perot interferometers at Poker Flat, Alaska // J. Geophys. Res. – 2001. – 106, N A65. – P. 10537–10551.
- 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.
- Oyama S., Watkins B. J. Generation of atmospheric gravity waves in the polar thermosphere in response to auroral activity // Space Sci. Revs. – 2011. – 168, N 1-4. – P. 463– 473. – doi:10.1007/s11214-011-9847-z.
- Oyama S., Watkins B. J., Maeda S., et al. Generation of the lower-thermospheric vertical wind estimated with the EIS-CAT KST radar at high latitudes during periods of moderate geomagnetic disturbance // Ann. geophys. — 2008. — 26. — P. 1491–1505.

 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.

Стаття надійшла до редакції 10.07.13

А. В. Беспалова, А. К. Федоренко

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ СКОРОСТИ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ И ИОНОВ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ

Исследованы волновые возмущения полярной ионосферы по измерениям скорости нейтральных частиц и ионов на низкоорбитальном спутнике «Dynamic Explorer 2». Амплитуды горизонтальных и вертикальных составляющих скорости нейтральных частиц составляют десятки метров за секунду, при этом достигают максимальных значений преимущественно над центральными областями полярных шапок. Вертикальные скорости ионов фактически совпадают с вертикальные скорости ионов фактически совпадают с вертикальные скорости ионов максимальны на границах полярных шапок и в авроральных овалах, где они достигают сотен метров за секунду. В ночных секторах авроральных овалов амплитуды в среднем больше, чем в дневных секторах.

A. V. Bespalova, A. K. Fedorenko

WAVE VELOCITY DISTURBANCES OF NEUTRAL PARTICLES AND IONS IN THE POLAR REGIONS

The wave disturbances of polar ionosphere by measuring the velocity of neutral particles and ions with the use of LEO satellite "Dynamic Explorer 2" are investigated. Amplitudes of the horizontal and vertical components of velocity of neutral particles are tens of metres per second, with maximum values being reached for the most part over the central regions of the polar caps. Vertical velocities of ions almost coincide with vertical velocities of neutral particles. Horizontal velocities of ions are maximal at the borders of the polar caps and in the auroral ovals where they reach hundreds of metres per second. The amplitudes of horizontal ion velocities are on average higher in night sectors of auroral ovals than in daytime sectors. УДК 533.951+551.590.21+550.385+551.510

С. О. Черемных

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

О ПОЛЯРИЗАЦИИ ПОПЕРЕЧНО-МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МГД-МОД В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Теоретически проанализированы поляризационные свойства поперечно-мелкомасштабных ультранизкочастотных собственных МГД-возмущений в дипольном магнитном поле. Получена система уравнений, описывающая альвеновские моды с промежуточной поляризацией. В предельных случаях тороидальных и полоидальных альвеновских мод эта система переходит в полученные ранее системы. Одно из полученных уравнений описывает баллонную неустойчивость.

введение

В рамках изучения ультранизкочастотных МГДволн в магнитосфере Земли, наблюдаемых как с поверхности Земли в виде геомагнитных пульсаций [15], так и с космических аппаратов (КА) в виде квазипериодических вариаций магнитного поля [2], отдельный интерес представляет вопрос об их поляризации. Важность поляризации обусловлена несколькими факторами. Во-первых, это одна из немногих характеристик таких волн, достоверно измеряемых КА [2]. Во-вторых, волны с разной поляризацией имеют разные условия генерации, распространения и затухания [9]. В-третьих, от поляризации волны существенно зависит характер ее взаимодействия с ионосферой [10]. Кроме того, накопленные на сегодняшний день наблюдательные данные и теоретические представления указывают на возможность изменения типа волн [1, 4, 12] и их резонансного взаимодействия [2]. Эти эффекты также сильно зависят от поляризации.

В данной работе решена задача о поляризации поперечно-мелкомасштабных МГД-возмущений в дипольной конфигурации магнитного поля. Такая конфигурация неплохо описывает структуру магнитного поля во внутренней магнитосфере Земли, поэтому полученные результаты будут интерпретироваться с точки зрения МГД-волн в магнитосфере. Общий подход для описания МГД-мод в такой плазме был заложен в работе [8], результаты которой будут использованы ниже. В работах [1, 4, 12] был проведен предварительный анализ поляризационных свойств указанных возмущений, как теоретически, так и на основе анализа спутниковых измерений. В данной работе мы, следуя подходу работы [8], рассмотрим данную задачу более последовательно, чем это было сделано в работах [1, 4, 12], для которых она не являлась основной.

Для сокращения выкладок мы будем приводить все формулы в системе единиц Хевисайда — Лорентца, которая получается введением нормировки

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}^{(\text{CGS})} / \sqrt{4\pi},$$
$$\mathbf{j} = \mathbf{j}^{(\text{CGS})} \frac{\sqrt{4\pi}}{c},$$

где верхним индексом (CGS) обозначены единицы в системе единиц СГС. Эта система единиц удобна тем, что в ней все коэффициенты в уравнениях Максвелла равны единице.

ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим статическое МГД-равновесие плазмы

$$\nabla p = \begin{bmatrix} \mathbf{j} \times \mathbf{B} \end{bmatrix} \tag{1}$$

в дипольном магнитном поле с индукцией

$$\mathbf{B} = [\nabla \boldsymbol{\psi} \times \nabla \boldsymbol{\phi}], \qquad (2)$$

где ψ — полоидальный магнитный поток [8], и тороидальным током **ј**

$$\mathbf{j} \cdot \mathbf{B} = 0 , \ \mathbf{j} \cdot \nabla \boldsymbol{\psi} = 0 . \tag{3}$$

Из выражения (2) следует, что направления векторов $\nabla \psi$, $\nabla \phi$ и **В** являются ортогональными:

$$\mathbf{B} \cdot \nabla \boldsymbol{\Psi} = \mathbf{0} \tag{4}$$

и могут быть использованы в качестве локальной системы координат, введенной на любой магнитной поверхности. Разложим возмущённые величины, например вектор смещения элементарного объёма плазмы **ξ**, по этим ортогональным векторам:

$$\boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{\xi} \frac{\nabla \boldsymbol{\psi}}{\left|\nabla \boldsymbol{\psi}\right|^{2}} + \eta \frac{\nabla \boldsymbol{\phi}}{\left|\nabla \boldsymbol{\phi}\right|^{2}} + \tau \frac{\mathbf{B}}{\left|\mathbf{B}\right|^{2}} =$$
$$= \boldsymbol{\xi} \frac{\nabla \boldsymbol{\psi}}{\left|\nabla \boldsymbol{\psi}\right|^{2}} + \eta \frac{\left[\mathbf{B} \times \nabla \boldsymbol{\psi}\right]}{\left|\mathbf{B}\right|^{2}} + \tau \frac{\mathbf{B}}{\left|\mathbf{B}\right|^{2}}.$$
(5)

Поскольку в состоянии статического равновесия смещений плазмы и электрического поля нет, то, приняв для возмущённых величин зависимость от времени в виде $exp(-i\omega t)$, получаем уравнения малых колебаний в МГД-приближении:

$$\rho\omega^{2}\boldsymbol{\xi} = \nabla\delta p + [\mathbf{b} \times \mathbf{j}] + [\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \mathbf{b}], \qquad (6)$$

$$\nabla \delta p + \boldsymbol{\xi} \cdot \nabla p + \gamma p \operatorname{div} \boldsymbol{\xi} = 0 , \qquad (7)$$

$$\mathbf{b} = \operatorname{rot}[\mathbf{\xi} \times \mathbf{B}]. \tag{8}$$

Здесь **ј**, **В** — равновесные плотность тока и вектор индукции магнитного поля, ρ и *p* — плотность и давление плазмы, δp — возмущение давления, **b** — возмущённое магнитное поле.

Выразив фигурирующие в (6)—(8) возмущенные величины через вектор **ξ**, после некоторых математических преобразований [6], учитывающих геометрию магнитного поля, получим следующую систему уравнений для ультранизкочастотных МГД-возмущений:

$$\rho \frac{\omega^{2}}{\left|\nabla\psi\right|^{2}} \xi + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\left|\nabla\psi\right|^{2}} \mathbf{B} \cdot \nabla \xi\right) + \\ + 2(\delta P_{1} + P'\xi + \gamma P \operatorname{div} \xi) \frac{\kappa \cdot \nabla \psi}{\left|\nabla\psi\right|^{2}} = \frac{\nabla \psi \cdot \nabla \delta P_{1}}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}, \quad (9)$$

$$\rho \frac{\omega^2}{\alpha_s} \eta + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\alpha_s} \mathbf{B} \cdot \nabla \eta \right) = \frac{\nabla \phi \cdot \nabla \delta P_1}{\left| \nabla \phi \right|^2}, \quad (10)$$

$$\omega^2 \tau + \gamma P \mathbf{B} \cdot \nabla \operatorname{div} \boldsymbol{\xi} = 0.$$
 (11)

Здесь δP_1 — возмущение полного давления плазмы

$$\delta P_1 = \delta P + \mathbf{B} \cdot \delta \mathbf{B} =$$

= $-\gamma P \operatorname{div} \boldsymbol{\xi} - |\mathbf{B}|^2 (\operatorname{div} \boldsymbol{\xi}_\perp + 2\boldsymbol{\kappa} \cdot \boldsymbol{\xi}), \qquad (12)$

 κ — вектор кривизны силовых линий магнитного поля, $\alpha_s = |\mathbf{B}|^2 / |\nabla \psi|^2$, а штрих означает производную поперек магнитной поверхности, $(\cdot)' = d(\cdot) / d\psi$.

Уравнения (9)—(11) описывают МГД-возмущения идеальной плазмы в дипольном магнитном поле и не накладывают никаких ограничений на давление, ток и электромагнитное поле. С точностью до обозначений они совпадают с уравнениями работ [6, 8].

РЕДУКЦИЯ УРАВНЕНИЙ

Следуя работе [8], рассмотрим поперечно-мелкомасштабные возмущения, т. е. возмущения вида

$$\boldsymbol{\xi}(\mathbf{r},t) = \hat{\boldsymbol{\xi}}(\mathbf{r}) \exp(-i\omega t + i\chi(\mathbf{r})/\varepsilon) . \qquad (13)$$

Здесь є — малый параметр, описывающий поперечный масштаб возмущений, χ — эйконал, удовлетворяющий условию $\mathbf{k}_{\perp} \cdot \mathbf{B} = 0$, где $\mathbf{k}_{\perp} = \nabla \chi$. Фигурирующие в (9)—(11) величины div $\boldsymbol{\xi}$ и δP_1 для возмущений типа (13) принимают вид

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\xi} = \left[\frac{i}{\varepsilon} (\mathbf{k}_{\perp} \cdot \hat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp}) + \operatorname{div} \hat{\boldsymbol{\xi}}\right] \exp(-i\omega t + i\chi(\mathbf{r})/\varepsilon), \quad (14)$$
$$\delta P_{1} = -\left[\frac{i}{\varepsilon} (\gamma P + |\mathbf{B}|^{2})(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \hat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp}) + \delta \widehat{P}_{1}\right] \times \exp(-i\omega t + i\chi(\mathbf{r})/\varepsilon), \quad (15)$$

$$\delta \widehat{P}_{1} = \gamma P \operatorname{div} \widehat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp} + \left| \mathbf{B} \right|^{2} \left(\operatorname{div} \widehat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp} + 2\kappa \cdot \widehat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp} \right). \quad (16)$$

Подставляя (14)—(16) в (9)—(11), получаем

$$\rho \frac{\omega^{2} \hat{\xi}}{\left|\nabla \psi\right|^{2}} + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\left|\nabla \psi\right|^{2}} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\xi}\right) + 2(-\delta P_{1} + P' \hat{\xi} + \gamma P \operatorname{div} \hat{\xi}) \frac{\kappa \cdot \nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}} =$$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

$$= (\gamma P + |\mathbf{B}|^{2}) \frac{(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi)}{|\nabla \psi|^{2}} \frac{(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \boldsymbol{\xi}_{\perp})}{\varepsilon^{2}} - \frac{\nabla \psi \cdot \nabla \delta P_{1}}{|\nabla \psi|^{2}} - 2(\gamma P + |\mathbf{B}|^{2})(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \hat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp})(\kappa \cdot \nabla \psi)] - \frac{i}{|\nabla \psi|^{2}} [(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi) \delta \hat{P}_{1} + \nabla \psi \cdot \nabla [(\gamma P + |\mathbf{B}|^{2}) \cdot (\mathbf{k}_{\perp} \cdot \hat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp})], \quad (17)$$
$$\rho \frac{\omega^{2}}{\alpha_{s}} \hat{\eta} + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\alpha_{s}} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\eta}\right) = \frac{(\gamma P + |\mathbf{B}|^{2}) \frac{(\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi])}{|\mathbf{B}|^{2}} \frac{(\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi])}{\varepsilon^{2}} - \frac{[\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^{2}} \cdot \nabla \delta \hat{P}_{1} - \frac{i}{\varepsilon |\mathbf{B}|^{2}} [(\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi]) \delta \hat{P}_{1} + ([\mathbf{B} \times \nabla \psi] \cdot \nabla) [(\gamma P + |\mathbf{B}|^{2})(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \hat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp})]], \quad (18)$$

$$\rho \omega^2 \hat{\tau} + \gamma P \mathbf{B} \cdot \nabla \operatorname{div} \hat{\boldsymbol{\xi}} = 0.$$
 (19)

Заметим, что в уравнениях (17), (18) есть слагаемые разного порядка малости. Поскольку частота колебаний должна быть существенно меньше гирочастоты ионов (иначе перестанет выполняться приближение МГД), то члены, содержащие ω^2 , будут иметь нулевой порядок по є. Поэтому большие слагаемые, пропорциональные ε^{-2} и ε^{-1} , необходимо в указанных уравнениях исключить, налагая на эйконал и возмущенные величины некоторые условия. Следует также отметить, что из тех же соображений применимости приближения МГД параметр ε не может быть слишком малым, чтобы поперечный масштаб возмущений не стал сравним с гирорадиусом ионов.

Приравнивая в (17), (18) слагаемые порядка $1/\epsilon^2$ к нулю, получаем

$$\mathbf{k}_{\perp} \cdot \hat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp} = \hat{\boldsymbol{\xi}} \frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \boldsymbol{\psi}}{\left| \nabla \boldsymbol{\psi} \right|^2} + \hat{\boldsymbol{\eta}} \frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \boldsymbol{\psi}]}{\left| \mathbf{B} \right|^2} = 0.$$
(20)

Обращение в ноль слагаемых порядка 1/є приводит к уравнению

$$\frac{\delta \hat{P}_{1}}{\left|\mathbf{B}\right|^{2}} = \beta \operatorname{div} \hat{\boldsymbol{\xi}} + \operatorname{div} \hat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp} + 2\kappa \cdot \hat{\boldsymbol{\xi}}_{\perp} = 0, \qquad (21)$$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

которое мы перепишем в виде

$$\operatorname{div}\hat{\boldsymbol{\xi}} = \frac{1}{1+\beta} \left[\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\hat{\boldsymbol{\tau}}}{\left| \mathbf{B} \right|^2} \right) - 2\boldsymbol{\xi} \frac{\boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla \boldsymbol{\psi}}{\left| \nabla \boldsymbol{\psi} \right|^2} \right], \quad (22)$$

где $\beta = \gamma P / |\mathbf{B}|^2$. Уравнение (22) описывает сжимаемость возмущений.

Оставшиеся в (9)—(11) члены порядка ε^0 приводят к уравнениям

$$\rho \frac{\omega^{2} \hat{\xi}}{|\nabla \psi|^{2}} + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{|\nabla \psi|^{2}} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\xi} \right) + 2(P' \hat{\xi} + \gamma P \operatorname{div} \hat{\xi}) \frac{\kappa \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^{2}} = 0, \quad (23)$$

$$\rho \frac{\omega^2}{\alpha_s} \hat{\eta} + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\alpha_s} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\eta} \right) = 0, \qquad (24)$$

$$\rho\omega^{2}\hat{\tau} + \gamma P\mathbf{B} \cdot \nabla \operatorname{div} \hat{\boldsymbol{\xi}} = 0.$$
 (25)

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ

Как было показано в работе [4], направление вектора \mathbf{k}_{\perp} совпадает с направлением возмущённого электрического поля волны. Следовательно, вектор \mathbf{k}_{\perp} определяет поляризацию возмущений.

Положим в полученных уравнениях $\mathbf{k}_{\perp} \| \nabla \psi$. Тогда $\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{b}_{\perp}|^2} = \frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \phi}{|\mathbf{b}_{\perp}|^2} = 0, \quad (26)$

$$|\mathbf{B}|$$
 $|\nabla \phi|$
откуда с учетом (12—16) получаем $\hat{\boldsymbol{\xi}} = 0$, $\hat{\boldsymbol{\tau}} = 0$,
 $\hat{\boldsymbol{\eta}} \neq 0$, div $\hat{\boldsymbol{\xi}} = 0$. Амплитуда $\hat{\boldsymbol{\eta}}$ удовлетворяет
уравнению

$$\rho \frac{\omega^2}{\alpha_s} \hat{\eta} + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\eta}}{\alpha_s} \right) = 0 , \qquad (27)$$

впервые приведенному в работе [6], и описывает тороидальные альвеновские моды.

Если же положить $\mathbf{k}_{\perp} \| [\mathbf{B} \times \nabla \psi]$, то

$$\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \Psi}{\left| \nabla \Psi \right|^2} = 0.$$
⁽²⁸⁾

В этом случае $\hat{\eta} = 0$, $\hat{\xi} \neq 0$ и $\hat{\tau} \neq 0$, а амплитуды $\hat{\xi}$ и $\hat{\tau}$ удовлетворяют уравнениям

$$\rho \frac{\omega^{2} \hat{\xi}}{\left|\nabla \psi\right|^{2}} + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\left|\nabla \psi\right|^{2}} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\xi}\right) + 2(P'\hat{\xi} + \gamma P \operatorname{div} \hat{\xi}) \frac{\kappa \cdot \nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}} = 0, \qquad (29)$$

59

$$\rho\omega^{2}\hat{\tau} + \gamma P\mathbf{B} \cdot \nabla \operatorname{div} \hat{\boldsymbol{\xi}} = 0 , \qquad (30)$$

div
$$\hat{\boldsymbol{\xi}} = \frac{1}{1+\beta} \left[\boldsymbol{B} \cdot \nabla \left(\frac{\boldsymbol{\tau}}{\left| \boldsymbol{B} \right|^2} \right) - 2\hat{\boldsymbol{\xi}} \frac{\boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla \boldsymbol{\Psi}}{\left| \nabla \boldsymbol{\Psi} \right|^2} \right]$$
 (31)

и описывают полоидальную компрессионную альвеновскую моду [8, 14].

Эти два предельных случая подробно рассматривались ранее в работе [8]. Более интересно рассмотреть случай, когда поперечное электрическое поле направлено под углом к магнитной поверхности. Это означает, что обе проекции вектора \mathbf{k}_{\perp} как на тороидальное, так и полоидальное направления отличны от нуля:

$$\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \Psi]}{|\mathbf{B}|^2} \neq 0,$$
$$\frac{\mathbf{\kappa}_{\perp} \cdot \nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^2} \neq 0.$$
(32)

В данном случае будут реализовываться смешанные моды [2].

Используя два равенства

$$\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \right) = 0,$$
$$\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = 0, \qquad (33)$$

вывод которых приведен в Приложении, и очевидное из них следствие

$$\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi}{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi]} \boldsymbol{\alpha}_{s} \right) = 0 , \qquad (34)$$

приведём уравнения (23), (24) к несколько иному виду. Умножив уравнение (23) на $\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi$, а

уравнение (24) — на $\mathbf{k}_{\perp} \cdot \left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \right]$ и сложив их, получим

$$(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi) \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{|\nabla \psi|^{2}} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\xi} \right) +$$
$$+ 2(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi) (P'\hat{\xi} + \gamma P \operatorname{div} \hat{\xi}) \frac{\mathbf{\kappa} \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^{2}} -$$
$$- \frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\nabla \psi|^{2}} \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi}{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi]} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\xi} \right) = 0. \quad (35)$$

При получении (35) использовалось равенство

$$\frac{1}{\alpha_s} \mathbf{B} \cdot \hat{\nabla \eta} = -\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi}{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi]} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\xi} , \qquad (36)$$

вытекающее из (20) и (33). Последнее слагаемое в (35) преобразуем с учётом (34) следующим образом:

$$\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \boldsymbol{\psi}]}{|\nabla \boldsymbol{\psi}|^{2}} \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \boldsymbol{\psi}}{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \boldsymbol{\psi}]} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\boldsymbol{\xi}} \right) =$$

$$= \frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \boldsymbol{\psi}]}{|\nabla \boldsymbol{\psi}|^{2}} \alpha_{s} \frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \boldsymbol{\psi}}{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \boldsymbol{\psi}]} \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{\alpha_{s}} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\boldsymbol{\xi}} \right) =$$

$$= (\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \boldsymbol{\psi}) \left[\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{|\nabla \boldsymbol{\psi}|^{2}} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\boldsymbol{\xi}} \right) - \frac{1}{\alpha_{s}} (\mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\boldsymbol{\xi}}) \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\alpha_{s}}{|\nabla \boldsymbol{\psi}|^{2}} \right) \right]. \quad (37)$$

Подставляя (27) в (26), получаем искомое уравнение

$$2(P'\hat{\xi} + \gamma P \operatorname{div} \hat{\xi}) \frac{\mathbf{\kappa} \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} + \frac{1}{\alpha_s} (\mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\xi}) \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\alpha_s}{|\nabla \psi|^2}\right) = 0.$$
(38)

Для получения второго уравнения перепишем уравнения (23) и (24) с учётом (36) в виде

$$\rho \frac{\omega^{2} \hat{\xi}}{|\nabla \psi|^{2}} + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{1}{|\nabla \psi|^{2}} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\xi} \right) + + 2(P' \hat{\xi} + \gamma P \operatorname{div} \hat{\xi}) \frac{\mathbf{\kappa} \cdot \nabla \psi}{|\nabla \psi|^{2}} = 0,$$
(39)
$$\rho \omega^{2} \frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi}{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi]} \hat{\xi} +$$

$$+\mathbf{B}\cdot\nabla\left(\frac{\mathbf{k}_{\perp}\cdot\nabla\psi}{\mathbf{k}_{\perp}\cdot[\mathbf{B}\times\nabla\psi]}\mathbf{B}\cdot\nabla\hat{\xi}\right)=0.$$
 (40)

Умножив (40) на $\alpha_s(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi)/(\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi])$ и сложив с (39), после простых алгебраических преобразований получаем второе уравнение:

$$\frac{\rho\omega^{2}\hat{\xi}}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\left[1 + \left(\frac{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot[\mathbf{B}\times\nabla\psi])}\right)^{2}\right] + \mathbf{B}\cdot\nabla\left(\frac{1}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\left[1 + \left(\frac{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot[\mathbf{B}\times\nabla\psi])}\right)^{2}\right]\mathbf{B}\cdot\nabla\hat{\xi}\right] + \mathbf{B}\cdot\nabla\left(\frac{1}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\left[1 + \left(\frac{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)}\right)^{2}\right]\mathbf{B}\cdot\nabla\psi\right] + \mathbf{B}\cdot\nabla\left(\frac{1}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\left[1 + \left(\frac{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)}\right)^{2}\right]\mathbf{B}\cdot\nabla\psi\right] + \mathbf{B}\cdot\nabla\psi\left(\frac{1}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\left[1 + \left(\frac{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)}\right]\mathbf{B}\cdot\nabla\psi\right] + \mathbf{B}\cdot\nabla\psi\left(\frac{1}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\left[1 + \left(\frac{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)}\right]\mathbf{B}\cdot\nabla\psi\right] + \mathbf{B}\cdot\nabla\psi\left(\frac{1}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\left[1 + \left(\frac{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)}\right]\mathbf{B}\cdot\nabla\psi\right] + \mathbf{B}\cdot\nabla\psi\left(\frac{1}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\left[1 + \left(\frac{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)}\right]\mathbf{B}\cdot\nabla\psi\right] + \mathbf{B}\cdot\nabla\psi\left(\frac{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)}\right]\mathbf{B}\cdot\nabla\psi\left(\frac{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{A}\cdot\nabla\psi)}\right] + \mathbf{B}\cdot\nabla\psi\left($$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

$$+2(P'\hat{\xi}+\gamma P\operatorname{div}\hat{\xi})\frac{\mathbf{\kappa}\cdot\nabla\Psi}{\left|\nabla\Psi\right|^{2}}=0.$$
 (41)

Уравнения в виде (41) были получены в работах [1, 3, 12] и исследованы в работах [1, 4]. Если в уравнении (41) положить $(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi) |\mathbf{B}| / (\mathbf{k}_{\perp} \times (\mathbf{B} \times \nabla \psi))^2 \rightarrow 0$, то оно переходит в (29) и описывает полоидальные компрессионные альвеновские моды. В пределе $(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi) |\mathbf{B}| / (\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi])^2 \rightarrow \infty$ из (41) получаем уравнение

$$\rho \omega^{2} \hat{\xi} \alpha_{s} \frac{(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi)^{2}}{(\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi])^{2}} + \mathbf{B} \cdot \nabla \left(\alpha_{s} \frac{(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \nabla \psi)^{2}}{(\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi])^{2}} \mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\xi} \right) = 0, \quad (42)$$

которое с помощью уравнений (20) и (36) приводится к уравнению (27) и описывает тороидальные альвеновские моды.

Таким образом, система уравнений (22), (25), (38), (42) справедлива для любых значений \mathbf{k}_{\perp} и с учетом равенств (33), (34) описывает все возможные поперечно-мелкомасштабные моды в дипольной геометрии магнитного поля.

АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ

Уравнение (41) с учётом (38) можно представить также в виде

$$\frac{\rho\omega^{2}\hat{\xi}}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\left[1+\left(\frac{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{\mathbf{k}_{\perp}\cdot[\mathbf{B}\times\nabla\psi]}\right)^{2}\right]+ \mathbf{B}\cdot\nabla\left(\frac{1}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\left[1+\left(\frac{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{\mathbf{k}_{\perp}\cdot[\mathbf{B}\times\nabla\psi]}\right)^{2}\right]\mathbf{B}\cdot\nabla\hat{\xi}\right)- -\frac{1}{\alpha_{s}}(\mathbf{B}\cdot\nabla\hat{\xi})\mathbf{B}\cdot\nabla\left(\frac{\alpha_{s}}{\left|\nabla\psi\right|^{2}}\right)=0.$$
(43)

Фигурирующая в этом уравнении величина $\mathbf{B} \cdot \nabla \hat{\xi}$ связана с давлением и кривизной силовых линий уравнением (38). Поэтому уравнение (43) учитывает эффекты, квадратичные по давлению, и, таким образом, описывает баллонные возмущения [8, 11].

Если же в уравнении (38) положить давление равным нулю, то из (43) и (20) мы получим $\hat{\boldsymbol{\xi}} = 0$, т. е. такие возмущения не реализуются.

Система (22), (25), (38), (42) содержит три неизвестные функции $\hat{\boldsymbol{\xi}}$, $\hat{\boldsymbol{\tau}}$ и $\boldsymbol{\chi}$ и три уравнения.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

Поэтому решение этой системы реализуется при определенных значениях χ . Ранее, например в работах [1, 4, 12], вопрос о влиянии поляризации на спектр возмущений рассматривался для произвольной функции χ . Это было обусловлено тем обстоятельством, что уравнение (38) в этих работах отсутствовало. Оно было получено в работе [7] как предельный случай с использованием довольно сложного математического аппарата. В данной работе это уравнение выведено для изначально заданного дипольного магнитного поля и с разъяснением всех тонкостей его получения для рассматриваемой геометрии магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован вопрос о генерации собственных поперечно-мелкомасштабных МГДмод в магнитосферной плазме. Основная цель исследования состояла в получении и анализе системы уравнений, описывающих указанные возмущения и, в первую очередь, их поляризацию в рамках модели дипольного магнитного поля.

Получена система уравнений

$$\begin{split} \frac{\rho\omega^{2}\hat{\xi}}{\left|\nabla\psi\right|^{2}} \Bigg[1 + \Bigg(\frac{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot[\mathbf{B}\times\nabla\psi])}\Bigg)^{2} \Bigg] + \\ + \mathbf{B}\cdot\nabla\Bigg(\frac{1}{\left|\nabla\psi\right|^{2}} \Bigg[1 + \Bigg(\frac{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot\nabla\psi)|\mathbf{B}|}{(\mathbf{k}_{\perp}\cdot[\mathbf{B}\times\nabla\psi])}\Bigg)^{2} \Bigg] \mathbf{B}\cdot\nabla\hat{\xi} \Bigg) + \\ \frac{2\Bigg(P'\hat{\xi} + \gamma P\frac{1}{1+\beta}\Bigg[\mathbf{B}\cdot\nabla\Bigg(\frac{\hat{\tau}}{|\mathbf{B}|^{2}}\Bigg) - 2\hat{\xi}\frac{\boldsymbol{\chi}\cdot\nabla\psi}{|\nabla\psi|^{2}}\Bigg]\Bigg)}{|\nabla\psi|^{2}} \times \\ \times(\boldsymbol{\chi}\cdot\nabla\psi) = 0, \\ 2\Bigg\{P'\hat{\xi} + \gamma P\frac{1}{1+\beta}\Bigg[\mathbf{B}\cdot\nabla\Bigg(\frac{\hat{\tau}}{|\mathbf{B}|^{2}}\Bigg) - 2\hat{\xi}\frac{\boldsymbol{\chi}\cdot\nabla\psi}{|\nabla\psi|^{2}}\Bigg]\Bigg\}\frac{\boldsymbol{\chi}\cdot\nabla\psi}{|\nabla\psi|^{2}} + \\ &+\frac{1}{\alpha_{s}}(\mathbf{B}\cdot\nabla\hat{\xi})\mathbf{B}\cdot\nabla\Bigg(\frac{\alpha_{s}}{|\nabla\psi|^{2}}\Bigg) = 0, \\ \rho\omega^{2}\hat{\tau} + \gamma P\mathbf{B}\cdot\nabla\frac{1}{1+\beta}\Bigg[\mathbf{B}\cdot\nabla\Bigg(\frac{\hat{\tau}}{|\mathbf{B}|^{2}}\Bigg) - 2\hat{\xi}\frac{\boldsymbol{\chi}\cdot\nabla\psi}{|\nabla\psi|^{2}}\Bigg] = 0, \end{split}$$

описывающая альвеновские моды с промежуточной поляризацией. В предельных случаях тороидальных и полоидальных альвеновских мод эта система переходит в полученные ранее уравнение (27) и систему (29)—(31) соответственно.

Второе уравнение этой системы описывает баллонную неустойчивость.

Установлено, что в приближении холодной плазмы реализуются возмущения только с двумя поляризациями — полоидальные и тороидальные альвеновские моды.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для доказательства равенств (33) используем векторное уравнение

$$\mathbf{a} \cdot \nabla (\mathbf{b} \cdot \nabla c) = \mathbf{b} \cdot \nabla (\mathbf{a} \cdot \nabla c) +$$

+ \nabla \cdot \cdot

с помощью которого находим

$$\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \right) = \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \cdot \nabla (\mathbf{B} \cdot \mathbf{k}_{\perp}) + \mathbf{k}_{\perp} \cdot \left(\mathbf{B} \operatorname{div} \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} - \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \operatorname{div} \mathbf{B} - \operatorname{rot} \left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \right] \right) = -\mathbf{k}_{\perp} \cdot \operatorname{rot} \left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \right]. (\Pi. 2)$$

При получении (п. 2) было учтено, что $\mathbf{k}_{\perp} = \nabla \chi$. Разложим вектор rot $[\mathbf{B} \times \nabla \psi / |\nabla \psi|^2]$ по ортогональным направлениям $\nabla \psi$, $[\mathbf{B} \times \nabla \psi]$ и **B**

$$\operatorname{rot}\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}}\right] = \frac{\nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}} \left(\nabla \psi \cdot \operatorname{rot}\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}}\right]\right) + \frac{\mathbf{B}}{\left|\mathbf{B}\right|^{2}} \left(\mathbf{B} \cdot \operatorname{rot}\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}}\right]\right) + \frac{\left[\mathbf{B} \times \nabla \psi\right]}{\left|\mathbf{B}\right|^{2} \left|\nabla \psi\right|^{2}} \left[\left[\mathbf{B} \times \nabla \psi\right] \cdot \operatorname{rot}\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}}\right]\right). \quad (\Pi. 3)$$

Преобразуем слагаемые в правой части выражения, используя векторное равенство div $[\mathbf{a} \times \mathbf{b}] =$ = **b** · rot **a** – **a** · rot **b**. В результате получаем

$$\operatorname{rot}\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}}\right] =$$

$$= \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^{2}} \left(\operatorname{div} \left(\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^{2}} \right] \times \mathbf{B} \right) + \left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^{2}} \right] \cdot \operatorname{rot} \mathbf{B} \right) + \frac{|\mathbf{B} \times \nabla \psi|}{|\mathbf{B}|^{2} |\nabla \psi|^{2}} s + \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^{2}} \operatorname{div} \left(\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^{2}} \right] \times \nabla \psi \right). \quad (\pi. 4)$$

Фигурирующая в (п. 4) величина *s* описывает эффект перекрещенности силовых линий магнитного поля — шир

$$s = [\mathbf{B} \times \nabla \psi] \cdot \operatorname{rot} \left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \right].$$
 (п. 5)

Упростим выражение (п. 4) с помощью несложных векторных преобразований

$$\operatorname{div}\left(\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}}\right] \times \nabla \psi\right) =$$
$$= \operatorname{div}\left(\mathbf{B}\left(\frac{\nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}} \cdot \nabla \psi\right) - \frac{\nabla \psi}{\left|\nabla \psi\right|^{2}} \left(\mathbf{B} \cdot \nabla \psi\right)\right) =$$
$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \qquad (\pi. 6)$$

$$\frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^{2}} \operatorname{div} \left(\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \right] \times \mathbf{B} \right) =$$

$$= \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^{2}} \operatorname{div} \left(\mathbf{B} \left(\mathbf{B} \cdot \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \right) - \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \left(\mathbf{B} \cdot \mathbf{B} \right) \right) =$$

$$= \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^{2}} \operatorname{div} \left(\frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \left(\mathbf{B} \cdot \mathbf{B} \right) \right) = \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^{2}} \operatorname{div} (\nabla \Psi \alpha_{s}), \quad (\Pi. 7)$$

$$\frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^{2}} \left(\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \right] \cdot \operatorname{rot} \mathbf{B} \right) = \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^{2}} \left(\mathbf{j} \cdot \left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \right] \right) =$$

$$= \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^{2}} \left([\mathbf{j} \times \mathbf{B}] \cdot \frac{\nabla \Psi}{|\nabla \Psi|^{2}} \right) = \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^{2}} P'. \quad (\Pi. 8)$$

Следовательно,

$$\operatorname{rot}\left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^{2}}\right] = \left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^{2}}\right]s + \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^{2}}(P' + \operatorname{div}(\alpha_{s} \cdot \nabla \psi)). \quad (\pi. 9)$$

Подставляя (п.9) в (п.2), находим

$$\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \frac{\nabla \Psi}{\left| \nabla \Psi \right|^{2}} \right) = -\mathbf{k}_{\perp} \cdot \left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \Psi}{\left| \nabla \Psi \right|^{2}} \right] s. \qquad (\pi. 10)$$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

Покажем, что в рассматриваемой дипольной геометрии магнитного поля s = 0. Для этого используем выражение

$$\nabla \phi = \left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{\left| \nabla \psi \right|^2} \right], \qquad (\pi. \ 11)$$

следующее из (2). Подставив в (п. 11) выражение (п. 5) для шира *s*, убеждаемся, что последний обращается в ноль:

$$s = [\mathbf{B} \times \nabla \psi] \cdot \operatorname{rot} \left[\mathbf{B} \times \frac{\nabla \psi}{|\nabla \psi|^2} \right] =$$
$$= |\nabla \psi|^2 \nabla \phi \cdot \operatorname{rot}(\nabla \phi) = 0. \qquad (\pi. 12)$$

Из (п. 12) и (п. 10) получаем первое уравнение в (33).

Для доказательства второго равенства в (33) используем, как и выше, уравнение (п. 1). Тогда из цепочки равенств

$$\mathbf{B} \cdot \nabla \left(\frac{\mathbf{k}_{\perp} \cdot [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\nabla \psi|^2} \right) = \mathbf{k}_{\perp} \cdot \left(\mathbf{B} \cdot \operatorname{div} \left(\frac{[\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) \right) - \frac{-\mathbf{k}_{\perp} \left(\frac{[\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \operatorname{div} \mathbf{B} \right) - \frac{-\operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) \cdot \mathbf{k}_{\perp} + \frac{[\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\nabla \psi|^2} \cdot \nabla (\mathbf{B} \cdot \mathbf{k}_{\perp}) = \frac{-\mathbf{k}_{\perp} \cdot \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{-\mathbf{k}_{\perp} \cdot \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{-\mathbf{k}_{\perp} \cdot \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{-\mathbf{k}_{\perp} \cdot \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{-\mathbf{k}_{\perp} \cdot \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{-\mathbf{k}_{\perp} \cdot \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{-\mathbf{k}_{\perp} \cdot \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{-\mathbf{k}_{\perp} \cdot \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{-\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \nabla \psi]}{|\mathbf{B}|^2} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \operatorname{rot} \left(\frac{\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times [\mathbf{B} \times \mathbf{B} \right) = \frac{\mathbf{B} \times \mathbf{B} \times \mathbf{B$$

 $= \mathbf{k}_{\perp} \cdot \operatorname{rot}(\nabla \psi) = 0 \qquad (\pi. 13)$

получаем указанное уравнение.

Автор выражает благодарность А.С.Парновскому за обсуждение результатов работы и помощь в их оформлении. Работа выполнена при поддержке ДФФД (грант № Ф53/177-2013).

1. Агапитов А. В., Парновский А. С., Черемных О. К. Спектр поперечно-мелкомасштабных возмущений

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

во внутренней магнитосфере Земли // Кинематика и физика небес. тел. — 2006. — **22**, № 6. — С. 387—401.

- 2. Агапитов А. В., Черемных О. К. Поляризация резонансных УНЧ-возмущений в магнитосфере Земли // Кинематика и физика небес. тел. 2011. 27, № 3. С. 17—27.
- 3. *Мазур Н. Г., Федоров Е. Н., Пилипенко В. А.* Дисперсионное соотношение для баллонных мод и условие их устойчивости в околоземной плазме // Геомагнетизм и аэрономия. — 2012. — **52**, № 5. — С. 1—10.
- 4. Парновский А. С., Черемных О. К. Спектр баллонных возмущений с произвольной поляризацией во внутренней магнитосфере Земли // Космічна наука і технологія. 2006. **12**, № 1/2. С. 49—56.
- Agapitov A. V., Cheremnykh O. K., Parnowski A. S. Ballooning perturbations in the inner magnetosphere of the Earth: spectrum, stability and eigenmode analysis // Adv. Space Res. 2008. 41, N 10. P. 1682–1687.
- Cheng C. Z., Chang T. C., Lin C. A., Tsai W. H. Magnetohydrodynamic theory of field line resonances in the magnetosphere // J. Geophys. Res. – 1993. – 98, N A7. – P. 11339–11347.
- Cheremnykh O. K., Danilova V. V. Transversal small-scale MHD perturbations in space plasma with magnetic surfaces // Kinematics and Physics of Celectial Bodies. – 2011. – 27, N 2. – P. 98–108.
- Cheremnykh O. K., Parnowski A. S., Burdo O. S. Ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth // Planet. Space Sci. – 2004. – 55, N 13. – P. 1217–1229.
- Cheremnykh S. O., Agapitov O. V. MHD waves in the plasma system with dipole magnetic field configuration // Adv. Astron. Space Phys. – 2012. – 2. – P. 103–106.
- Hameiri E., Kivelson M. G. Magnetospheric Waves and the Atmosphere-Ionosphere Layer // J. Geophys. Res. – 1991. – 96, N A12. – P. 21125–21134.
- Hameiri E., Laurence P., Mond M. The ballooning instability in space plasmas // J. Geophys. Res. 1991. 96. – P. 1513–1518.
- Klimushkin D. Yu. Theory of azimutally small-scale hydromagnetic waves in the axisymmetric magnetosphere with finite plasma pressure // Ann. geophys. 1998. 16. P. 303—321.
- Parnowski A. S. Eigenmode analysis of ballooning perturbations in the inner magnetosphere of the Earth // Ann. geophys. 2007. 25, N 1. P. 1391–1403.
- Pokhotelov O. A., Pilipenko V. A. Drift anisotropy instability of finite-β // Planet. Space Sci. – 1985. – 33. – P. 1229–1241.
- Stewart B. On the great magnetic disturbance which extended from August 28 to September 7, 1859, as recorded by photography at the Kew Observatory // Phil. Trans. Roy. Soc. 1861. 151. P. 423—430

Статья поступила в редакцию 26.07.13

С. О. Черемних

ПРО ПОЛЯРИЗАЦІЮ ПОПЕРЕЧНО-ДРІБНОМАСШТАБНИХ МГД-МОД У МАГНІТОСФЕРІ ЗЕМЛІ

Теоретично проаналізовано поляризаційні властивості поперечно-дрібномасштабних ультранизькочастотних власних МГД-збурень в дипольному магнітному полі. Отримано систему рівнянь, що описує альвенівські моди з проміжною поляризацією. У граничних випадках тороїдальних і полоїдальних альвенівських мод ця система переходить в отримані раніше системи. Одне з отриманих рівнянь описує балонну нестійкість.

S. O. Cheremnykh

ON THE POLARIZATION OF TRANSVERSALLY SMALL-SCALE MHD MODES IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE

We present a theoretical analysis of polarization properties of transversally small-scale ultra-low-frequency MHD eigenmode perturbations in the dipolar magnetic field. A set of equations is derived describing Alfvén modes with intermediate polarization. In the toroidal and poloidal limits the set of equations reduces to previously derived sets. One of the obtained equations describes the ballooning instability. УДК 58/.057. 001.6: 167.1

Є. Л. Кордюм Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, Київ

БІОЛОГІЯ РОСЛИН В КОСМОСІ: НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПРОБЛЕМИ

Розглядаються сучасні тенденції досліджень в галузі космічної та гравітаційної біології рослин у країнах, які є членами Міжнародної робочої групи з наук про життя в космосі, наводяться приклади обладнання для проведення космічних і наземних експериментів та обладнання, що розробляється. Підкреслюється, що актуальна ідея використання рослин як необхідних компонентів біорегенеративних систем життєзабезпечення космонавтів у тривалих міжпланетних польотах ще дуже далека від практичного втілення, що потребує створення космічних оранжерей достатнього об'єму, постановки космічних експериментів для відпрацювання технологій зеленого конвеєра на борту космічних апаратів та проведення генетикоселекційних робіт з метою одержання сортів сільськогосподарських культур, адаптованих до умов космічного польоту.

У серпні 2012 р. у м. Фрайбург (Німеччина) відбувся Симпозіум «Біологія рослин в космосі», організований Міжнародною робочою групою з наук про життя в космосі (космічна біологія та медицина) разом з Федерацією європейських товариств з біології рослин (FESPB) і Європейською організацією з наук про рослини (EPSO) з метою аналізу та обговорення наукових досягнень і визначення нагальних наукових питань та технічних можливостей сьогодення та майбутнього за участю майже 50 провідних експертів в цій галузі. До групи входять вісім провідних космічних агентств світу: НАСА (NASA) США, Європейське космічне агентство (ESA), Національні космічні агентства Канади (CSA), Франції (CNES), Німеччини (DLR), Італії (ASI), Японії (JAXA), Державне космічне агентство України (SSAU) (рис. 1). Головна мета діяльності групи, яку було організовано в 1991 р., — стимулювати міжнародне співробітництво та координацію досліджень в галузі космічних наук про життя, сприяти ефективному використанню космічних апаратів і Міжнародної космічної станції.

Оскільки на Симпозіумі відбулися презентації агентств — членів групи про основні напрямки фундаментальних досліджень в галузі біології

© Є. Л. КОРДЮМ, 2013

рослин в космосі та рішення прикладних завдань вирощування сільськогосподарських культур у тривалих космічних подорожах на Марс, перебування на Місяці (місячні бази) в країнах, які вони представляють, мені хотілося б поділитися з читачами журналу новою інформацією та своїми думками в цих напрямах.

ДІЯЛЬНІСТЬ КОСМІЧНИХ АГЕНТСТВ— ЧЛЕНІВ ГРУПИ В ГАЛУЗІ КОСМІЧНОЇ ТА ГРАВІТАЦІЙНОЇ БІОЛОГІЇ РОСЛИН

СNES (Франція) продовжує сприяти дослідженням механізмів гравічутливості рослин, автоморфогенезу та протеомного профілю проростків в умовах мікрогравітації, впливу зміненої гравітації на перерозподіл іонів кальцію та переміщення амілопластів у гравірецепторних клітинах — статоцитах. Підкреслюється, що найважливішим для фундаментальних і прикладних досліджень з метою вирощування сільськогосподарських культур в тривалих польотах, подорожах до Місяця та Марса є з'ясування взаємодії шляхів сигналінгу сприйнятого гравітаційного стимулу з гормональним комплексом.

Поточна космічна програма з наук про життя в космосі DLR (Німеччина) під керівництвом Німецького аерокосмічного центру складається з трьох основних розділів: 1) вивчення природи,



Рис. 1. Емблеми членів Міжнародної робочої групи з наук про життя в космосі

2) покращення здоров'я, 3) розвідка. Дослідження першого розділу спрямовані на пізнання впливу гравітації на живі системи та її ролі в еволюції, в цьому контексті вони є завжди пріоритетними в програмі. Другий розділ включає дослідження реакцій різних систем тіла людини та їхню взаємодію від впливом різних гравітаційних навантажень. Оскільки зміни здоров'я космонавтів в умовах мікрогравітації подібні до таких у людей похилого віку, результати космічних експериментів особливо важливі для суспільства, яке старіє. Третій розділ до деякої міри є новим у Програмі з наук про життя як частина досліджень космосу у масштабах світу, що відбуваються та плануються в наш час. Для виконання Програми адміністрація Центру забезпечує необхідну інфраструктуру та польотні можливості, укладає контракти з промисловістю для створення дослідницького обладнання та здійснює додаткове фінансування наукових колективів університетів та інших дослідницьких інститутів. Наголошується, що вчені та промисловість Німеччини відіграють провідну роль в дослідженнях біології рослин у космосі.

Європейське космічне агентство (ЕКА) здійснює організацію досліджень в галузі гравітаційної біології рослин у тривалих та короткочасних космічних і наземних експериментах. На борту МКС тепер перебуває обладнання трьох типів для проведення експериментів з космічної біології — KUBIK, EMCS и BIOLAB, які забезпечують контрольовані умови температури, рівня гравітації, складу атмосфери, освітлення та відеозйомку. Наприклад, у модульному інкубаторі/ холодильнику KUBIK проведено приблизно 30 космічних експериментів на МКС в Російському сегменті та Європейському модулі «Columbus». Короткочасні експерименти з метою вивчення впливу мікрогравітації на рослини in vivo та in vitro протягом хвилин або секунд провадяться на борту метеорологічних зондів і в параболічних польотах. В наземних експериментах використовуються спеціалізовані центрифуги та клиностати різних типів. Передбачається подальше посилення співробітництва вчених різних країн в галузі гравітаційної біології рослин з використанням наявного обладнання та технічних можливостей.

За програмою JAXA (Японія) в галузі космічної біології рослин провадяться дослідження росту та розвитку рослин в космічному польоті на борту японського експериментального модуля «Кіbo» на МКС. Розроблено також обладнання для експериментів з метою вивчення біології клітини в умовах мікрогравітації «Cell Biology Experiment Facility, CBEF». За основні об'єкти слугуватимуть мікроорганізми, культури клітин і тканин, дрібні тварини та рослини. Програма досліджень в галузі гравітаційної біології рослин включає питання граві- та гідротропізму, синтезу ряду речовин клітинної стінки, локалізації білків-переносників ауксину в умовах мікро- та гіпергравітації.

Відповідно до рекомендацій Національної дослідницької ради США (NRC) найбільш важливими завданнями в галузі біології рослин в космосі на 2010—2020 рр. НАСА визначено: 1) з'ясування ролі взаємодії мікробів з рослинами в біорегенеративних системах життєзабезпечення, 2) дослідження росту рослин та їхніх реакцій на різні зовнішні стимули в космічному польоті з використанням сучасних методів клітинної та молекулярної біології та аналітичних технологій геноміки, транскриптоміки, протеоміки та метаболоміки, 3) розробка поточних відповідних програм космічних і наземних досліджень.

Основними напрямами досліджень з космічної біології рослин в Україні є: 1) біологія клітини в умовах мікро- та гіпергравітації, 2) біологія розвитку в умовах мікрогравітації, 3) взаємодія рослин із симбіотичними та патогенними бактеріями та вірусами в умовах мікрогравітації, 4) астробіологія, 5) використання магнітного поля для вивчення гравітропізму рослин, 6) розробка субстратів для вирощування рослин в умовах мікрогравітації. Спільно з Росією створюється бортовий комплекс «Біолабораторія-М» для проведення космічних експериментів з культурами клітин і тканин рослин, тварин і людини, мікроорганізмами і проростками рослин. Комплекс забезпечує контрольовані умови культивування об'єктів і створення гравітації 1 за допомогою бортової центрифуги. Експерименти спрямовано на вивчення впливу мікрогравітації на клітинному та молекулярному рівні як експериментальної бази для з'ясування гравічутливості живих систем і розробки технологій космічного зеленого конвеєра.

В космічній програмі ASI (Італія) увага концентрується на використанні рослин як джерела кисню та їжі у біорегенеративних системах життєзабезпечення в тривалих космічних польотах, відвіданні Марса. Ведеться робота з підбору відповідних рослин, розробки технологій їхнього культивування та тестування в наземних експериментах у рамках програми Європейського космічного агентства MELISSA (Мікро-екологічна система життєзабезпечення), яка була розпочата у 1989 р., для майбутнього застосування в космічному польоті на МКС. Основне завдання виробництво їжі, води та кисню із органічних відходів (неїстівна біомаса, СО₂, фекалії, сеча) за принципом «водної» екосистеми. Система включає декілька підсистем, від анаеробного ферментера до вирощування фотосинтезуючих водоростей та вищих рослин, що обумовлено необхідністю високого рівня безпеки, технічними підходами та метою розробки детермінованої стратегії контролю. У проекті MELISSA основними функціями підсистеми вищих рослин є виробництво їжі, кисню та води. Увага приділяється також відбору сортів, складанню меню, характеристиці рослин та моделюванню виготовлення їжі [21].

ПРИКЛАДИ КОСМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИН, ЩО ЗАРАЗ ФУНКЦІОНУЄ НА МКС АБО ПЕРЕБУВАЄ В СТАНІ РОЗРОБКИ ТА СТВОРЕННЯ

Європейська модульна культиваційна система (EMCS) для експериментів з рослинами, як і BIOLAB, функціонує як інкубатор і забезпечує проведення біологічних експериментів в контрольованих умовах. EMCS містить дві центрифуги з прискоренням від (0.001...2)g, на яких може розміщуватися до вісьми експериментальних контейнерів. Вона забезпечує контроль складу газів повітря, включаючи систему для видалення етилену, автоматичну подачу води, контроль вологості на рівні контейнерів, освітлення та



Рис. 2. Рослина *Arabidopsis thaliana* у камері для культивування рослин Європейської модульної культиваційної системи (EMCS) на борту MKC [10]



Рис. 3. Рослини м'якої пшениці (*Triticum aestivum*) сорту Апогей в Системі для виробництва біомаси (BPS) на борту МКС на послідовних стадіях росту, від 4 до 15 діб [23]

відеозйомку [10]. В цьому обладнанні на борту МКС проведені експерименти з сочевицею (*Lens culinaris* L.) ЕКА та *Arabidopsis thaliana* (L.) Неупh. (рис. 2) ЕКА та НАСА. Система для виробництва біомаси (Biomass Production System, BPS, USA) складається із чотирьох камер для росту рослин, кожна з яких забезпечує незалежний контроль температури, відносної вологості, рівень освітленості, концентрації CO₂. Камери можуть бути витягнуті із системи для взяття зразків, збору або запилення рослин. В якості джерела світла використано лампи денного світла, етилен видаляється за допомогою газопоглинача фотокаталітичного TiO₂. Висота камери дорівнює 13 см, площа — 0.0264 м², глибина лотка для коренів — 3 см. Лоток для коренів відділений від повітряної частини камери покриттям із пінки та колектором для циркуляції повітря. Вода подається до субстрату через три пористі трубки помпою із лічильником для підтримання в субстраті постійного водного потенціалу [22]. В цьому обладнанні на борту МКС проведено експерименти з пшеницею (*Triticum aestivum* L.), карликовий сорт Апогей, для проростання зернівок якого не потрібна яровизація (рис. 3), та з рапсом (*Brassica rapa* I.).

Оранжерея «Лада» (Росія) має площу 340 см², повітряний об'єм — приблизно 14 л, об'єм лотка для коренів — 1.5 л. В оранжереї контролюється відносна вологість субстрату 40—90 %, достатнє освітлення забезпечується флуоресцентними лампами, вимірюється вологість, температура та кисень субстрату, температура повітря та поверхні листків, відносна вологість, кисень та CO_2 повітря, рівень освітлення. Проведено експерименти з карликовими лініями гороху (*Pisum sativum* L.), в яких було отримано чотири покоління рослин на борту МКС (рис. 4) [24].

ЕКА у кооперації з іншими агентствами створює новаторське космічне обладнання PHENIX — автономну біологічну лабораторію із 40 повністю незалежними експериментальними контейнерами (20 для культивування зразків в умовах мікрогравітації та 20 — на двох центрифугах, від 0 до 2g) з локальним контролем температури (від 4 до 37 °C) для проведення експериментів з культурами клітин і тканин тварин і рослин, личинками, дрібними тваринами та рослинами. Обладнання включає два флуоресцентних мікроскопи для фотографування та відеозйомку зразків, які перебувають в умовах мікрогравітації та 1g на центрифузі, та автоматично забезпечуватиме маніпуляції з кожним контейнером, що містить зразки. Розробляються прилади для проведення на борту біохімічних, імунологічних та рентгеноскопічних аналізів, полімеразної ланцюгової реакції, а також застосування флуоресцентної мікроскопії для спостереження за живими зразками. Новаторська дослідницька техніка дозволятиме дослідження активності генів у трансгенних рослинах, що містять флуоресцентний зелений білок, рух іонів кальцію в клітинах і клітинних популяціях і т. д.

Відповідно до стратегії розвитку наук про життя в космосі до 2025 р. у зв'язку з ключовою роллю біорегенеративних систем життєзабезпечення для успішності здійснення довготривалих експедицій до Марса та інших небесних тіл планується створення таких систем для досліджень в галузі космічної та гравітаційної біології та як комплементарних підсистем до фізико-хімічних



Рис. 4. Карликові рослини гороху (*Pisum sativum*) в оранжереї «Лада» на борту МКС [24]

систем життєзабезпечення. Постулат сьогодення: тривалі пілотовані експедиції (місячна база, марсіанські експедиції) потребують дуже великої кількості метаболічних ресурсів, тобто води, їжі, кисню, занадто важкої для сучасних ракет. Майбутні експедиції не можна здійснити без високого рівня кругообігу. Як відомо, відкритий космос є ворожим для всього живого, звичайно космонавти живуть і працюють у штучному поселенні. Фізико-хімічні системи забезпечують регенерацію повітря, води та відходів. Необхідним є постійне постачання їжі та води. тому фізико-хімічні системи життєзабезпечення у довготривалих космічних польотах повинні бути доповнені біорегенеративними системами. До того ж у замкненому середовищі космічного поселення значно зростає ризик мікробних інфекцій та хімічного отруєння. Тому вищі рослини та інші фотосинтезуючі організми визначено ключовими компонентами біорегенеративних систем життєзабезпечення та виробництва їстівної біомаси у тривалих космічних польотах. Метою проекту ModulES (Німеччина) є розробка системи життєзабезпечення для пілотованих космічних польотів. Концепція ModulES базується на успішній реалізації попередніх проектів, об'єктами досліджень в яких були водні організми, наприклад, проект GEBAS/Aquarack (1986—2003 рр.), що включав риб, слимаків і вищу водну рослину Ceratophyllum, і проект Aquacells/Omegahab (2000—2012 pp.), об'єктами якого були евгленова водорость та риби, але її кінцева мета набагато далекосяжніша. За новим проектом планується поступове створення індивідуальних модулів для досліджень окремих організмів. Перший модуль розробляється як біореактор для зелених водоростей, зокрема Clamydomonas reinhardtii, для оцінки ефективності функціонування такої системи. Передбачаються дослідження здатності водоростей регенерувати кисень та продукувати водень як джерело енергії. Модулі у різних комбінаціях взаємодіятимуть між собою через технічні пристрої, що містять датчики та комп'ютери. Нарешті, відповідні комбінації модулів можна використовувати як біорегенеративні системи життєзабезпечення для підтримки фізико-хімічних систем [21].

ПРИКЛАДИ НЕОРБІТАЛЬНИХ ДОСЛІДНИЦЬКИХ ПЛАТФОРМ І НАЗЕМНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ УМОВ МОДЕЛЬОВАНОЇ МІКРОГРАВІТАЦІЇ ТА ГІПЕРГРАВІТАЦІЇ

У зв'язку з дуже обмеженими можливостями проведення біологічних експериментів на космічних літальних апаратах в наш час, оскільки такі можливості існують лише на борту Міжнародної космічної станції та російських супутників «Біон» і «Фотон», широко використовуються неорбітальні дослідницькі платформи, за допомогою яких створюються умови невагомості: ракетні зонди, літаки у параболічному польоті, вежі падіння, висотні аеростати. Ракетні зонди належать до типу балістичних ракет, що здатні піднімати декілька сотень кілограмів на висоту 250-750 км за майже вертикальними траєкторіями підйому та спуску. Умови невагомості для маси корисного навантаження 800 кг різними ракетними зондами створюються протягом 6—12 хв під час вільного падіння. Ракетні зонди TEXUS, MASER, MAXUS і REXUS займають центральне місце в європейських дослідженнях біологічних ефектів невагомості. Так, наприклад, TEXUS запускався 48 разів, починаючи з 1977 р, останній був здійснений у 2007 р.

Параболічні польоти здійснюються на спеціальному аеробусі («Аеробус А300», 0g) і забезпечують певні періоди невагомості, які повторюються. Звичайно один політ складається із 30 парабол, у кожній з яких є період підвищеної гравітації (1.8—2)g за 20 с до та після періоду невагомості, що триває 20 с. Цей аеробус також планується для польоту за параболою зменшеної гравітації 0.16g протягом приблизно 23 с та 0.38g протягом 30 с, що відповідає величинам гравітації на Місяці та Марсі.

Вежі падіння використовуються для різнобічних експериментів в галузі фізики, матеріалознавства, біології та біотехнології, які потребують дії невагомості протягом декількох секунд. Так, період невагомості у вежі падіння висотою 140 м у Бремені триває 4.74 с, а у вежі падіння висотою 21 м у Мадриді — 2.1 с. Вежі падіння слугують також як важливий додаток до орбітальних або суборбітальних платформ, які існують або плануються, для досліджень впливу мікрогравітації.

На Землі для моделювання біологічних ефектів мікрогравітації в космічному польоті застосовуються різні пристрої, коло яких значно поширилося в останні роки. Поряд із «класичними» повільними горизонтальними клиностатами (у середньому 2—5 об/хв) використовуються швидкий горизонтальний клиностат (50 об/хв), машина випадкових положень, тобто ускладнений клиностат (іноді його називають 3Д-клиностат), що забезпечує обертання об'єкта в різних напрямках, машина вільного падіння, яка створює періоди вільного падіння (умови невагомості) протягом 900 мс, що перериваються прискоренням 20g на 20—80 мс. Принцип роботи машини вільного падіння такий самий, як літака у параболічному польоті, лише часи дії різняться. Для досліджень реакцій біологічних систем з використанням машини вільного падіння створено маленькі мікроскопи, відеокамери, модулі для культивування клітин і тканин, модулі для комах та ін. [5]. В останні роки функціонує обладнання, де умови невагомості моделюються за допомогою магнітної левітації. Справа у тому, що у надсильних градієнтних магнітних властивостей, тобто може відбуватися магнітна левітація діамагнітних органічних матеріалів і навіть живих біологічних зразків.

Для досліджень впливу гіпергравітації на біологічні об'єкти використовуються центрифуги з різними радіусами. Центрифуги з великими радіусами, що перебувають в Академічному медичному центрі в Амстердамі та Нордвіку (Нідерланди) забезпечують прискорення від 8 до 20g. На центрифузі з діаметром 8 м (ESA/ESTEC) можна проводити експерименти з об'єктами вагою до 80 кг протягом від 1 хв до 6 міс. Менша німецька центрифуга NIZEMI, яка складається з мікроскопа, що повільно обертається і дає змогу вести спостереження за дрібними організмами, забезпечує прискорення до 5g. Центрифуга середнього розміру (Нідерланди) для досліджень впливу гіпергравітації на культури клітин і тканин забезпечує створення прискорення до 100g.

ОСНОВНІ НАПРЯМИ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ І ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З КОСМІЧНОЇ ТА ГРАВІТАЦІЙНОЇ БІОЛОГІЇ СЬОГОДЕННЯ

Починаючи з кінця 1960-х років по теперішній час широке коло космічних експериментів з вищими рослинами *in vivo* та *in vitro* (культури органів, тканин, клітин і протопластів) та водоростями було виконано на борту біосупутників, космічних кораблів і орбітальних станцій. Експерименти мали різні завдання та різну тривалість — від двох діб до місяців і більше, неоднакові технічні можливості тощо. Як об'єкти було використано наступні види покритонасінних рослин: Avena sativa, Arabidopsis thaliana, Brassica rapa, Capsicum annuum, Crepis capillaris, Cucumis sativus, Eucalyptus globules, Haplopappus gracilis, Helianthus annuus, Hordeum vulgare, Impatiens balsamina, Lactuca sativa, Lens culinaris, Lepidium sativum, Melilotus alba, Oryza sativa, Pisum sativum, Solanum tuberosum, Triticum aestivum, T. durum, Vigna radiate, Zea mays, голонасінних — Pinus elliotti, P. sylvestris, папоротей — Azolla pinnata, мохів — Funaria hygrometrica, Ceratodon purpureus i Pottia intermedia, водоростей — Chlorella vulgaris, Ch. pyrenoidosa, Euglena gracilis, Clamydomonas reinhardtii i Chara globularis [2, 6, 9, 11, 12, 15, 17, 20]. Рослини Arabidopsis thaliana, Brassica rapa (рис. 5), Pisum sativum i Triticum aestivum, що виросли з насіння, пророслого на орбіті, цвіли та плодоносили в польоті.



Рис. 5. Рослини рапсу (*Brassica гара*) в камерах для росту рослин Приладу для росту рослин на борту шаттла «Колумбія» (STS-87) на початку цвітіння (*a*) та плодоношення (*б*) [2]

Результати космічних експериментів з рослинами показали, що квіткові рослини та водорості, що є необхідними компонентами біорегенеративних систем життєзабезпечення, ростуть і розвиваються в умовах мікрогравітації, що є незвичним чинником для земних організмів. За роки досліджень росту та розвитку рослин в умовах реальної мікрогравітації в космічному польоті та модельованої мікрогравітаці в наземних експериментах встановлено основні закономірності її дії на організмовому, клітинному та субклітинному рівнях та зроблено відкриття гравічутливості рослинних клітин, не спеціалізованих до сприйняття гравітаційного вектора. Доведено, що квіткові рослини успішно ростуть на орбіті в космічних оранжереях у більш чи менш оптимальних умовах щодо температури, вологості, вмісту в повітрі СО2, інтенсивності та спрямованості світла, аерації субстрату тощо. Слід зазначити, що схожість високоякісного насіння на орбіті є стовідсотковою. Оскільки квіткові рослини проходять повний цикл онтогенезу від насіння до насіння в умовах мікрогравітації, досить істотні зміни у структурнофункціональній організації рослин розглядаються як такі, що сприяють адаптації рослин до дії цього чинника.

Аналіз літератури та матеріалів міжнародних наукових форумів останніх років чітко показує, що в центрі уваги дослідників в галузі космічної та гравітаційної біології перебувають фундаментальні питання ролі гравітації у функціонуванні біосфери Землі. В галузі біології рослин в космосі це, перш за все, дослідження молекулярних механізмів сприйняття та реалізації гравітаційного стимулу, тобто гравітаксису одноклітинних організмів і гравітропізму мохів і квіткових рослин, які ведуть нерухомий спосіб життя, що забезпечують їхню орієнтацію в просторі. У цьому сенсі космічний апарат в орбітальному польоті залишається унікальною експериментальною лабораторією для вирішення поставлених питань. Нагадаємо, що саме умови невагомості в космічному польоті дозволяють створювати за допомогою бортових центрифуг різні величини гравітації, менші за 1g, що неможливо у полі сили тяжіння на Землі.

Як відомо, для гравітаксису рухомі зелені водорості використовують світло та гравітацію, шоб досягати та перебувати в зонах водного середовища, оптимальних для їхнього росту. Так, молоді клітини рухаються донизу (позитивний гравітаксис), зрілі — переважно догори (негативний гравітаксис). Сучасна робоча гіпотеза, яка базується на даних досліджень фізіології та молекулярної біології із застосуванням інгібіторного аналізу, пояснює, що в основі гравітаксису цих організмів лежить різниця специфічної щільності клітин і навколишнього середовища: щільність клітин є вищою. Таким чином, вся клітина є сенсором гравітації, у функціонуванні якого задіяні іони кальцію, кальмодулін і протеїн кіназа А, що локалізовані у джгутиках і цитоплазмі відповідно. Вхід у клітину масивного потоку іонів кальцію при зміні положення клітини до вектора гравітації веде до змін регуляції биття джгутиків і наступної реорієнтації клітини відносно вектора гравітації. Для пізнання механізмів сприйняття однією нерухомою клітиною гравітаційного сигналу як моделі широко використовуються спори папоротей та мохів. Оскільки переконливо доведено роль гравітації у встановленні полярності проростання спор та участі механочутливих кальцієвих каналів у сприйнятті гравітаційного сигналу, інтенсивно ведуться дослідження градієнта іонів кальцію у клітині у процесі проростання та впливу його зміни на активність оксиду азоту та цГМФ, експресію відповідних генів тощо [21].

Механізми гравітропізму у квіткових рослин, його взаємозв'язок із фототропізмом досліджуються у космічних експериментах щодо змін величини гравітації, зокрема нижче 1g, що створюються за допомогою бортової центрифуги в умовах реальної мікрогравітації в космічному польоті [8, 10]. Велика увага в таких дослідженнях приділяється молекулярним і біофізичним механізмам, що включаються до регуляції активності механочутливих каналів. На сьогодні запропоновано два механізми: 1) розвиток напруги у ліпідному бішарі цитоплазматичної мембрани прямо активує механочутливі кальцієві канали, внаслідок чого в цитоплазмі збільшується концентрація вільних іонів кальцію та 2) седимента-
реалізації тривалих пілотованих польотах у да-

лекому космосі. Встановлено, що під впливом

мікрогравітації змінюється експресія значного

числа генів, задіяних у широкому колі клітинних

процесів, зокрема у відповідях на стрес, передачі

сигналів, зокрема участю іонів кальцію, синтезі

ція амілопластів-статолітів при гравістимуляції викликає збільшення напруги актинових мікрофіламентів, що активує механочутливі кальцієві канали. Досліджується транспорт ауксину, що контролюється гравітацією, при участі білківпереносників ауксину та експресії відповідних генів, у позитивній гравітропічній реакції кореня та негативній гравітропічний реакції епікотиля та стебла при гравістимуляції та при відсутності гравітаційного стимулу з використанням переважно в якості об'єктів А. thaliana дикого типу та різних мутантів залежно від завдань експерименту. Продовжує приділятися увага ролі цитоскелету, в першу чергу актинових мікрофіламентів, у гравітропізмі рослин, послідовності подій у русі амілопластів-статолітів та перерозподілу іонів кальцію в статоцитах [21]. Нагадаємо, що саме умови мікрогравітації створюють унікальну можливість спостерігати зміни структурної полярності статоцитів без гравістимуляції та вивчати різні типи тропізму, уникаючи дії сили тяжіння. Задіяний новий підхід до вивчення механізмів гравітропізму рослин, зокрема ролі іонів кальцію у сприйнятті гравітаційного стимулу, що полягає у використанні слабкого комбінованого поля з частотою, резонансною циклотронній частоті іонів кальцію, для експериментів з гравістимуляції, оскільки було встановлено, що в такому магнітному полі позитивна гравітропічна реакція кореня змінюється на негативну.

Фундаментальні дослідження впливу реальної та модельованої мікрогравітації на ріст і розвиток рослин і можливостей їхньої адаптації до цих умов, що проводяться з метою визначення ступеня гравічутливості рослин на різних фазах онтогенезу — вегетативній та генеративній, в останні роки піднялися на новий щабель завдяки удосконаленню техніки мікрочипів і двомірного електрофорезу, що дозволило виявляти вплив мікрогравітації на експресію генів, склад та вміст білків. Оскільки теоретичні уявлення щодо росту і розвитку рослин в умовах мікрогравітації є основою розробки та створення технологій (агротехніки) автотрофної ланки біорегенеративних систем життєзабезпечення та прогнозу надійності її функціонування, такі дослідження мають безпосереднє прикладне значення для

білків, загальному метаболізмі, білків, зв'язаних з хлорофілом *a/b* тощо [18, 19, 23, 25]. Цікаво відмітити, що спрямованість змін експресії генів, які кодують білки клітинної стінки та ліпідного сигналінгу, узгоджується з раніш одержаними даними за допомогою біохімічних методів щодо змін у ліпідному та вуглеводному метаболізмі та активності ферментів клітинної стінки. Загалом взяті результати цитологічних, біохімічних і модекулярно-біологічних досліджень яскраво демонструють суттєвий вплив мікрогравітації на ключові процеси розвитку рослин [7, 13, 15, 16], розкриваючи в той же час механізми, які лежать в основі реакцій рослин на дію мікрогравітації та забезпечують пристосування рослин до дії цього чинника. Сучасна методологія молекулярно-біологічних досліджень відкриває нові горизонти у розумінні гравічутливості та гравізалежності струк-

турно-функціональної організації та адаптивних стратегій рослин до мікрогравітації. Для оцінки адаптивного потенціалу рослин в довготривалих космічних польотах ефективними є дослідження впливу мікрогравітації на клітинному та молекулярному рівні із застосуванням техніки мікрочипів і двовимірного електрофорезу білків. Якщо ми розглядаємо адаптацію рослин до мікрогравітації як прояв фенотипічної пластичності, доцільно привернути увагу до епігенетичних систем контролю генної експресії, які, на мою думку, відіграють ключову роль у пристосувальних реакціях рослин до несприятливих впливів зовнішнього середовища.

Однак залишається відкритим питання щодо фертильності рослин в умовах мікрогравітації, тобто адаптації системи насінного розмноження квіткових рослин, а саме до них належать сільськогосподарські культури, які пропонуються як компоненти біорегенеративних систем життєзабезпечення. Як вже зазначалося, рослини *A. thaliana* [4, 26], *B. rapa* [14], *T. aestivum* [6] і P. sativum [24] в космічному польоті проходили повний цикл онтогенезу, від насіння до насіння. Було одержано друге покоління рослин пшениці сорту Апогей на орбіті [6] та чотири покоління рослин карликового гороху, які не відрізнялися від наземного контролю та давали життєздатне насіння [24]. Проте дослідження ембріогенезу та накопичення запасних поживних речовин в клітинах сім'ядолей та кореня зародка В. гара виявили певні відхилення від норми. У пізньому ембріогенезі спостерігалися зміни у розташуванні сім'ядолей та зародкового кореня, форми сім'ядолей, напряму росту зародкового кореня. Оскільки ділення та диференціювання клітин зародка в процесі раннього ембріогенезу відбуваються подібно до контролю, такі відхилення у пізньому ембріогенезі розглядаються як аномалії розвитку. Встановлено затримку у синтезі та накопиченні запасних білків у вигляді білкових тіл у вакуолях. Так, якщо в наземному контролі у клітинах сім'ядолей і кореня незрілих зародків В. гара спостерігалися в основному білкові тіла, пластиди містили лише окремі крохмальні зерна, пластиди в клітинах зародків, які розвивалися в космічному польоті, були заповнені крохмальними зернами, а білкові тіла відсутні. Такі зміни в характері та швидкості синтезу та накопиченні запасних білків в клітинах зародків в умовах реальної та модельованої мікрогравітації можуть спричинювати формування насінин, менших за розміром, масою та життєздатністю порівняно з наземним контролем. Тому нагальним завданням є дослідження критичних стадій у розвитку зародка та ендосперму, процесів синтезу та накопичення запасних поживних речовин в насінні на молекулярному рівні для з'ясування причин аномалій пізнього ембріогенезу та формування насіння пониженої якості в умовах мікрогравітації. Особливий інтерес викликає дослідження в умовах мікрогравітації специфічних транспортних шляхів запасних білків у вакуолі, де вони накопичуються у вигляді білкових тіл.

Центральною ланкою напряму «астробіологія» є питання походження життя, його еволюції та поширення у Всесвіті. Продовжуються пошуки доказів на користь широко розповсюдженої гіпотези панспермії та її можливих механізмів. З цією метою проводяться експерименти у відкритому космосі з лишайниками, спорами та культурами бактерій та грибів і насінням вищих рослин для з'ясування стійкості різних біологічних об'єктів до дії факторів відкритого космосу та можливості збереження ними життєздатності. Останній космічний експеримент «Біориск-MCH-2» із сухим насінням протягом 13, 18 та 31 місяців був проведений в апаратурі «Біориск-МСН» (Росія), що складається з трьох металевих контейнерів, в яких містяться пластикові чашки Петрі з піддослідними організмами. Контейнери закріплювались на спеціальній платформі на зовнішній оболонці стикувального відсіку «Пірс» на зовнішньому боці РС МКС. Насіння редису та листкової гірчиці зберігали життєздатність після 31-місячної експозиції, хоча його схожість та енергія проростання були значно нижчими порівняно з насінням 13- та 18-місячної експозиції. Рослини, що виросли з такого насіння, за морфологією, генетичними та фізіологобіхімічними показниками не відрізнялися від рослин наземного контролю [3]. Слід зауважити необхідність продовження експериментів з експозиції сухого насіння у відкритому космосі з чіткою реєстрацією умов експозиції та величини діючих факторів, використовуючи насіння неоднакових за екологією рослин та різні сучасні методи оцінки його життєздатності після повернення на землю.

Як вже зазначалося, організація життєзабезпечення космонавтів у міжпланетних космічних польотах принципово неможлива без відтворення на борту продуктів харчування, що, в свою чергу, потребує культивування на борту сільськогосподарських рослин. Майже 40-річні експерименти з розробки біорегенеративної системи життєзабезпечення за допомогою мікроорганізмів (мікроводорості, водоневі бактерії) виявилися невдалими, в першу чергу внаслідок поганого засвоєння мікроводоростей у харчовому тракті людини та тварин. Розрахунки продукції на основі культивування вищих рослин, зіставлені з характеристиками запасів рослинної їжі з поправками на зниження якості запасеної їжі при тривалому зберіганні, виявили переваги використання космічних оранжерей у польотах тривалістю більш ніж півтора роки [1]. На жаль, пропозиції щодо практичного використання рослин як компонентів біорегенеративних систем життєзабезпечення на основі результатів фундаментальних досліджень росту та розвитку рослин в космічному польоті ще дуже і дуже далекі від свого втілення. Ключовою проблемою виробництва рослинної продукції в умовах космічного польоту є створення спеціального обладнання, тобто виробничих космічних оранжерей відповідних об'ємів для вирощування сільськогосподарських культур, які на сьогоднішній день відсутні на борту МКС та інших космічних апаратів. Дослідні космічні оранжереї, наявні та які розробляються, досить близькі за конструкцією, але занадто малі за об'ємом для одержання достатньої рослинної продукції. На борту МКС також не знайшли застосування такі перспективні технологічні прийоми, як організація зелених конвеєрів, тобто конвеєрного посіву насіння та посіву на опуклій посадковій поверхні, що сприятиме розширенню зайнятої рослинами площі, не вирішено проблеми регенерації використаного грунтозамінника та переробки рослинних відходів, що конче необхідно для функціонування біорегенеративних систем життєзабезпечення. Експериментальне відпрацювання конструктивних елементів космічних оранжерей та технологій вирощування рослин потребує мінімум 10 років [1]. Залишаються нез'ясованими також питання про якість насіння, яке утворюватиметься в умовах знижених рівнів гравітації — 1/5g на Місяці та 1/3g на Mapci [17].

У зв'язку з останніми повідомленнями про знижену якість насіння, яке утворилося в умовах мікрогравітації, на порядок денний знову виступають нагальні питання, які широко обговорювалися у 1970—1980-ті рр., про проведення відповідних генетико-селекційних робіт, спрямованих на одержання зернових та овочевих культур, які будуть адаптовані до умов мікрогравітації та її рівнів, нижчих за 1g, як на Місяці та Марсі, і, таким чином, продукувати їжу високої якості у біорегенеративних системах життєзабезпечення космонавтів у тривалих польотах в далекому космосі.

Наприкінці слід зазначити, що у світлі розглянутої сучасної стратегії досліджень в галузі космічної та гравітаційної біології рослин українські вчені посідають чинне місце в світовій науці, застосовуючи оригінальну методологію в дослідженнях гравітропізму мохів і квіткових рослин і впливу мікрогравітації на рослини на клітинному та молекулярному рівнях, вивчаючи, зокрема, експресію генів, синтез і функції білків-шаперонів, задіяних у ключових клітинних процесах. Значна увага приділяється дослідженням впливу модельованої мікрогравітації на біоенергетику рослинних клітин і клітинні мембрани, у першу чергу плазмалему, яка за своїми властивостями та функціями має бути найбільш чутливою до діі цього чинника космічного польоту. Саме дослідження молекулярних основ сприйняття та трансдукції ендогенних та екзогенних стимулів веде до поглиблення розуміння адаптивних реакцій рослин на клітинному та організмовому рівнях.

Підсумовуючи, слід зазначити, що дослідження в галузі сучасної космічної та гравітаційної біології рослин перебувають в центрі уваги світової наукової громадськості та є пріоритетними у Програмах національних космічних агентств космічних держав, що обумовлено їхнім неперевершеним значенням для вирішення фундаментальної загальнобіологічної проблеми — ролі гравітації у функціонуванні біосфери, та створення теоретичних уявлень щодо росту та розвитку рослин у відсутності сили тяжіння. Останні є необхідним підгрунтям для реалізації прикладних завдань відносно використання рослин у біорегенеративних системаж життєзабезпечення у міжпланетарних пілотованих польотах. Напрями фундаментальних досліджень чітко визначені із використанням науково-технічної бази сучасної біології та мають всі підстави для успішного виконання поставлених завдань. На жаль, розробка біорегенеративних систем життєзабезпечення на базі вищих рослин перебуває ще у зародковому стані та потребує створення відповідних космічних оранжерей, технологій космічної агротехніки та їхнього тестування на борту літальних апаратів, а також відбору сільськогосподарських культур, адаптованих до умов космічного польоту.

- Беркович Ю. А., Кривобок Н. М., Смолянини С. О., Урохин А. Н. Космические оранжереи: настоящее и будущее. — М.: Слово, 2005. — 367 с.
- 2. *Кордюм Є. Л., Чепмен Д. К.* Рослини в космосі. Київ: Академперіодика, 2007. 215 с.
- 3. Левинских М. А., Поликарпов Н. А., Новикова Н. Д. и др. Исследование влияния факторов космического пространства на семена растений в рамках эксперимента «Биориск-МСН-2» // К. Э. Циолковский и проблемы космической медицины и биологии. — Калуга: Гос. музей истории космонавтики им. К. Э. Циолковского, 2010.
- Меркис А. И., Лауринавичюс Р. С. Полный цикл индивидуального развития растений Arabidopsis thaliana (L.) Heynh. на борту орбитальной станции «Салют 7» // Докл. АН СССР. — 1983. — 271. — С. 509 — 512.
- Beysens D., Carotenuto L., van Loon J. W. A., Zell M. Laboratory Science with Space Data. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – 215 p.
- Bingham G. E., Levinskikh M. A., Sytchev V. N., Podolsky I. G. Effects of gravity on plant growth // J. Gravit. Physiol. - 2000. - 7. - P. 5-8.
- Brykov V. O., Shugaev A. G., Generozova I. P. Ultrastructure and metabolic activity of pea mitochondria under clinorotation // Цитология и генетика. — 2012. — 46. — Р. 144—149.
- Driss-Ecole D., Legue V., Carnero-Diaza E., Perbal G. Gravisensitivity and automorphogenesis of lentil seedling roots grown on board the International Space Station // Physiol. Plantarum. – 2008. – 134. – P. 191–201.
- Halstead T. W., Dutcher F. R. Plants in space // Annu. Rev. Plant Physiol. - 1987. - 38. - P. 317 - 345.
- Johnsson A., Solheim B. G. B., Iversen T.-H. Gravity amplifies and microgravity decreases circumnutations in *Arabidopsis thaliana* stems: results from a space experiment // New Phytologist. 2009. **182**. P. 621–629.
- Kordyum E. Space biology: research results // Space Research in Ukraine 2006 – 2008. – Kyiv: NSAU, 2008. – P. 81–94.
- Kordyum E. Space biology: results of research // Space Research in Ukraine 2008 – 2010. – Kyiv: Akademperiodica, 2011. – P. 96–104.
- Kozeko L. Y., Kordyum E. L. The stress protein level under clinorotation in context of the seedling developmental program and the stress response // Microgravity Sci. Techn. – 2006. – 14. – P. 254–256.
- Kuang A., Popova A., McClure G., Musgrave M. Dynamics of storage reserve deposition during *Brassica rapa* L. pollen and seed development in microgravity // Int. J. Plant Sci. – 2005. – 166. – P. 85–96.

- Matia I., Gonzallez-Camacho F., Herranz R. Plant cell proliferation and growth are altered by microgravity conditions in spaceflight // J. Plant Physiol. — 2010. — 167. — P. 184—193.
- Millar K. D. L., Johnson C. M., Edelmann R. E., Kiss J. Z. An endogenous growth pattern of roots is revealed in seedlings grown in microgravity // Astrobiology. – 2011. – 11. – P. 787–797.
- 17. *Musgrave M. E.* Growing plants in space // CAB reviews: perspectives in agriculture, veterinary science, nutrition and natural resources. 2007. 2. P. 1–9.
- Paul A.-L., Manak M. S., Mayfield J. D., et al. Parabolic flight induces changes in gene expression patterns in Arabidopsis thaliana // Astrobiology. – 2011. – 11. – P. 743–758.
- Paul A.-L., Zupanska A. K., Ostrow D. T., et al. Spaceflight transcriptomes: Unique responses to a novel environment // Astrobiology. – 2012. – 12. – P. 40–56.
- Perbal G. From ROOTS to GRAVI-1: Twenty five years for understanding how plants sense gravity // Microgravity Sci. Techn. - 2009. - 21. - P. 3 - 10.
- Plant Biology in Space // ISLSWG Satellite Workshop to the Plant Biology Congress 2012. Program and Abstracts. – Freiburg, 2012. – 30 p.
- Stutte G. W., Monje O., Goins G. D., Tripathy B. C. Microgravity effects on thylakoid, single leaf, and whole canopy photosynthesis of dwarf wheat // Planta. - 2005. -223. - P. 46-56.
- Stutte G. W., Monje O., Hatfield R. D., et al. Microgravity effects on leaf morphology, cell structure, carbon metabolism and mRNA expression of dwarf wheat // Planta. – 2006. – 224. – P. 1038–1049.
- Sychev V. N., Levinskikh M. A., Gostimsky S. A., et al. Spaceflight effects on consecutive generations of peas grown onboard the Russian segment of the International Space Station // Acta Astronautica. - 2007. - 60. -P. 426-432.
- 25. Wang I. I., Zheng H.Q., Wet S., et al. A proteomic approach to analyzing responses of Arabidopsis thaliana callus cells to clinostat rotation // J. Exp. Bot. – 2006. – 57. – P. 827–835.
- 26. Yano S., Kasahara H., Masuda D., et al. Improvements in and actual performance of the Plant Experiment Unit onboard Kibo, the Japanese experiment module on the international space station // Adv. Space Res. – 2013. – 51. – P. 780–788.

Стаття надійшла до редакції 15.07.13

Є. Л. Кордюм

БИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ В КОСМОСЕ: НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРОБЛЕМЫ

Рассматриваются современные тенденции исследований в области космической и гравитационной

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2013. Т. 19. № 4

биологии растений в странах, которые есть членами Международной рабочей группы по наукам о жизни в космосе, приводятся примеры оборудования для проведения космических и наземных экспериментов и разрабатываемого оборудования. Подчеркивается, что актуальная идея использования растений как необходимых компонентов биорегенеративных систем жизнеобеспечения космонавтов в длительных междупланетных полетах еще очень далека от практического воплощения, что требует создания космических оранжерей достаточного объема, постановки космических экспериментов для отработки технологий зеленого конвейера на борту космических аппаратов и проведения генетико-селекционных работ с целью получения сортов сельскохозяйственных культур, адаптированных к условиям космического полета.

E. L. Kordyum

PLANT BIOLOGY IN SPACE: SCIENTIFIC RESULTS AND PROBLEMS

The main tendencies in plant space and gravitational biology today in countries, which are members of the International Space Life Sciences Working Group, are considered. Certain examples of available and workable technical facilities for space and groundbased experiments with plants are presented. An urgent idea on the utilization of plants as the necessary components of bioregenerative life-support systems in interplanetary space flights is emphasized to be very far from its practical realization that requires space green-houses of the sufficient volume, as well as development and testing of technologies for a green conveyer onboard space vehicles and performing the genetic and breeding works to obtain the varieties of crops adapted to spaceflight conditions. **БЕСПАЛОВА** Анна Вадимівна — аспірант Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — фізика магнітосфери, іоносфери, космічна погода, супутникові вимірювання та хвильові процеси в навколоземному просторі.

ГОРБУЛІН Володимир Павлович — член Президії Національної академії наук України, академік НАН України, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — стратегічні дослідження.

ДОНЕЦЬ Володимир Володимирович — голова правління Корпорації «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», кандидат технічних наук. Державний повірювач засобів вимірювань — фотометричних приладів.

Напрям науки — спектрометрія, гіперспектрометрія, аерокосмічні мульти- і гіперспектральні системи, підсупутникова валідація.

КОРДЮМ Єлизавета Львівна — завідувач відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України, доктор біологічних наук, член-кореспондент Національної академії наук України.

Напрям науки — експериментальна біологія.

МЕЛАНЧЕНКО Олександр Геннадійович — начальник відділу конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук.

Напрям науки — бортове устаткування космічних апаратів, випробовування, системи і процеси керування.

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

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

СОКОЛОВСЬКА Анна Василівна — аспірант, провідний інженер Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрям науки — дистанційне дослідження Землі.

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

Напрям науки — фізика верхньої атмосфери та іоносфери.

ЧЕРЕМНИХ Сергій Олегович — молодший науковий співробітник відділу дистанційних методів та перспективних приладів Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрям науки — фізика ближнього космосу, фізика плазми.

ШЕВЦОВ Анатолій Іванович — директор Регіонального філіалу Національного інституту стратегічних досліджень, доктор технічних наук, професор.

Напрям науки — стратегічні дослідження.

ШЕХОВЦОВ Володимир Степанович — заступник директора Регіонального філіалу Національного інституту стратегічних досліджень, доктор технічних наук.

Напрям науки — стратегічні дослідження.