

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 20
3(88) + 2014

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

ЗМІСТ

Атаманенко Б. А., Федонюк Р. В. Міжнародне співробітництво як інструмент участі в глобальних космічних проектах

Шувалов В. А., Токмак Н. А., Цокур А. Г., Кочубей Г. С. Динамическое взаимодействие космического аппарата с разреженной плазмой при движении под «магнитным парусом»

Ефименко Н. В. Повышение точности определения ориентации космического аппарата по звездам путем совместной обработки выходной информации двух астродатчиков

Бойко Г. В. Резонанс волнового совпадения в условиях гиперзвукового полета

Корсунь А. О., Курбасова Г. С. Реалізація GPS-часу і ГЛОНАСС-часу: порівняння часових даних на інтервалі 2009—2012 років

Ищенко М. В. Репроцессинг GPS-наблюдений на перманентных станциях региональной сети для GPS-недель 935—1399

Донец В. В., Броварец А. А., Бровченко В. В. Анализ особенностей полевой спектральной аппаратуры

CONTENTS

3 *Atamanenko B. A., Fedonyuk R. V.* International cooperation as a tool of participation in global space projects

14 *Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Tsokur A. G., Kochubey G. S.* Dynamic interaction of a spacecraft with rarefied plasma in motion under a “magnetic sail”

22 *Efimenko N. V.* Determining spacecraft orientation using information from two jointly processed star trackers

28 *Boiko G. V.* Coincidence resonance in hypersonic flight conditions

34 *Korsun'A. A., Kurbasova G. S.* Realization of GPS time and GLONASS time: a comparison of clock data in the interval from 2009 to 2012

41 *Ishchenko M. V.* Reprocessing of GPS observations at permanent stations of the regional network for GPS weeks 935—1399

49 *Donets V. V., Brovarets A. A., Brovchenko V. V.* An analysis of field spectral apparatus features

Макаров А. Л., Шатихин В. Е., Хорошилов В. С., Петренко Г. В., Цуканов О. В., Попель В. М. Повышение точности оценки динамических нагрузок привода исполнительных механизмов космического аппарата

НАШІ АВТОРИ

ДІЯЧІ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ
ГАЛУЗІ УКРАЇНИ

НОВА КНИГА

ПАМ'ЯТІ В. С. КИСЛЮКА

64 Makarov A. L., Shatikhyn V. E., Horoshilov V. S., Petrenko G. V., Tsukanov O. V., Popel' V. M. Some increase of dynamic loads of spacecraft actuating mechanisms drive

69 OUR AUTHORS

71 FIGURES OF SPACE AND ROCKET
INDUSTRY OF UKRAINE

73 NEW BOOK

78 TO THE MEMORY OF V. S. KYSLYUK

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

Підписано до друку 15.07.14. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс.
Ум. друк. арк. 8,61. Обл.-вид. арк. 9,04. Тираж 100 прим. Зам. № 3958.

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.

Б. А. Атаманенко, Р. В. Федонюк

Державне космічне агентство України, Київ

МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО ЯК ІНСТРУМЕНТ УЧАСТІ В ГЛОБАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ПРОЕКТАХ

Викладено інформацію стосовно масштабних міжнародних заходів у космічній сфері, що відбулись 9—10 січня 2014 року у Вашингтоні (США) — Міжнародного урядового форуму з питань освоєння космосу та Саміту голів космічних агентств. Відмічено основні напрями дискусій під час заходів та наведено їхні підсумкові документи. Проаналізовано можливість використання висновків, зроблених в рамках заходів, для зміцнення космічного статусу України. Наведено приклади участі ДКА України у міжнародних космічних ініціативах, зокрема у Міжнародній координаційній групі з питань космічних досліджень (ISECG). Запропоновано на розгляд Річний звіт ISECG за 2013 рік.

9—10 січня 2014 р. у м. Вашингтон (США) відбулися два масштабні заходи — Міжнародний урядовий форум з питань освоєння космосу та Саміт голів космічних агентств, які зібрали керівників космічних агентств, а також представників комерційних компаній, наукових установ, неурядових організацій, які займаються питаннями, пов'язаними з космосом. І хоч ці заходи проводились різними організаторами: перший — Державним департаментом США, а другий — Міжнародною академією астронавтики, обговорення в їхніх рамках носили подібний характер. У першу чергу, в ході обох заходів було підкреслено необхідність зміцнення міжнародного співробітництва для успішного просування космічної діяльності, важливе значення космічної діяльності для повсякденного життя людей, а також обговорено загальні напрями та форми подальшого розширення присутності людства у Сонячній системі. За результатами заходів їхні учасники підготували та схвалили Підсумки Міжнародного урядового форуму з питань освоєння космосу¹ (Додаток 1) та Декларацію Саміту керівників космічних агентств² (Додаток 2), в яких намагались відобразити спільне бачення сучасного місця та перспектив космічної діяльності.

Основним напрямом дискусій було міжнародне співробітництво як потужний інструмент для

розвитку космічної діяльності в глобальному вимірі. Зокрема зазначалось, що перші кроки людства у космос та основні здобутки у цій сфері були зроблені завдяки жорсткій конкуренції в умовах холодної війни. Як США, так і СРСР вкладали у космічну діяльність фінансові та людські ресурси, оскільки з однієї сторони космічна техніка у тих умовах була похідною від військової, а з іншої — через космос досягались нові перемоги на зовнішньополітичній арені.

Чинник конкуренції між державами набув нової форми після переформатування геополітичної карти світу. В таких умовах найбільш суттєвим стимулом (а також і засобом) освоєння космосу стало міжнародне співробітництво. На сьогодні освоєння космосу передбачає тісну довгострокову співпрацю між країнами, яка носить як фінансовий, так і політичний характер. Прикладом успіху спільних зусиль є Міжнародна космічна станція (МКС). МКС показала, що міжнародні зобов'язання можуть виконуватись протягом десятиліть при різних урядах.

На сьогодні в космічній діяльності спостерігається період економічного експерименту. Одним з прикладів цього є розробка нових ракет-носіїв для майбутніх місій. Якщо нові місії принесуть

¹ <http://www.state.gov/r/pa/prs/ps/2014/01/219550.htm>

² <http://iaaweb.org/iaa/Scientific%20Activity/summitdeclaration2014.pdf>

економічні вигоди, то фінансові вкладення в розробку новітніх ракет-носіїв будуть виправдані і буде зроблено висновок, що космічна діяльність є прибутковою. На сьогодні космічна діяльність є економічно збитковою, це особливо відчутно для країн, які витрачають кошти на «перезапровадження» старих технологій.

Делегація Державного космічного агентства України на чолі з Головою Ю. С. Алексєєвим також взяла участь у Міжнародному форумі та Саміті та долучилась до обговорень актуальних питань космічної діяльності в колі керівників більш ніж тридцяти космічних агентств різних країн світу. Разом з тим участь у таких заходах була нагодою не тільки для представлення своєї точки зору для іноземних партнерів, але і більш чіткого усвідомлення місця України у глобальних процесах з освоєння космосу, визначення кроків, необхідних для того, щоб наша держава і надалі залишилась учасником таких процесів, оскільки на сьогоднішній день є реальні передумови втрати нашою державою статусу космічної.

Основа космічної промисловості України сформована за часів холодної війни як частина військово-промислового комплексу великої країни. Втративши об'ємні державні замовлення, підприємства намагаються зберегти свою належність до космічного сектору шляхом комерціалізації своєї діяльності. Основним джерелом «виживання» залишаються зовнішньоекономічні контракти підприємств. Фінансовий «голод» спричиняє стрімку втрату кадрового та виробничого потенціалу. Про розвиток виробничої бази, залучення та освіти молодих фахівців, створення нових технологій і відповідно зміцнення конкурентоспроможності на зовнішньому ринку не йдеться. Державні замовлення з огляду на мізерне фінансування Загальнодержавної науково-технічної космічної програми України є незначними.

Для виходу з ситуації, яка склалася, необхідно застосувати тезу Міжнародного урядового форуму про те, що міжнародне співробітництво залишається основним стимулом розвитку космічної діяльності. Крім пошуку нових зовнішньоекономічних контрактів для підприємств, підтримання їхньої участі у міжнародних комерційних

проектах, Державному космічному агентству необхідно сконцентрувати свою роботу на залученні України до міжнародних програм, що відповідають сучасним трендам освоєння космосу. Без розробки нових технологій і державної підтримки це зробити неможливо. Оскільки участь у програмах з дослідження астероїдів, польотів на Місяць чи Марс, як зазначалось вище, найближчим часом не принесе економічного прибутку і матиме опосередкований ефект, тому вона повинна фінансуватись державою. Разом з тим неприєднання до таких проектів призведе до того, що Україну буде вилучено з «клубу» космічних держав.

Найбільш доступний шлях до участі у перспективних міжнародних космічних проектах пролягає через Європейське космічне агентство (ЄКА). Європейське космічне агентство протягом десятиліть відпрацьовувало принципи та правила взаємодії учасників, до складу яких входять майже всі країни Європи та Канада. Це дозволило ефективно використовувати кошти країн-учасників.

З огляду на зазначене, вступ України до ЄКА, забезпечення регулярної та повної сплати членських внесків, а також належного виконання підприємствами робіт в рамках проектів агентства можна вважати максимальною метою, досягнення якої забезпечить нашій державі збереження і розвиток наявних космічних технологій.

Разом з тим в умовах відсутності бюджетного фінансування космічної програми необхідно забезпечити мінімальну мету — участь у політичних ініціативах міжнародної космічної спільноти, покликаних сприяти координації космічної діяльності та її регламентуванню.

До числа таких ініціатив відноситься Міжнародна координаційна група з питань освоєння космосу (ISECG, International Space Exploration Coordination Group). До складу ISECG входять представники низки космічних агентств. Метою її діяльності є формування переліку перспективних напрямів розвитку космічної діяльності провідних держав світу, який відображається в Глобальній дорожній карті освоєння космосу³.

³ http://www.globalspaceexploration.org/wordpress/wp-content/uploads/2013/10/GER_2013.pdf

За результатами кожного року ISECG готує річний звіт, який відображає основні досягнення агентств-учасників. Представники ДКА України беруть участь у роботі Групи, зокрема, у підготовці Дорожньої карти. До Річного звіту за 2013 рік⁴ (Додаток 3) та звітів за два попередні роки також включено розділи щодо діяльності ДКА. Роботу ISECG було високо оцінено під час Міжнародного урядового форуму у Вашингтоні.

Крім іншого, учасники Міжнародного урядового форуму вказали на важливості процесу підготовки Міжнародного кодексу поведінки

та привітали проведення перших міжнародних консультацій з цього питання у травні 2013 року в Києві.

Отже, передумовою подальшого розвитку космічної галузі України можна назвати залучення до реалізації міжнародних місій, спрямованих на освоєння космосу, що виконуються космічними державами та їхніми приватними компаніями. Однак відповідно до сучасних реалій, що характеризуються відсутністю бюджетного фінансування космічної програми, на сьогоднішній день необхідно сконцентруватись на активній участі у міжнародному політичному діалозі, спрямованому на планування, координацію та правове регламентування космічної діяльності у глобальному вимірі.

⁴ http://www.globalspaceexploration.org/wordpress/wp-content/uploads/2013/12/Annual-Report_2013_FINAL.pdf

*ДОДАТОК 1
(неофіційний переклад)*

**Міжнародний урядовий форум
з питань освоєння космосу**

9 січня 2014 р., Вашингтон, США

Підсумки Форуму

Представники країн з усього світу зустрілися у Вашингтоні, округ Колумбія, 9 січня 2014 року, в рамках Міжнародного урядового форуму з питань освоєння космосу в цілях подальшого просування дослідження і використання космічного простору, а також щоб висвітлити прямі вигоди для людства від космічної діяльності. Форум продовжує діалог, розпочатий Європейською Комісією та Європейським космічним агентством, остання частина якого відбулася в листопаді 2011 року в місті Лукка (Італія), який підкреслив важливість освоєння космосу і його користь для жителів усіх країн світу.

Як приймаюча сторона Форуму, США підтверджують свою цілеспрямовану політику щодо просування освоєння космосу й стимулювання всіх націй до об'єднання з метою розширення присутності людини в Сонячній системі.

Учасники Форуму відзначили, що освоєння космосу є кінцевим завданням у нашому прагненні відкривати нові горизонти і розширювати присутність людства у всесвіті. Всі учасники підтвердили, що інновації і знання, отримані від освоєння космосу, роблять безпосередній внесок в економічне зростання і соціальний добробут населення.

Дискусії показали, що космічні польоти минулого століття не були б можливими без міжнародного співробітництва. Інновації, створені в процесі конкуренції на промисловому та науковому рівнях, також є важливим елементом еволюції космічних досліджень. На цей час, працюючи разом, країни успішно здійснюють ряд роботизованих і пілотованих космічних польотів, які приносять широку соціальну вигоду. Нації координують свої дії з метою кращого розуміння нашої планети і освоєння різних об'єктів Сонячної системи, включаючи астероїди, Місяць і Марс. Нації, які беруть участь у Форумі, визнали, що пілотоване та роботизоване освоєння космосу працює на благо всіх жителів Землі і буде більш успішним після створення широкого партнерства, спрямованого на досягнення перспективної мети з освоєння людиною Марса.

Учасники Форуму також відзначили важливість прийняття зобов'язань на політичному рівні для реалізації та планомірної імплементації міжнародних прагнень у сфері освоєння космосу.

Учасники Форуму схвалили роботу космічних агентств, що беруть участь у Міжнародній координаційній групі з питань освоєння космосу (ISECG) щодо розробки стратегічного плану для освоєння людиною космічного простору. Даний план описано в Глобальній дорожній карті з дослідження космосу в серпні 2013 року. Вони привітали розширення зусиль з метою забезпечення синергії між роботизованими і пілотованими місіями для отримання максимального ефекту від окремих вкладів у досягнення спільної мети. Вони визнали важливість послідовного підходу до освоєння космосу, що дозволяє націям продемонструвати свої можливості в цій сфері через участь у

спільних міжнародних місіях. Вони закликали розширити участь космічних агентств у роботі Міжнародної групи.

У рамках цього спільного бачення дослідження космосу учасники Форуму визнали важливість Міжнародної космічної станції (МКС), як найбільшого і найскладнішого міжнародного науково-технічного проекту в історії. На додаток до переваг, що впливають з продовження досліджень, демонстрації технології і експериментів, співпраця на МКС показує, що країни можуть спільно розробити, профінансувати і завершити дорогий і складний проект. У світлі досліджень, проведених за участю представників понад 80 країн, партнерам по МКС необхідно розширювати міжнародний доступ до обладнання станції з метою досягнення нових цілей у майбутньому.

Учасники Форуму визнали необхідність продовження конкретних кроків, спрямованих на інтенсифікацію міжнародного співробітництва для реалізації нових проектів і програм.

Учасники Форуму схвалили зростання комерційної діяльності щодо космічних польотів. Така діяльність комерційного сектора веде до економічного зростання, залучення нових сил та ідей, а також розширює можливості з освоєння космосу. Учасники Форуму підкреслили важливість комерційних польотів у структурі діяльності з освоєння космосу.

Учасники Форуму визнали також важливість Комітету ООН з мирного використання космічного простору (КОПУОС) як платформи, на якій як космічні, так і некосмічні держави мають можливість обговорити важливі питання щодо розширення горизонтів людства в космосі і сприяння виконанню Конвенції від 1967 р. «Про керівні принципи діяльності держав з дослідження і використання відкритого космосу». Ці глобально важливі питання включають довгостроковий сталий розвиток космічного середовища для всіх користувачів і захист Землі від потенційно небезпечних об'єктів.

Учасники Форуму відзначили необхідність обговорення міжнародних рамок і загальних принципів співробітництва у сфері освоєння космосу, спираючись на досвід таких проектів, як МКС.

Учасники Форуму схвалили пропозицію Японії провести наступний етап діалогу з дослідження космосу в 2016 або 2017 році і погодилися, що переговори на політичному рівні слід також продовжувати у проміжний період до наступного засідання. Вони взяли зобов'язання поінформувати про результати Форуму зацікавлені організації своїх країн, включаючи уряди.

ДОДАТОК 2
(неофіційний переклад)

Декларація Саміту керівників космічних агентств

10 січня 2014 р., Вашингтон, США

10 січня 2014 року лідери 32 космічних агентств різних країн світу зібралися у Вашингтоні на Саміт керівників космічних агентств з питань освоєння космосу Міжнародної академії астронавтики (МАО). У процесі підготовки до Саміту МАО отримала пропозиції від академіків, інших експертів і космічних агентств щодо розвитку глобального співробітництва у сфері планетарних роботизованих і пілотованих досліджень. Керуючись зазначеними пропозиціями, МАО підготувала Декларацію Саміту, яка була підтримана керівниками космічних агентств.

Освоєння космосу відкриває нові рубежі, що дозволяють людству робити величезні досягнення у використанні космосу і послуг на базі космічної діяльності, які донедавна здавалися фантастичними. Доступ до космосу — це двері у прогрес і нові технології, що призведе не тільки до просування в космос, але і допоможе створити більш безпечне і забезпечене суспільство. Він також стимулює, особливо країни що розвиваються, розвивати вищу освіту.

Є багато причин, які надихають людство на освоєння космосу, але в кінцевому рахунку уряд здійснює космічну діяльність для просування національних інтересів та отримання додаткових переваг і можливостей від розширення діяльності в космосі.

Щоб зробити вигоди від космосу доступними, космічна діяльність повинна здійснюватись в доступний спосіб, в цьому міжнародне співробітництво відіграє ключову роль. Освоєння космічного простору — це каталізатор міжнародного співробітництва. Міжнародне співробітництво дає можливість країнам з різноманітними можливостями та інтересами об'єднати свої ресурси та спільно діяти у напрямку поліпшення життя на Землі і розширення присутності людства за межами нашої рідної планети.

Амбітні міжнародні проекти з дослідження і використання космічного простору можуть і повинні залучати нові й нові країни з розвиненими космічними технологіями. Ці проекти повинні бути підтримані міжнародними механізмами, спрямованими на розвиток співпраці для освоєння космосу, спираючись на досвід таких проектів, як МКС.

Міжнародна координація буде незамінною для майбутньої діяльності з освоєння космосу, але це потягне за собою необхідність для космічних агентств зв'язати свої цілі та стратегії і виявляти точки дотику.

Є необхідність загального консенсусу щодо довгострокового стійкого освоєння і використання косміч-

ного простору у мирних соціально-економічних цілях розвитку. Глобальна дорожня карта освоєння космосу, підготовлена Міжнародною координаційною групою з питань освоєння космосу, є чудовою базою для такого консенсусу. Мирне освоєння космічного простору має стати загальною пригодою для всього людства.

Міжнародна академія астронавтики запропонувала космічним агентствам конкретні заходи, які посилюють глобальне співробітництво в освоєнні космічного простору, результатом чого став Саміт глав космічних агентств в 2010 році. МАА вітає участь космічних агентств в такій діяльності.

ДОДАТОК 3

Міжнародна координаційна група з питань освоєння космосу: звіт за 2013 рік (короткий огляд)

Італійське космічне агентство (ASI), Італія

Пілотовані місії

– Протягом 2013 року проводилась діяльність в рамках Elite-S2.

– На цей час, як і заплановано, проводиться діяльність в рамках Постійного багаточільового модуля (ПБМ).

– Астронавт ESA, що є громадянином Італії, Лука Пармітано, майже закінчив навчання для довгострокової місії на МКС (травень — листопад 2013 р.).

– Астронавт ESA, що є громадянкою Італії, Саманта Крістофоретті, проходить підготовку для довгострокової місії на МКС в 2014—2015 роках.

– На цей час на МКС за співпраці з НАСА виконуються два експерименти Італійського космічного агентства для Green Air, ICE-GA (щодо інноваційного палива з низьким впливом на навколишнє середовище) і DIAPASON (виявлення нано-частинок).

– У 2013 році завершено дві національні наукові програми, орієнтовані на вплив космічного оточення на життя: GPM (вивчення впливу мікрогравітації та гіпоксії на клітинному рівні) і LIGRA (глибинне вивчення теоретичних основ взаємодії гравітації і людського життя, а також аналіз впливу мікрогравітації з точки зору дозиметрії та тимчасової оборотності).

Роботизовані місії

– Разом з європейськими партнерами ведеться робота за проектом «ЕхоMars».

– Продовжується діяльність за проектом DREAMS (італійський експеримент на борту «ЕхоMars 2016»).

– Продовжується збір та аналіз даних з «Mars Express» (MARSIS і PFS) і місії NASA MRO (SHARAD).

Заплановані події 2013 р.

– Участь Італії в експлуатації МКС.

– Діяльність на національному рівні та робота з ESA в рамках підготовки до місії «ЕхоMars» в 2016 і 2018 роках.

Національний центр космічних досліджень Франції (CNES), Франція

Роботизовані місії на Марс

Участь у «ЕхоMars» (співробітництво ESA/Роскосмос).

– Вантажопідійомні елементи (CHEMCAM, SAM) і наукова діяльність на «CURIOSITY» (NASA).

– Внесок у «MAVEN» (NASA).

– Внесок у посадковий модуль MASCOT на «Hayabusa-2» (астероїд — JAXA, DLR).

– Пристрій (SEIS) на місії «INSIGHT» (NASA).

– Крім того, CNES бере участь у роботизованих місіях в інших напрямках: «ROSETTA» (комета — ESA), «BEPi-COLOMBO» (Меркурій — ESA / JAXA), і «JUICE» (крижані супутники Юпітера — ESA).

Пілотовані місії

– Експлуатація та використання МКС.

– Співпраця з Китаєм у сфері серцево-судинного моніторингу (CARDIOSPACE).

– Початок спільної кампанії CNES/ESA на MEDES (дочірня компанія CNES).

– Параболічні польоти (нульова гравітація).

Китайська національна космічна адміністрація (CNSA), Китай

У 2013 р. Китай мав суттєві досягнення в сфері пілотованої космічної та місячної дослідницької програми, успішно здійснив зближення і стикування між «Шеньчжоу-10» і «Тяньгун-1», «Чан'е-3» благополучно здійснив м'яку посадку на місячну поверхню і висадив ровер «Yutu» на Місяці. Китай також активно просуває техніко-економічне обґрунтування дослідження Марса.

Пілотована космічна програма

Згідно із стратегією «Три кроки» Китайської пілотованої космічної програми, затвердженої китайським Урядом, Китай з 11 по 25 червня 2013 р. успішно провів пілотований політ «Шеньчжоу-10». Під час місії було двічі здійснено зближення і стикування «Шеньчжоу-10» з «Тяньгун-1», першого разу автоматично, а другого — з ручним управлінням екіпажем. Китайський екіпаж провів експерименти і технологічні випробування, а також наукову лекцію на орбіті для студентів. Водночас Китайське технологічне бюро пілотованих місій (CMSEO) організувало дослідження для лабораторії «Тяньгун-2» і Китайської космічної станції.

У вересні 2013 р. CMSEO і UNOOSA спільно організували Китайський семінар технологій пілотованих польотів, в якому взяли участь більше 150 учасників

з 30 країн світу. Семінар був зосереджений на таких аспектах: пілотовані польоти і дослідження космічного простору в минулому і майбутньому; науково-дослідна діяльність в умовах мікрогравітації; освіта в галузі науки про мікрогравітацію; національні, регіональні та міжнародні космічні програми.

У 2013 р. CMSEO активно шукало можливості міжнародної співпраці, організувало кілька китайсько-європейських семінарів у сфері відбору астронавтів і їхнє навчання, науково-дослідних технологій і космічних наукових експериментів. Дискусії в ході цих семінарів заклали міцну основу для майбутньої співпраці.

Поточні міжнародні проекти:

- співпраця з ESA з вивчення гамма-сплесків в космосі (POLAR);
- співпраця з CNES щодо серцево-судинного моніторингу астронавтів (CARDIOSPACE).

Дослідження Місяця

Місячний орбітальний апарат «Чан'е-3» стартував 2 грудня 2013 р., увійшов у місячну кругову орбіту 6 грудня, здійснив посадку на місячну поверхню 14 грудня і висадив місяцехід «Yutu». До 24 травня 2013 р. орбітальний апарат «Чан'е-2», запущений у 2010 році, накопичив рекордні 40 мільйонів кілометрів польоту. Орбітальний апарат «Чан'е-2» провів дослідження середовища точки Лагранжа-2 Земля — Місяць з серпня 2011 по квітень 2012 року і зондування астероїда Toutatis № 4179 13 грудня 2012 р.

Розробка місії з повернення місячних зразків «Чан'е-5» йде за планом.

Дослідження Марса

Китайська національна космічна адміністрація здійснила перше техніко-економічне обґрунтування для дослідження Марса і внесла технічні пропозиції щодо запуску першої місії на Марс в 2018 році. Пропозиція включає в себе один орбітальний апарат і один ровер. На 64-му Міжнародному астронавтичному конгресі в 2013 року у Пекіні CNSA провела обговорення з ESA і Роскосмосом перспектив співпраці в галузі дослідження Марса.

Канадське космічне агентство (CSA), Канада

Діяльність та інфраструктура космічних досліджень

У 2013 році CSA продовжило експлуатацію в рамках МКС Мобільної системи обслуговування (MSS) для проведення технічного обслуговування та операцій з постачання Міжнародної космічної станції. «Canadarm2» забезпечив стиковку з трьома апаратами постачання: «SpaceX-2», «HTV-4» і «Orbital Demo». MSS також підтримує діяльність у відкритому космосі Росії та США і здійснює передачу вантажів з «SpaceX-2» і «HTV-4».

Космонавти, біологія та космічна медицина

Ветеран астронавт Кріс Хедфілд приземлився 13 травня 2013 р. після п'ятимісячного перебування на МКС (експедиція 34/35) і завершив свою реабілітацію після польоту. Він звільнився з CSA на початку липня 2013 року. Два активних астронавти, Джеремі Хансен і Девід Сен-Жак, успішно завершили свій навчальний курс і тепер мають право на тривалі польоти на МКС.

Група CSA «Космічного здоров'я та біології» займається виявленням, опрацюванням і зниженням ризиків для людини під час тривалої космічної подорожі.

Розвиток дослідження космосу

Дослідження планет

У 2013 році CSA продовжило брати участь у дослідженнях наукової лабораторії Марса (NASA) за допомогою Канадського рентгенівського спектрометра альфа-частинок (APXS). APXS надає дані про хімічний склад марсіанських порід і ґрунтів.

У 2013 році розроблявся лазерний висотомір «OSIRIS-REX» (OLA) для запланованої на 2016 рік місії NASA «New Frontier». Це буде перша участь Канади в місіях з доставки зразків.

Астрономія

У 2013—2013 рр. CSA передало NASA датчик системного наведення (FGS) і формувач ближньої інфрачервоної області світла та спектрограф (NIRISS) — інструменти для космічного телескопа Джеймса Вебба (JWST), запланованого до запуску в 2018 році. CSA поставляє електроніку для УФ-детекторів на обсерваторію «ASTROSAT», які були доставлені до Індії в 2010 році. Канада також співпрацює з ESA в рамках місії «Herschel» і «Planck», запущених в 2009 році.

З моменту свого запуску в 2003 році мікросупутник Канади — космічний телескоп «MOST», продовжує здійснювати цінний внесок в області зоряної астрономії. На основі аналогічних технологій, в лютому 2013 року був запущений супутник для спостереження навколоземних об'єктів (NEOSSat).

Ведучи спостереження неба поблизу Сонця, апарат допоможе виявити нові навколоземні астероїди.

CSA надасть систему лазерної метрології для рентгенівської обсерваторії «ASTRO-H» JAXA на 2014 рік. CSA також підтримало розвиток наносупутників «BRITE» для виконання фотометрії яскравих зірок з орбіти (перші два супутники запущені в 2013 році, ще два супутники заплановано запустити в 2014 р.).

Розробка передових технологій для досліджень

Метою Основної програми досліджень CSA є забезпечення готовності Канади для участі в майбутніх пілотованих і роботизованих місіях. Основними технологіями є: оптика, зменшення випромінювання, обслуговування роботів, спектрометри, передові системи охорони здоров'я екіпажу, ровери, буріння і забір зразків.

2013—2014 рр. стали першими роками робіт з розробки прототипів з використанням прискореного фінансування від плану економічних дій Канади. CSA зосереджене на використанні цих нових систем в аналогових місіях і підвищенні технологічного рівня готовності (TRL) для майбутніх потенційних космічних місій.

Центр авіації та космонавтики (DLR), Німеччина

У 2013 році DLR продовжував розробляти і здійснювати Космічну програму, засновану на Національній космічній стратегії, опублікованій в 2010 році. DLR спільно з німецькими науково-дослідними інститутами та промисловістю беруть активну участь у діяльності в рамках MKC, ExoMars та підготовці місій на Місяць разом з ESA. У лютому 2013 року DLR відкрив новий офіс у Токіо, що сприятиме тіснішому партнерству з JAXA.

Заходи для пілотованих місій

Німеччина підтвердила свою підтримку європейських програм освоєння і використання MKC. Це включає в себе першорядну роль німецької промисловості в технічній розробці Європейського сервісного модуля для пілотованого апарату «Оріон» НАСА. DLR разом з ESA, готує політ Європейського космонавта Олександра Герста на MKC в травні 2014 р.

У квітні/травні 2013 року адміністрація DLR надала корисне навантаження «Omegahab» для місії «Біон-М1». Це міні-екосистема призначена для роботи в якості системи життєзабезпечення в умовах мікрогравітації.

У липні 2013 року на щорічній нараді Асоціації дослідників космосу (ASE) у Кельні зібралось понад 50 міжнародних астронавтів. Так трапилось, що у цей же час у Кельні відбувся симпозіум Міжнародної академії астронавтики, що дозволило інтенсивний обмін результатами і обговорення подальших перспектив.

Роботизовані місії, обладнання

- У червні 2013 року відзначалось 10-річчя успішного складання 3D-карти Марса за допомогою камер високої роздільної здатності (HRSC) («Mars Express»).

- На марсоході «Opportunity» прилади APXS і MIMOS продовжують бездоганно працювати.

- Німеччина зробила значний внесок у розвиток детекторів випромінювання RAD на марсоході НАСА «Curiosity».

- Німецькі вчені завершили карту астероїда Веста у вересні 2013 року.

Для місії ESA «ExoMars», запланованої на 2018 рік, DLR розробляє молекулярний аналізатор (MOMA) разом з NASA і французьким космічним агентством, а також разом з Великобританією — камеру високої роздільної здатності «Ramsat». Ці прилади були випробувані влітку 2013 року.

У листопаді 2013 року DLR організувало національний конкурс роботизованих систем для виконання завдань планетарної розвідки, в якому взяли участь десять академічних і промислових команд.

Дослідницькі інститути DLR готують посадковий модуль (MASCOT) для польоту на «Hayabusa-2» JAXA в 2014 році. Після підписання меморандуму про взаєморозуміння між DLR і JAXA в 2012 році, DLR і CNES підтвердили своє партнерство по MASCOT в червні 2013 року. Протягом 2013 року технічні команди вдосконалили обладнання для місії і доставили перші тестові моделі для JAXA. Розпочато складання моделі вже почалася, яка буде доставлена для інтеграції на космічний корабель на початку 2014 року. Водночас інститут космічних систем DLR тестує різні сценарії висадки посадкового апарату «Rosetta» на астероїд в 2014 році.

Інші важливі космічні події

22 вересня 2013 р., DLR провела Німецький космічний день в Кельні, у якому взяли участь науково-дослідні та інші установи. Зібралось понад 30000 відвідувачів.

DLR брало активну участь в паризькому авіасалоні в Ле Бурже в червні 2013 року і Російському МАКС у Москві в серпні 2013 шляхом демонстрації німецьких науково-технічних досягнень для партнерів, зацікавлених експертів та громадських відвідувачів.

Європейське космічне агентство (ESA)

Міжнародне співробітництво

У січні робоча група ESA відвідала астронавтичний центр Китаю для обговорення та обміну методами підготовки космонавтів. А після цього відбулась зустріч між робочою групою ESA та Китайською національною космічною адміністрацією для обговорення потенційної співпраці в пілотованих космічних польотах.

Як продовження розробки Європейського сервісного модуля для НАСА «Оріон» / багатопільового пілотованого апарату, пройшли попередні обговорення між ESA і НАСА для визначення варіантів можливого розширення співпраці в галузі транспортних систем.

ESA і Роскосмос підписали документ про створення спільної програми використання MKC.

Міжнародна космічна станція (MKC) / низька навколоземна орбіта

Четвертий автоматичний транспортний апарат (ATV-4) «Альберт Ейнштейн» був успішно запущений 5 червня з Гвіанського космічного центру з рекордним вантажем в 6600 кг. 28 жовтня він відстикувався від MKC і 2 листопада згорів в атмосфері. П'ятий транспортний апарат «Жорж Леметр», останній з автоматичних апаратів, був відвантажений 5 жовтня з гавані Бремена для запуску в червні 2014 року.

Запуск Європейського робота-маніпулятора, у зв'язку з проблемами в передачі палива, відбудеться не раніше ніж 25 квітня 2014 р.

Астронавта ESA Лука Пармітано і ще двох членів екіпажу 28 травня було запущено на борту російської ракети «Союз» з космодрому Байконур (Казахстан). Разом з астронавтом NASA С. Кессіді Лука виконав два виходи у відкритий космос. Повернення на Землю 11 листопада. Політ А. Герста, заплановано на травень 2014 року, а Саманти Крістофоретті — на листопад 2014 року. Вони завершують своє навчання.

Дослідження Місяця

За підсумками засідання Ради Міністрів ESA, що відбулось в Неаполі (Італія) в листопаді 2012 року, був розроблений новий підхід до досліджень Місяця, оснований на спільних інтересах з Роскосмосом. Основний наголос робиться на місії «Луна-Ресурс» з метою повернення зразків з місячних полюсів. Генеральний директор ESA і глава Роскосмосу 18 червня на Ле Бурже у Парижі підписали Протокол про взаєморозуміння з визначення майбутньої співпраці ESA-Роскосмос для дослідження Місяця.

Дослідження Марса

Головні зміни в програмі «ЕхоMars» щодо співпраці ESA-Роскосмос були затверджені підписанням Угоди між ESA і Роскосмосом щодо співпраці в сфері роботизованих досліджень Марса та інших тіл Сонячної системи 13 березня 2013 року. Двостороння програма «ЕхоMars» складається з двох місій в 2016 році і 2018 році. Місія 2016 буде нести зонд ESA для виявлення малих газів (TGO) і Модуль спуску і посадки (EDM), які будуть запущені за допомогою російської ракети-носія «Протон». Місія 2018 складатиметься з Модуля ESA «Carriger», який доставить російський Спусковий апарат і ровер ESA на Марс. Місія 2016 року у стадії остаточної розробки, а місія 2018 проходить системні тестування.

Повернення зразків с Марса (MSR). Програма MREP (2013—2017) почалася після погодження державами-членами на Раді Міністрів ESA в листопаді 2012 року.

У 2013 році були проведені переговори з Роскосмосом про співпрацю після місій «ЕхоMars», таких як місія з повернення зразків «Фобос». Крім того, знову проводяться дискусії в рамках Міжнародної робочої групи з дослідження Марса (IMEWG).

Космічні перевезення

Істотний прогрес був досягнутий щодо Міжнародного стикувального механізму (IBDM), який є системою, здатною зістикуватися з транспортними засобами різних мас. 16 січня на спільній прес-конференції з NASA було оголошено про співпрацю ESA і NASA за Сервісним модулем багатоцільового пілотованого апарату (MPCV — ESM). Роботи були розпочаті на початку року, і попередня оцінка повинна бути в листопаді.

Підготовчі заходи

У вересні на Сардинії було проведено унікальну програму навчання космонавтів ЄКА. Шестеро учасників провели два тижні в глибині печер, в темряві і холоді. Вони були відокремлені від зовнішнього світу, виконуючи наукові дослідження та шоденні завдання, так само, як у космосі. ЄКА також провів два параболічні польоти з A300 для виконання фізичних та біологічних наукових експериментів.

Тривають дослідження і розвиток технологій для майбутніх досліджень, у тому числі EXPERT. Після труднощів в отриманні дозволу від російського уряду для запуску EXPERT на ракеті «Хвиля» з підводного човна, аналіз альтернативних носіїв для даної місії експертів були проведені з американськими компаніями і NASA.

У рамках спільного проекту ESA/EC пройшло стартова нарада щодо зниження відходів і підвищення продуктивності, на якій були присутні 70 промисловців і фахівців з Європи та Австралії. «AMAZE» є найбільшим проектом адитивного виробництва у світі і постачає стратегічні технології для космічних і некосмічних фірм.

Триває підготовка до експлуатаційного і комунікаційного тесту (OPSCOM) на МКС, де Евробот буде керуватися на відстані. Додаткові експерименти Мережкових додатків заплановані на 2014. На підставі розробки плану розвитку, проведеної в 2012 році в рамках підготовки Ради Міністрів, були оптимізовані плани закупівель для різних науково-дослідних програм.

ESA підтримує діяльність ISECG, беручи участь у робочих групах і продовжує вести секретаріат і веб-сайт.

Японське агентство аерокосмічних досліджень (JAXA), Японія

«Hayabusa-2»

JAXA готує наступну місію під назвою «Hayabusa-2», запуск якої запланований на 2014 рік, з передбачуваним прибуттям на астероїд у 2018 році і очікуваним поверненням на Землю в 2020 році.

Як і «Hayabusa», ця місія повинна доставити зразки з астероїда, але іншого роду. Астероїд Ітокава (Hayabusa), складається з скелястих речовин, а астероїд 1999JU3 (Hayabusa2), очікується, що міститиме набагато більше органічних речовин і води. Завдання «Hayabusa-2» полягає у вивченні води і органічних речовин, які були присутні, коли створювалась Сонячна система.

Роботизовані місії на Місяць

SELENE-2 приземлиться на Місяці і за допомогою ровера буде досліджувати його поверхню. SELENE-2 допоможе розкрити таємницю походження та еволюції Місяця і Землі. Також планується місія з повернення місячних зразків SELENE-3.

МКС (KIBO і KOUNOTORI)

Японський астронавт Коїші Ваката втретє прибув на борт МКС 7 листопада 2013 р. За цей час він провів кілька медичних досліджень впливу невагомості на астронавтів.

Н-П Транспортний апарат (HTV)-4 був запущений 4 серпня 2013 р. і зістикувався з МКС 10 серпня 2013 р. Апарат доставив на МКС продукти харчування, воду та обладнання. Після цього HTV-4 був завантажений відходами МКС і успішно увійшов в атмосферу 7 вересня 2013 р.

Ракета HX та Орбітальний транспортний апарат

У 2013 році була обговорена концепція нової системи запуску HX, і було прийнято рішення розпочати її розробку з наступного фінансового року. Крім того, JAXA продовжило науково-дослідні роботи з удосконалення орбітальних транспортних засобів, ґрунтуючись на досвіді ракети-носія H2A і зонда Hayabusa.

Корейський інститут аерокосмічних досліджень (KARI), Республіка Корея

Третя спроба запуску корейської космічної ракети-носія «Наго» (KSLV-I) була успішно здійснена з космічного центру Наро в Кореї 30 січня 2013 р. KSLV-I доставила науково-технічний супутник на низьку навіколоземну еліптичну орбіту.

Наступним кроком KARI є самостійна розробка ракети-носія KSLV-II — триступеневої ракети на рідкому паливі з потужністю двигунів в 300 тонн, яка буде здатна вивести в космос супутник вагою 1,5 тонни. KSLV-II орієнтовно планується завершити до 2022 року.

Що стосується майбутніх космічних дослідницьких експедицій, техніко-економічне обґрунтування для дослідження Місяця буде завершено до кінця року. Одночасно з цим KARI проводить фундаментальні дослідження в різних суміжних областях, таких як орбітальний зонд / посадковий модуль / ровер. KARI також розширює міжнародне партнерство з досліджень Місяця.

KARI працювала з JAXA для реалізації спільного космічного експерименту на борту МКС.

Що стосується супутникових програм, четвертий корейський багатоцільовий супутник «KOMPSAT-5» був запущений з космодрому «Ясний» в серпні 2013 року. Крім цього, для розвитку інтересів у студентів до космічних досліджень реалізується програма Cubesat, в якій студенти самі виготовляли супутник.

KARI продовжує розширювати свою космічну програму і прагне стати великим гравцем в дослідженні космосу, безперервно шукає відповідних партнерів для міжнародної співпраці.

Національне управління з авіації і дослідження космічного простору (NASA), США

У 2013 році NASA домоглося значного прогресу в освоєнні космосу: науково-технічні досягнення досліджень на Міжнародній космічній станції (МКС), нова місія NASA щодо захоплення і перенаправлення невеликих астероїдів, успішний запуск другого комерційної місії дозаправки МКС, а також запуск нових наукових місій, в тому числі зондів LADEE (Місяць) і MAVEN (Марс).

Наукових досягнень на МКС все більше, так само як і даних, що повертаються автоматизованими апаратами. Наприклад, у квітні дослідники оголосили наукові результати, зібрані на МКС за допомогою Альфа-магнітного спектрометра (AMS), які можливо вказують на існування або частинки темної матерії, або на обертovu нейтронну зірку (пульсар). Крім того, наприкінці вересня була успішно проведена доставка вантажів на МКС, що фінансуються Центром з розвитку науки в космосі (CASIS).

Напередодні майбутніх завдань за межами низької навіколоземної орбіти, NASA продовжує використовувати МКС для виконання біологічних досліджень та тестування нових технологій. Так, для вивчення наслідків тривалого космічного польоту на здоров'я і продуктивність людини на 2015 рік планується тривала місія за участю астронавтів Росії та США. Крім того, NASA підписало контракт з «Bigelow Aerospace», щоб перевірити інноваційний надувний модуль на МКС в 2015 році. Нарешті, наступного року на МКС буде протестований 3D-принтер з виготовлення запасних частин на орбіті.

NASA представило план Місії з перенаправлення астероїда: захоплення невеликого астероїда в навіколоземній орбіті, перенаправлення його на орбіту Місяця, і його дослідження космонавтами «Оріона». На космічному апараті, який захопить астероїд, буде використаний 40-кіловатний електродвигун. Під час виходу у відкритий космос астронавти зберуть зразки для повернення на Землю.

NASA продовжує розробляти «Оріон» і космічний ракетний комплекс (КРК). У червні була проведена проектна експертиза КРК. Обладнання для виготовлення головних елементів КРК було встановлено і випробувано на об'єкті Michoud. У рамках підготовки до першого польоту КА «Оріон» на ракеті «Дельта IV» в 2014 році, в Космічному центрі Кеннеді почалося збирання і випробування транспортного засобу.

У серпні NASA обрало нову групу кандидатів з восьми астронавтів для майбутніх досліджень в нових напрямках в Сонячній системі. У жовтні «Orbital Sciences Corporation» завершила демонстраційну місію на МКС Комерційної орбітальної системи тран-

спортування (COTS), закінчивши, таким чином, успішну програму, в якій партнери NASA «Orbital Sciences» і «SpaceX» розробили нові ракети США і космічний апарат для транспортування вантажів на низьку навколоземну орбіту і МКС.

Поточні наукові місії NASA продовжують давати важливі результати. Ровер «Curiosity» продовжує успішну місію на поверхні Марса.

Державне космічне агентство України (ДКАУ), Україна

Проекти

«Циклон-4». протягом року українські підприємства у співпраці з бразильськими партнерами продовжували роботи в рамках проекту «Циклон-4». Здійснено поставку на космодром трьох партій технологічного наземного обладнання, ведеться будівництво споруд наземного комплексу та інфраструктури, здійснюється виготовлення і наземне відпрацювання частин ракети-носія.

«Наземний старт». 31 серпня в рамках проекту з космодрому «Байконур» був здійснений пуск ракети-носія «Зеніт-2SB», яка вивела на цільову орбіту телекомунікаційний супутник «Амос-4». Ракета «Зеніт-2SB» була розроблена ДП «КБ «Південне» і виготовлена на заводі «Південмаш» у співпраці з російськими та українськими підприємствами.

«Дніпро». Були виконані два пуски ракети-носія «Дніпро» з пускової бази «Ясний» (Росія) у рамках українсько-російсько-казахстанської конверсійної програми з надання пускових послуг. 22 серпня виведений на орбіту супутник дистанційного зондування Землі «KompSat-5», 21 листопада — група з 24 космічних апаратів. Ракета-носіє «Дніпро» була створена на базі міжконтинентальної балістичної ракети SS-18, яка була розроблена ДП «КБ «Південне» і виготовлена на заводі «Південмаш».

Діяльність

16—17 травня у Києві (Україна) відбулись перші відкриті консультації з Міжнародного кодексу поведінки у відкритому космосі, в яких взяли участь делегації з 61 держави світу.

Українські офіційні делегації взяли участь і виступили з заявами і технічними доповідями на сесіях Комітету Організації Об'єднаних Націй з мирного використання космічного простору.

Представник України був членом Групи урядових експертів (ГУЕ) з питань прозорості і заходів довіри в космічній діяльності та взяв участь у трьох зустрічах. Результатом роботи ГУЕ є звіт, який буде представлений на 68-й сесії Генеральної Асамблеї ООН.

Український експерт взяв участь у якості спікера на регіональному семінарі UNIDIR «Зміцнення довіри в євразійській космічній діяльності через норми поведінки», що відбувся в Астані (Казахстан) в жовтні 2013 року.

У липні у м. Євпаторія пройшла четверта Нарада представників органів виконавчої влади держав-учасниць СНД з питань співробітництва в космічній сфері. Метою наради було обговорення подальших напрямків розвитку багатостороннього співробітництва в космічній сфері в рамках СНД.

У вересні в Національному центрі управління та використання космічних засобів у Євпаторії відбулась 13-та українська конференція з космічних досліджень. У рамках конференції учасники обговорили можливості та перспективи України в астрофізичних і космологічних дослідженнях в поточних і майбутніх космічних місіях.

Космічне агентство Великобританії (UKSA), Великобританія

В Харвелі з ESA розроблено новий автономний роботизований об'єкт, який буде використовувати імітаційні моделі у поєднанні з польовими випробуваннями для перевірки автономних систем для поверхонь планет. Випробування марсохода «SAFER» були успішно завершені в жовтні в пустелі Атакама, продемонструвавши необхідні технології і досвід для віддаленого дослідження Марсу.

Також в Харвелі продовжилися дослідження аналогового об'єкта, який буде надавати допомогу в роботі приладів для планетарної поверхні. Ведеться робота для виробництва ядерних ізотопів для радіоізотопних енергетичних систем — витяг америцію-241 з плутонію.

У 2013 р. перший астронавт ESA з Великобританії, Тімоті Пік, був призначений на місію на МКС для запуску в грудні 2015 року.

З січня 2013 р. Великобританія була активним членом програми мікрогравітації ESA. Пріоритетні області для Великобританії включають в себе дослідження матеріалів, біомедицину та астробіологію і кілька проектів у стадії реалізації в цих областях.

Великобританія продовжує підтримувати підготовчу програму ESA щодо роботизованої розвідки Марсу і є активним учасником програми «ЕхоMars», розробляючи ровер і наукові інструменти. Великобританія також вносить свій внесок в місію NASA «InSight» на Марс, забезпечуючи мікросейсмометр.

Стаття надійшла до редакції 21.02.14

Б. А. Атаманенко, Р. В. Федонюк

**МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО
КАК ИНСТРУМЕНТ УЧАСТИЯ
В ГЛОБАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПРОЕКТАХ**

Представлена информация о масштабных международных мероприятиях в космической сфере, которые прошли 9—10 января 2014 года в Вашингтоне (США) — Международного правительственного форума по вопросам освоения космоса и Саммита глав космических агентств. Отмечены основные направления дискуссий во время мероприятий и приведены их итоговые документы. Проанализирована возможность использования выводов, сделанных в рамках указанных мероприятий, для укрепления космического статуса Украины. Приведены примеры участия ГКА Украины в международных космических инициативах, в частности в Международной координационной группе по вопросам космических исследований (ISECG). Предложен на рассмотрение Годовой отчет ISECG за 2013 год.

B. A. Atamanenko, R. V. Fedoniuk

**INTERNATIONAL COOPERATION
AS A TOOL OF PARTICIPATION
IN GLOBAL SPACE PROJECTS**

We present some information concerning the large scale international events in space sphere, such as International Space Exploration Forum and Heads of Space Agencies Summit on Exploration, which took place in Washington DC (USA) on 9—10 January 2014. The main directions of discussions during the mentioned events are highlighted and the outcome documents are listed. We analyze the possibility to use the experience gained from the actions designed to strengthen the aerospace status of Ukraine. Some examples of SSAU participation in international space initiatives including the International Space Exploration Coordination Group (ISECG) are mentioned. The Global Exploration Roadmap and the ISECG report 2013 are proposed for a consideration.

УДК 533.95

В. А. Шувалов, Н. А. Токмак, А. Г. Цокур, Г. С. Кочубей

Інститут технічної механіки Національної академії наук України
і Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМОЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОД «МАГНИТНЫМ ПАРУСОМ»

Показано, что изменение взаимной ориентации векторов собственного магнитного поля тела и скорости потока плазмы является эффективным средством управления динамическим взаимодействием в системе «космический аппарат — плазма»: оно позволяет реализовать режим взаимодействия с ненулевым аэродинамическим качеством и, как следствие, режимы торможения и ускорения «намагниченного» тела в гиперзвуковом потоке разреженной плазмы.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие «намагниченного» тела с гиперзвуковым потоком разреженной плазмы характерно для двух аэрокосмических систем: космических аппаратов, движущихся в плазме солнечного ветра в межпланетном пространстве и в ионосфере Земли на высотах 800—1000 км под «магнитным парусом» [18, 20—22], а также для спускаемых летательных аппаратов, движущихся под «магнитным парашютом» на высотах 50—75 км в атмосфере Земли [1, 14, 19]. Применение магнитогидродинамических (МГД) систем для управления движением летательных аппаратов стало вполне реальным с развитием технологий создания компактных источников сильных магнитных полей на основе сверхпроводящих материалов.

Магнитогидродинамическое взаимодействие «намагниченных» космических аппаратов (с собственным магнитным полем) с потоком плазмы солнечного ветра и с ионосферной разреженной плазмой — движение космического аппарата (КА) под «магнитным парусом» — происходит, как правило, при $\mathbf{B}_w \perp \mathbf{U}_\infty$ ($\mathbf{B}_w$ — вектор индукции собственного магнитного поля тела, $\mathbf{U}_\infty$ — вектор скорости набегающего потока раз-

реженной плазмы). Согласно численным оценкам [20, 22], собственное магнитное поле КА позволяет эффективно управлять его движением в ионосфере Земли и в межпланетном пространстве, если $\text{Re}_m \gg 1$, $P_{BW} / P_d \gg 10$ ($\text{Re}_m = \mu \sigma U_\infty R_w$ — магнитное число Рейнольдса, μ — магнитная проницаемость, σ — проводимость плазмы, R_w — характерный линейный размер КА, $P_{BW} = B_w^2 / 2\mu$ — магнитное давление, $P_d = \rho_\infty U_\infty^2 / 2$ — скоростной напор (динамическое давление); ρ_∞ — плотность набегающего потока).

Возможность управления динамическим взаимодействием твердого тела с гиперзвуковым потоком сильно разреженной плазмы с помощью собственного магнитного поля практически не подтверждена экспериментально [2, 14].

Цель данной работы — подтвердить экспериментально возможность управления динамическим взаимодействием (силой сопротивления и подъемной силой) «намагниченной» сферы с гиперзвуковым потоком бесстолкновительной плазмы (движение под «магнитным парусом»).

ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ «НАМАГНИЧЕННОЕ ТЕЛО — ПЛАЗМА»

«Космический аппарат — плазма». При отсутствии собственного магнитного поля ($B_w = 0$)

для КА с характерным размером $R_W \sim 10^3$ м в плазме солнечного ветра: $Re_m \gg 1$, $r_e / R_W \sim 1$, $r_i / R_W \gg 1$, $R_W / \lambda_d \geq 100$, $S_i \approx 10$ (здесь $r_{i,e}$ — ларморовские радиусы ионов и электронов, λ_d — дебаевский радиус в невозмущенной плазме, $S_i = U_\infty / V_i$ — скоростное отношение, U_∞ — скорость потока плазмы солнечного ветра, V_i — тепловая скорость ионов) [3].

В ионосфере Земли на высотах 800—1000 км «ненамагниченный» КА с характерным размером $R_W \sim 1$ м взаимодействует с гиперзвуковым потоком разреженной плазмы при $Re_m > 1$, $r_e / R_W \ll 1$, $r_i / R_W \geq 1$, $R_W / \lambda_d \geq 100$, $S_i \approx 5.2$ (U_∞ — скорость потока ионосферной плазмы относительно КА) [6]. Для КА в ионосфере Земли и в плазме солнечного ветра частично выполняются условия МГД-приближения [10]:

1) $\tau_{Ri} \gg \omega_{ep}^{-1}$, где $\tau_{Ri} = 2R_W / U_\infty$ — временной масштаб макроскопических изменений в плазме, ω_{ep} — плазменная (ленгмюровская) частота;

2) $\tau_{Ri} \gg v_{em} / \omega_{ep}^2$, где $v_{em} = v_{ei} + v_{en}$ — средние частоты соударения электронов с ионами и нейтралами. Условие $\tau_{Ri} \gg v_{em}^{-1}$ не выполняется.

Для «намагниченных» КА в ионосфере Земли на высотах 800—1000 км для $B_W \approx 0.1$ Тл, $P_{BW} / P_d \gg 1$, $R_W \sim 1$ м и в межпланетном пространстве для $R_W \sim 10^3$ м гиперзвуковой поток полностью замагниченной разреженной плазмы (параметр Холла $\omega_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta}^{-1} \gg 10$) взаимодействует с аппаратом при $r_\alpha / R_W \ll 1$. Здесь $\omega_{\alpha\beta}$ ($\alpha = e, i$) — ларморовская частота ионов и электронов; $v_{\alpha\beta} = v_{\alpha i} + v_{\alpha n}$ — средние частоты соударений электронов с ионами и нейтралами и ионов с ионами и нейтралами.

«Сфера — плазма» на стенде. Экспериментальные исследования проводились на плазмодинамическом стенде Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины. Вакуумная камера стенда — цилиндр длиной 3.5 м и диаметром 1.2 м — показана на рис. 1. При проведении экспериментальных исследований в вакуумной камере в рабочем сечении струи при рабочем давлении 4 мН/м² реализованы следующие значения параметров набегающего потока разреженной плазмы частично диссоциированного азота: скорость направленного

движения ионов $8.1 \leq U_\infty \leq 15.6$ км/с, концентрация ионов $2 \cdot 10^{14} \leq N_i \leq 2 \cdot 10^{15}$ м⁻³ и нейтралов $N_n \approx 1.4 \cdot 10^{17}$ м⁻³, температура электронов $T_e \approx 2.6$ эВ, ионов $T_i \approx 0.52$ эВ и нейтральных частиц $T_n \approx 0.23$ эВ, степень диссоциации ионного компонента $\xi_{di} \approx 0.6$, средняя масса ионов $M_i \approx 19.6$ а. е. м, средняя скорость направленного движения нейтральных частиц $U_n \approx 600$ м/с, степень ионизации $10^{-3} \leq \varepsilon \leq 10^{-2}$, скоростное отношение для ионов $3.6 \leq S_i \leq 6.9$, проводимость плазмы $140 \leq \sigma \leq 1900$ Ом⁻¹м⁻¹, индукция внешнего магнитного поля $B_\infty \approx 1$ мТл, диаметр ядра струи около 30 см (область с равномерным по сечению распределением скорости, концентрации заряженных частиц и индукции внешнего магнитного поля), скоростной напор потока $0.2 < p_d \leq 20$ мН/м².

В эксперименте использовались три алюминиевые сферы радиусами $R_{W1} = 4.35$ см, $R_{W2} = 5.25$ см и $R_{W3} = 6.5 \cdot 10$ см. Параметры потока на стенде: $1.3 \cdot 10^{-5} \leq v_{em}^{-1} \leq 2.4 \cdot 10^{-5}$ с, $8 \cdot 10^8 \leq \omega_{ep} \leq 4 \cdot 10^9$ с⁻¹, $10 \leq Re_m \leq 260$, $52 \leq R_W / \lambda_d \leq 380$, $7.6 \leq r_i / R_W \leq 11.3$, $0.08 \leq r_e / R_W \leq 0.13$. Другими словами: $Re_m \geq 10$, $R_W / \lambda_d \geq 100$, $r_e / R_W \ll 1$, $r_i / R_W > 1$. Кроме того, для «ненамагниченных» сфер в потоке разреженной плазмы на стенде выполняются два условия МГД-приближения [10]:

1) $\tau_{Ri} \gg \omega_{ep}^{-1}$ ($5.6 \leq \tau_{Ri} \leq 16$ мкс),

2) $\tau_{Ri} \gg v_{em} / \omega_{ep}^2$.

На плазмoeлектродинамическом стенде с «намагниченными» сферами при $B_W \geq 20$ мТл

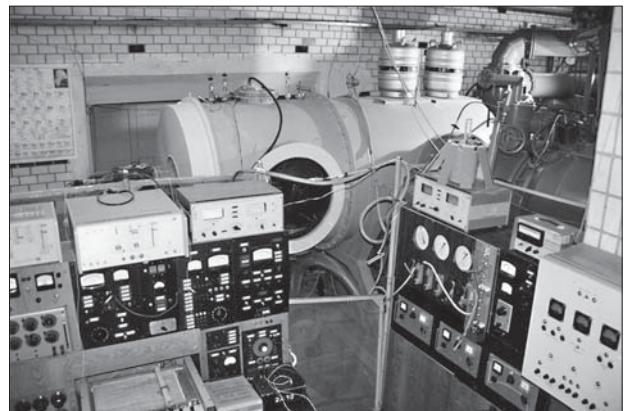


Рис. 1. Вакуумная камера плазмодинамического стенда Института технической механики НАНУ и ДКАУ

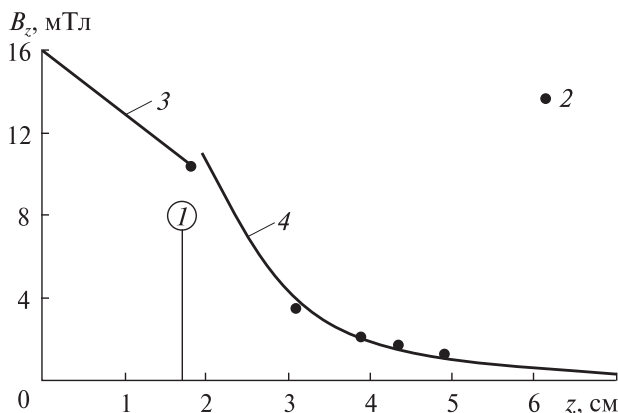


Рис. 2. Распределение осевой составляющей B_z магнитного поля соленоида № 1: 1 — торец соленоида, 2 — измеренные значения B_z , 3 — расчетные значения на оси соленоида, 4 — расчетные значения $B_z = P_m / 2\pi z^3$

(B_w — индукция магнитного поля на поверхности сферы) взаимодействует гиперзвуковой поток разреженной замагниченной плазмы: $r_e / R_w \ll 1$, $r_i / R_w < 1$, $\omega_{iB} v_{im}^{-1} > 1$, $\omega_{eB} v_{em}^{-1} \gg 1$. Реализация на стенде в физическом эксперименте приведенных условий взаимодействия тела с гиперзвуковым потоком замагниченной плазмы позволяет предположить, что выявленные в ходе исследований закономерности динамического взаимодействия в системе «намагниченное тело — плазма» могут быть использованы для определения «магнитных» составляющих коэффициентов подъемной силы c_{By} и силы сопротивления c_{Bx} КА в ионосфере Земли и в межпланетном пространстве.

В качестве источников собственного магнитного поля сфер использовались два соленоида, размеры которых приведены в таблице.

Магнитный момент соленоидов лежит в диапазоне от $P_m = 0.21$ мкТл·м³ до $P_m = 45$ мкТл·м³, при этом $7.2 \leq P_{wW} / P_d \leq 1.1 \cdot 10^5$. Индукция маг-

Параметры соленоидов, использованных в качестве источников собственного магнитного поля сфер

Номер соленоида	Внешний диаметр D_{S1} , см	Длина L_{S1} , см	Внутренний диаметр d_{S1} , см
1	5	3.4	2
2	6	6	1.5

нитного поля на поверхности сферы при кратковременном пропускании тока силой до 10 А достигала максимальных значений $B_w^{\max} = 200$ мТл; минимальные значения — $B_w^{\min} = 0.8$ мТл.

При измерении индукции магнитного поля и модуля магнитного момента P_m использовался магнитометр. Погрешность измерения P_m не более $10 \text{ мА} \cdot \text{м}^2$. Распределение осевой составляющей индукции B_z магнитного поля соленоида № 1 показана на рис. 2. Для используемых соленоидов ($R_S / R_w \leq 0.6$ и $L_S / R_w \leq 0.6$) распределение осевой B_z и радиальной B_p составляющих магнитного поля на расстоянии $z / R_w \geq 0.8$ и $\rho / R_w \geq 0.8$ от центра сферы соответствует дипольному полю: $B_z = P_m / 2\pi z^3$ и $B_p = P_m / 4\pi r^3$ [17].

СТРУКТУРА ПОЛЯ ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ У ПОВЕРХНОСТИ «НАМАГНИЧЕННОЙ» СФЕРЫ

Исследования проводились в стационарном режиме, детали техники эксперимента приведены в работах [14, 16].

Структура поля течения плазмы у поверхности «ненамагниченной» сферы ($B_w = 0$) радиусом $R_{w2} \approx 5.25$ см показана на рис. 3, а. Структура поля течения плазмы для «намагниченной» сферы ($B_w = 200$ мТл) для углов θ между векторами $\mathbf{U}_\infty$ и $\mathbf{B}_w$, равных 170° , 125° , 100° , 75° , 50° , показана на рис. 3, б—е соответственно.

На рис. 4, а приведено осевое распределение плотности ионного тока насыщения j_i / j_{oi} на цилиндрический зонд (j_{oi} — плотность тока, измеренного на срезе ускорителя) при перемещении его вдоль осевой линии искусственного плазменного образования (ИПО) — от среза плазменного ускорителя до поверхности «намагниченной» сферы при $\mathbf{B}_w \uparrow \downarrow \mathbf{U}_\infty$. Радиальные распределения ионного тока насыщения при перемещении зонда в вертикальной плоскости в трех сечениях, обозначенных цифрами I—III, показаны на рис. 4, б—г. При измерении плотности ионного тока цилиндрический зонд (длиной $l_p = 4$ мм и радиусом $r_p = 4.5$ мм из молибдена) ориентирован ортогонально к силовым линиям собственного магнитного поля сферы. Радиальные распределения плотности ионного тока в сечениях I — III (рис. 4, б—г) подтверждают струйный характер поля течения плазмы

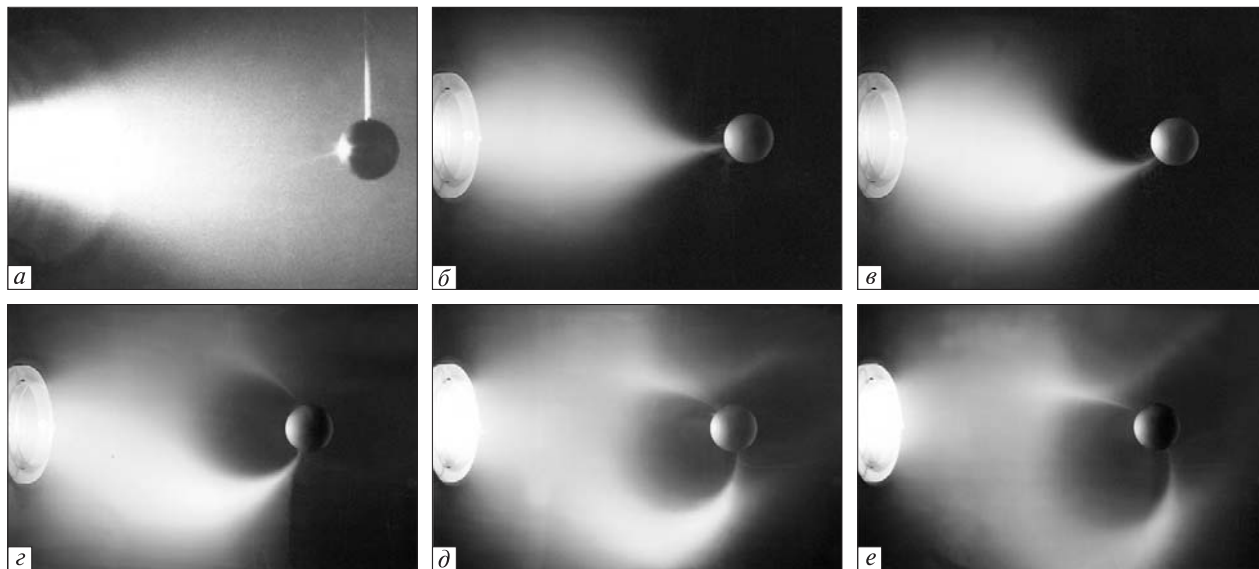


Рис. 3. Обтекание «намагниченной» сферы гиперзвуковым потоком плазмы: а — для $B_w = 0$, б — е — для $B_w = 200$ мТл при $\mathbf{I} = 170^\circ, 120^\circ, 100^\circ, 80^\circ, 50^\circ$ соответственно

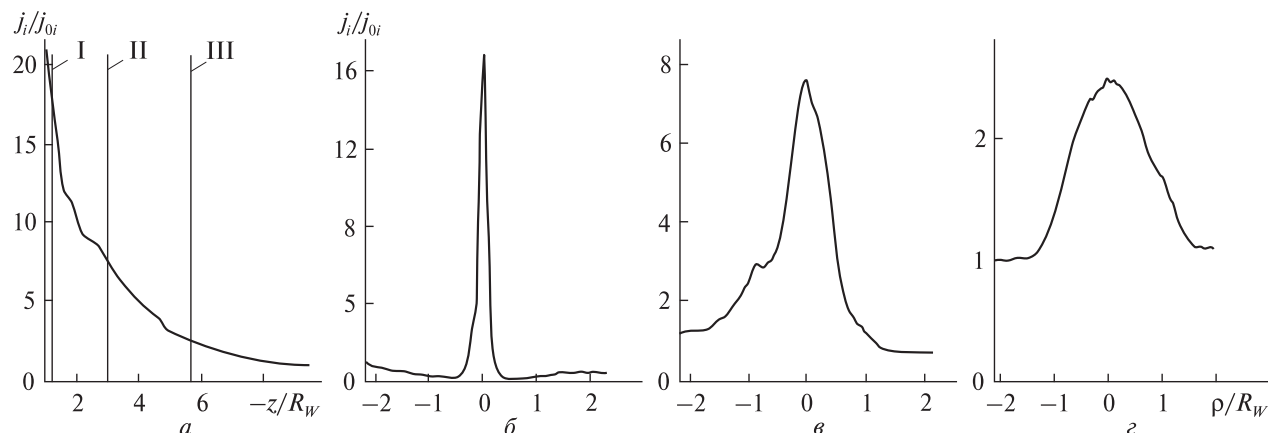


Рис. 4. Осевое (а) и радиальные (б—г) распределения плотности ионного тока j_i / j_{0i} у поверхности «намагниченной» сферы при $\mathbf{B}_w \uparrow \downarrow \mathbf{U}_\infty$ ($\theta \approx \pi$): б, в, г — соответственно в сечениях I, II и III искусственного плазменного образования

у поверхности «намагниченной» сферы при $\mathbf{B}_w \uparrow \downarrow \mathbf{U}_\infty$ ($\theta \approx \pi$).

Осевое распределение плотности ионного тока насыщения на цилиндрический зонд для $\theta \approx \pi/2$ ($\mathbf{B}_w \perp \mathbf{U}_\infty$) приведено на рис. 5, а. Плотность ионного тока при движении зонда вдоль оси набегающего потока плазмы от среза ускорителя до поверхности «намагниченной» сферы нормирована на величину j_{0i} . Структуру осевого распределения j_i / j_{0i} характеризуют три области: А — набегающий поток плазмы,

В — заторможенный полем сферы поток плазмы и С — область «пустой» каверны непосредственно у поверхности «намагниченной» сферы D. Радиальные распределения плотности ионного тока j_i / j_{0i} в вертикальной плоскости сечений ИПО при $\theta = 90^\circ$ иллюстрируют рис. 5, б—г. Вертикальные сечения на рис. 5, а обозначены цифрами I — III. Для сечений I — III при движении зонда в вертикальной плоскости нормирующая величина j_{0i} соответствует максимальному значению плотности ионного тока в данном се-

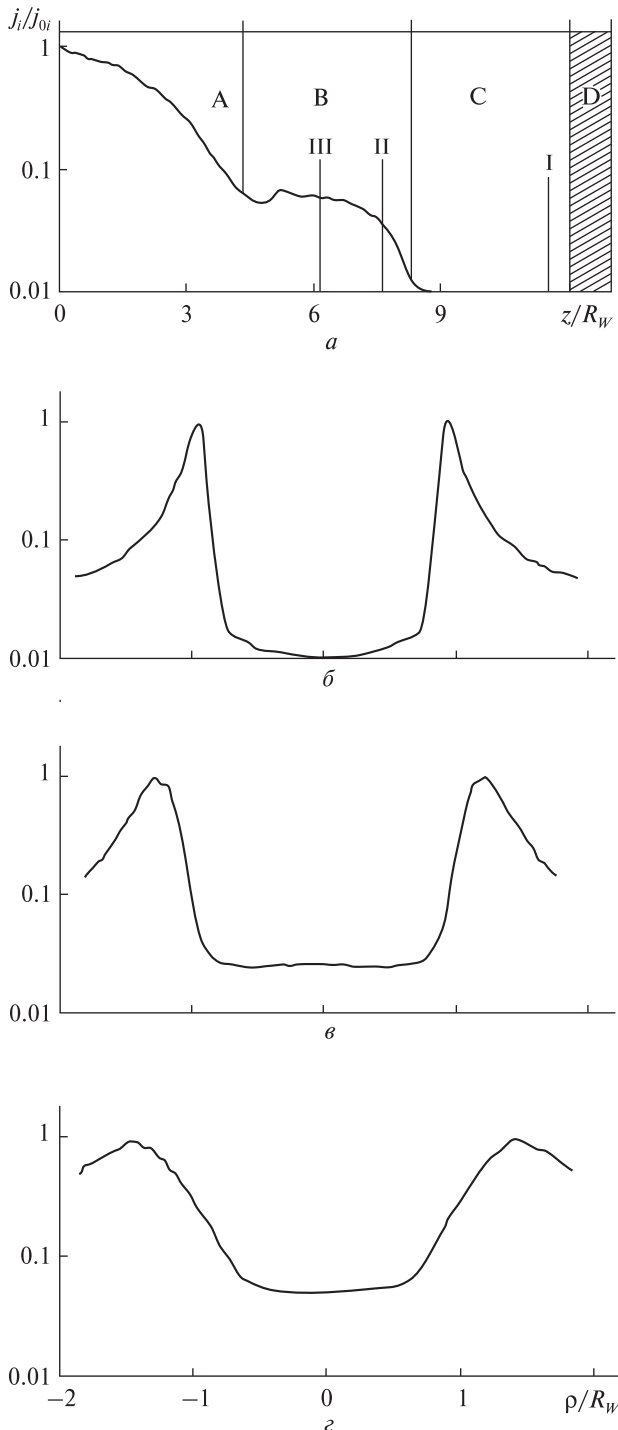


Рис. 5. Осевое (а) и радиальные (б — в) распределения плотности ионного тока j_i / j_{oi} у поверхности «намагниченной» сферы при $\mathbf{B}_w \perp \mathbf{U}_\infty$ ($\theta \approx \pi/2$): б, в, з — соответственно в сечениях I, II и III искусственного плазменного образования

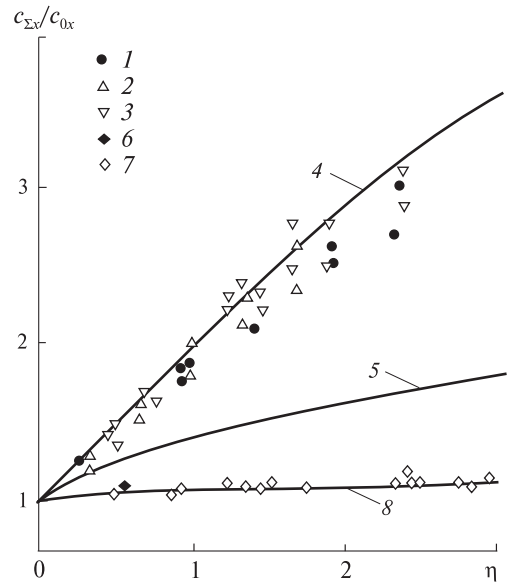


Рис. 6. Зависимости $c_{\Sigma x}(R_w/\lambda_d, \eta)/c_{0x}$ «ненамагниченной» проводящей сферы: 1–3 — экспериментальные данные [11] при $R_w/\lambda_d = 10$, 4 — расчетная зависимость [9] при $R_w/\lambda_d = 10$, 5 — численные данные [5] для большой зеркально отражающей сферы, 6 — расчетное значение из [4] для $R_w/\lambda_d = 66.7$ и $r_i/R_w < 1$, 7 — наши измерения при $R_w/\lambda_d = 160$, 8 — аппроксимация [13] (см. текст)

чении. Измерения выполнены в гиперзвуковом потоке разреженной плазмы при $U_\infty = 11.5$ км/с, $N_i \approx 4 \cdot 10^{15}$ м⁻³, $P_m \approx 3$ мкТл·м³ у поверхности сферы $R_{w2} \approx 5.25$ см.

КОЭФФИЦИЕНТЫ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ СФЕРЫ, ДВИЖУЩЕЙСЯ В ПЛАЗМЕ ПОД «МАГНИТНЫМ» ПАРУСОМ

Сила сопротивления «ненамагниченной» сферы в гиперзвуковом потоке бесстолкновительной плазмы определяется как сумма двух составляющих: $F_{\Sigma x} = F_{0x} + F_{\Phi x}$, где F_{0x} — сила взаимодействия непосредственно с ионами набегающего потока, $F_{\Phi x}$ — кулоновская составляющая. Коэффициент силы сопротивления «ненамагниченной» сферы равен сумме коэффициентов соответствующих составляющих: $c_{\Sigma x}/c_{0x} = 1 + c_{\Phi x}/c_{0x}$, где $c_{0x} = A_s P_d$, $A_s = \pi R_w^2$ — мидель сферы. Для большой ($R_w/\lambda_d \gg 10$) «ненамагниченной» сферы коэффициент силы сопротивления

$$c_{\Sigma x}/c_{0x} = 1 + [1 - \exp(-\Phi_w^{0.5}/0.263(R_w/\lambda_d))]\eta^{2/3} \quad [13],$$

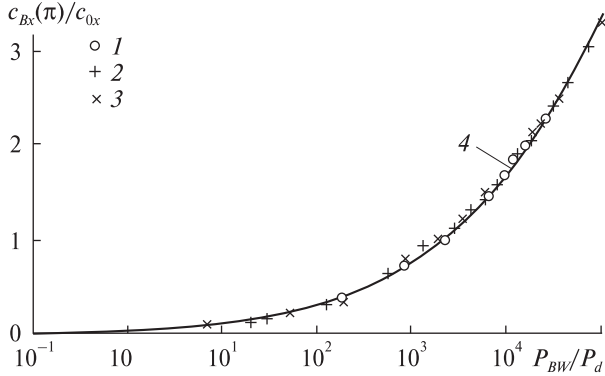


Рис. 7. Зависимость «магнитной» составляющей коэффициента силы сопротивления сферы $c_{Bx}(\pi)/c_{0x}$ от P_{Bw}/P_d : 1 — 3 — сферы радиусом $R_W \approx 4.35, 5.25$ и 6.5 см, 4 — аппроксимация (см. текст)

где $\Phi_W = e\phi_W / (kT_e)$, $\eta = e\phi_W / 0.5(M_i U_\infty^2)$, $\phi_W = \phi_p - \phi_0$ — потенциал поверхности сферы ϕ_p относительно потенциала плазмы ϕ_0 . Приведенные на рис. 6 зависимости $c_{\Sigma x}(R_W/\lambda_d, \eta)/c_{0x}$ «ненамагниченной» проводящей сферы иллюстрируют тенденцию ослабления влияния потенциала поверхности Φ_W с увеличением параметра R_W/λ_d . При $R_W/\lambda_d > 50$ коэффициент кулоновской составляющей $c_{\Phi x}/c_{0x} \rightarrow 0$, а $c_{\Sigma x}/c_{0x} \rightarrow 1$ [4, 13]. В гиперзвуковом потоке при бесстолкновительном обтекании $c_{0x} \approx 2$ [7].

Для большой «намагниченной» сферы $c_{\Sigma x}/c_{0x} = 1 + c_{Bx}/c_{0x}$, где c_{Bx}/c_{0x} — «магнитная» составляющая коэффициента силы сопротивления сферы в гиперзвуковом потоке разреженной плазмы. На рис. 7 представлена зависимость «магнитной» составляющей коэффициента силы сопротивления сферы c_{Bx}/c_{0x} от параметра P_{Bw}/P_d при $\theta = \pi$ ($\mathbf{B}_W \uparrow \downarrow \mathbf{U}_\infty$). Точки 1 — измерения для сферы диаметром $2R_{W1} \approx 8.7$ см в гиперзвуковом потоке разреженной плазмы при скорости потока $U_\infty = 8.1$ км/с и концентрации ионов $N_i \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$; 2 — для сферы $2R_{W2} \approx 10.5$ см при $U_\infty = 11.5$ км/с и $N_i \approx 7 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$, 3 — для сферы $2R_{W3} \approx 13$ см при $U_\infty = 15.6$ км/с и $N_i \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$, 4 — аппроксимация

$$c_{Bx}(\pi)/c_{0x} = 1.06 =$$

$$= \exp[5.65 \cdot 10^{-2} \text{sign} \ln(P_{Bw}/P_d) \ln^2(P_{Bw}/P_d)] - 1.$$

Как и в работах [15, 16], для измерения силового взаимодействия в системе «плазма — тело»

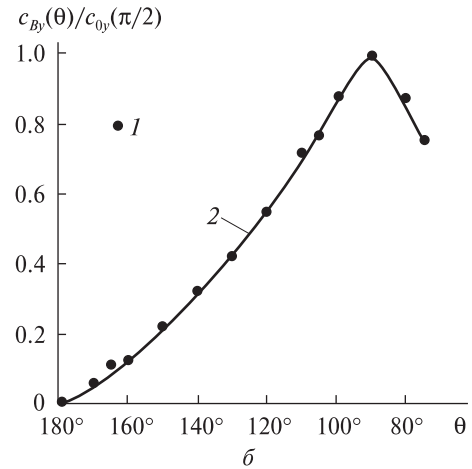
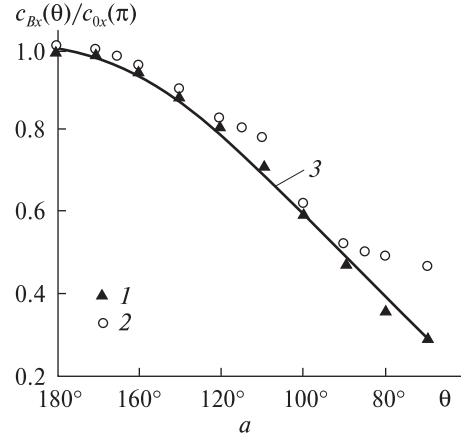


Рис. 8. Угловые зависимости «магнитных» составляющих коэффициентов силы сопротивления и подъемной силы «намагниченной» сферы: а — коэффициент $c_{Bx}(\theta)/c_{Bx}(\pi)$ (1 — наши измерения для сферы $R_W \approx 4.35$ см, 2 — расчетные значения (сила Лоренца) из [5, 20], 3 — аппроксимация $c_{Bx}(\theta)/c_{Bx}(\pi) = \cos\theta + 0.292\sin^5\theta(1 - \cos\theta)$), б — коэффициент $c_{By}(\theta)/c_{By}(\pi/2)$: 1 — наши измерения, 2 — аппроксимация $c_{By}(\theta)/c_{By}(\pi/2) = \sin^{0.8}\theta \cdot [\sin\theta - |\cos\theta|(1 - |\cos\theta|)]$

применялись микровесы компенсационного типа с регистрацией силы в автоматическом режиме. Соответствие значений коэффициентов $c_{Bx}(\pi)/c_{0x}$, измеренных для сфер разных диаметров в широком диапазоне параметров, характеризующих динамическое взаимодействие в системе «плазма — тело», свидетельствует об определяющем вкладе «магнитной» составляющей силы сопротивления.

Угловые зависимости «магнитных» составляющих коэффициентов силы сопротивления

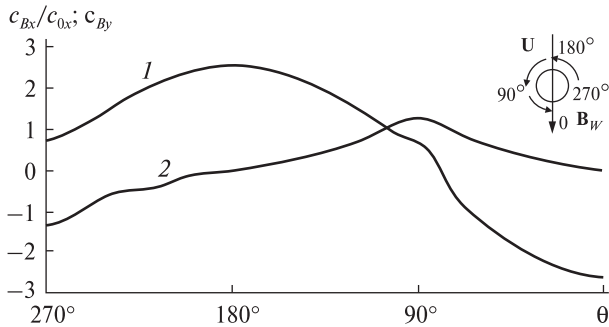


Рис. 9. Угловые зависимости «магнитных» составляющих коэффициентов $c_{Bx}(\theta)/c_{0x}$ и $c_{By}(\theta)$ при $P_{Bw}/P_d \approx 3.8 \cdot 10^4$: 1 — $c_{Bx}(\theta)/c_{0x}$, 2 — $c_{By}(\theta)$

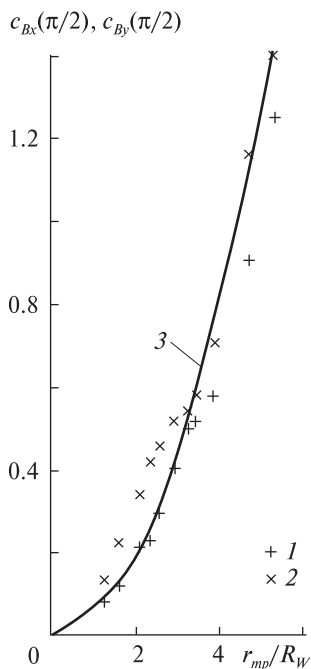


Рис. 10. Зависимости «магнитных» составляющих $c_{Bx}(\pi/2)$ коэффициента силы сопротивления и подъемной силы $c_{By}(\pi/2)$ сферы от параметра r_{mp}/R_W (размера «пустой» каверны у поверхности сферы): 1 и 2 — наши измерения $c_{Bx}(\pi/2)$ и $c_{By}(\pi/2)$ соответственно для сферы $R_{W1} \approx 4.35$ см с соленоидом № 1 в центре при $U_\infty = 11.5$ км/с; $N_i \approx 4 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$, 3 — расчетные значения $c_{Bx}(\pi/2) = 5.07 \cdot 10^{-2} r_{mp}^2 / R_W^2$

$c_{Bx}(\theta)/c_{Bx}(\pi)$ и подъемной силы $c_{By}(\theta)/c_{By}(\pi/2)$ для «намагниченной» сферы в гиперзвуковом потоке разреженной плазмы приведены на рис. 8, а и б.

Изменение «магнитных» составляющих коэффициентов силы сопротивления $c_{Bx}(\theta)/c_{0x}$ и подъемной силы $c_{By}(\theta)$ «намагниченной» сферы $2R_{W1} \approx 8.7$ см для широкого диапазона углов $0^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ при $P_{Bw}/P_d = 3.8 \cdot 10^4$ иллюстрирует рис. 9: 1 — $c_{Bx}(\theta)/c_{0x}$, 2 — $c_{By}(\theta)$. Приведенные зависимости свидетельствуют о возможности

эффективного управления динамическим взаимодействием в системе «плазма — сфера» посредством изменения угла θ между векторами U_∞ и B_W .

Сила, действующая на магнитный диполь с моментом P_m в неоднородном магнитном поле с градиентом $\partial B/\partial x$, равна: $F \approx P_m \partial B/\partial x$ [17, 21]. По аналогии с искусственной магнитосферой, следуя [12, 21], имеем $F \sim P_m B_{mp}/r_{mp}$, где r_{mp} — расстояние в экваториальной плоскости до границы заторможенного потока плазмы при $B_W \perp U_\infty$ (магнитопауза); B_{mp} — индукция магнитного поля на границе заторможенного потока. В приближении идеализированного магнитного диполя $r_{mp} = (P_m^2/2\mu P_d)^{1/6}$, $B_{mp} = P_m/4\pi r_{mp}^3$ [4, 8, 17, 21]. Следовательно, для «намагниченной» сферы с магнитным диполем в центре $c_{Bx}(\pi/2) = F_x/\pi R_W^2 P_d \approx 5.07 \cdot 10^{-2} r_{mp}^2/R_W^2$. Зависимости $c_{Bx}(\pi/2)$ и $c_{By}(\pi/2)$ от r_{mp}/R_W при $B_W \perp U_\infty$ приведены на рис. 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен параметрический анализ, получены зависимости, характеризующие изменение «магнитных» составляющих коэффициентов силы сопротивления и подъемной силы «намагниченной» сферы в гиперзвуковом потоке разреженной плазмы для широкого диапазона углов между вектором скорости потока U_∞ и вектором индукции B_W собственного магнитного поля тела, а также от отношения давления магнитного поля тела P_{Bw} к скоростному напору P_d потока плазмы. Показано, что изменение взаимной ориентации векторов U_∞ и B_W вращением источника собственного магнитного поля тела является эффективным средством управления динамическим взаимодействием в системе «плазма — тело».

Работа выполнена по проекту № II-16-13-2 Целевой комплексной программы НАНУ по научным космическим исследованиям на 2012—2016 гг.

1. Битюрин В. А., Бочаров А. Н. Магнитогидродинамическое взаимодействие при обтекании затупленного тела гиперзвуковым воздушным потоком //

- Изв. РАН. Мех. жидкости и газа. — 2006. — № 5. — С. 188—203.
2. Битюрин В. А., Бочаров А. Н. О наземных МГД-экспериментах в гиперзвуковых потоках // Теплофиз. высоких температур. — 2010. — **48**, № 6. — С. 916—923.
3. Веселовский И. С. Солнечный ветер и гелиосферное магнитное поле // Модель космоса — 2007. — М.: Книжный дом Университет, 2007. — Т. 1. — С. 314—346.
4. Вуд Г. П. Электрическое и электромагнитное торможение спутника в верхней атмосфере Земли // Газовая динамика космических аппаратов. — М.: Мир, 1965. — С. 258—277.
5. Гуревич А. В., Москаленко А. М. О торможении тел, движущихся в разреженной плазме // Исследования космического пространства. — М.: Наука, 1965. — С. 241—254.
6. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973. — 272 с.
7. Кошмаров Ю. А., Рыжов Ю. А. Прикладная динамика разреженного газа. — М.: Машиностроение, 1977. — 184 с.
8. Лайонс Л., Уильямс Д. Физика магнитосферы. — М.: Мир, 1987. — 312 с.
9. Масленников М. В., Сигов В. С., Чуркина Г. П. Численные эксперименты по обтеканию тел различной формы разреженной плазмой // Космич. исследования. — 1968. — **6**, № 2. — С. 220—227.
10. Митчнер М., Кругер И. Частично ионизованные газы. — М.: Мир, 1976. — 496 с.
11. Нечтел Е., Питтс У. Экспериментальные исследования сопротивления движению спутников, обусловленного электрическими силами // Ракетная техника и космонавтика. — 1964. — **2**, № 6. — С. 222—225.
12. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. — М.: Мир, 1980. — 299 с.
13. Шувалов В. А. Влияние потенциала поверхности и собственного магнитного поля на сопротивление тела в сверхзвуковом потоке разреженного частично ионизованного газа // Прикл. мех. и техн. физ. — 1986. — № 3. — С. 41—47.
14. Шувалов В. А., Кулагин С. Н., Кочубей Г. С., Токмак Н. А. Моделирование эффектов МГД-взаимодействия тел с атмосферой Земли в потоке разреженной плазмы // Космична наука і технологія. — 2011. — **17**, № 5. — С. 29—36.
15. Шувалов В. А., Кулагин С. Н., Кочубей Г. С., Токмак Н. А. Физическое моделирование эффектов взаимодействия «намагниченных» тел с атмосферой Земли в гиперзвуковом потоке разреженной плазмы // Теплофиз. высоких температур. — 2012. — **50**, № 3. — С. 337—345.
16. Шувалов В. А., Кулагин С. Н., Кочубей Г. С., Токмак Н. А. Динамическое взаимодействие «намагниченного» конуса с гиперзвуковым потоком разреженной плазмы // Теплофиз. высоких температур. — 2013. — **51**, № 6. — С. 803—810.
17. Эберт Г. Краткий справочник по физике. — М.: Физматгиз, 1963. — 552 с.
18. Bisek N. J., Boyd I. D. Numerical study of magnetoaerodynamic flow around a hemisphere // J. Spacecraft and Rockets. — 2010. — **47**, N 5. — P. 816—827.
19. Fujino T., Yoshino T., Ishikawa M. Numerical analysis of reentry trajectory coupled with magnetohydrodynamic flow control // J. Spacecraft and Rockets. — 2008. — **45**, N 5. — P. 911—920.
20. Nishida H., Nakayama Y. Two-dimensional magnetohydrodynamic simulation of a magnetic sail // J. Spacecraft and Rockets. — 2006. — **43**, N 3. — P. 667—672.
21. Toivanen P. K., Janhunen P., Koskinen H. E. J. Magnetospheric propulsion (eMPii). ESTEC // Contract N 16361/02/NL/LvH. Final report, Issue 1.3, April. 2004. — 78 p.
22. Zubrin P. M., Andrews D. G. Magnetic sail and interplanetary travel // J. Spacecraft and Rockets. — 1991. — **28**, N 2. — P. 197—203.

Стаття надійшла до редакції 29.05.14

В. А. Шувалов, Н. А. Токмак, А. Г. Цокур, Г. С. Кочубей

ДИНАМІЧНА ВЗАЄМОДІЯ КОСМІЧНОГО АПАРАТА З РОЗРІДЖЕНОЮ ПЛАЗМОЮ ПРИ РУСІ ПІД «МАГНІТНИМ ПАРУСОМ»

Показано, що зміна взаємної орієнтації векторів власного магнітного поля тіла і швидкості потоку плазми є ефективним засобом керування динамічною взаємодією в системі «космічний апарат — плазма»: дозволяє реалізовувати режим взаємодії з ненульовою аеродинамічною якістю і, як наслідок, режими гальмування та прискорення «намагніченого» тіла у гіперзвуковому потоці розрідженої плазми.

V. A. Shuvalov, N. A. Tokmak, A. G. Tsokur, G. S. Kochubey

DYNAMIC INTERACTION OF A SPACECRAFT WITH RAREFIED PLASMA IN MOTION UNDER A “MAGNETIC SAIL”

It is shown that the change in the relative orientation of the vectors of own magnetic field and plasma flow velocity is an effective means to control the dynamic interaction in the “spacecraft — plasma” system. It allows one to achieve the mode of interaction with non-zero aerodynamic quality and, as a result, regimes of deceleration and acceleration of “magnetized” body in the hypersonic flow of rarefied plasma.

УДК 681.518.5

Н. В. Ефименко

Науково-виробниче підприємство «Хартрон-ЮКОМ», Запоріжжя

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО ЗВЕЗДАМ ПУТЕМ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ВЫХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДВУХ АСТРОДАТЧИКОВ

Рассматривается задача повышения точности определения ориентации КА по звездам путем совместной обработки информации двух астродатчиков. При этом предполагается, что один из астродатчиков является базовым, и его выходная информация уточняется по данным второго астродатчика. Получена математическая модель ошибки базового астродатчика, и предложен алгоритм уменьшения этой ошибки путем совместной обработки выходной информации двух астродатчиков. Приведены результаты численного моделирования предложенного алгоритма.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет ориентации летательных аппаратов по звездам используется на практике уже несколько десятков лет. Вследствие того что положения звезд известны достаточно хорошо, использование их в качестве ориентиров позволяет с высокой точностью рассчитать ориентацию космического аппарата (КА). Для определения ориентации космического аппарата с помощью звезд в состав его системы управления должен входить астродатчик. Астродатчик визирует звезды, находящиеся в его поле зрения, и выдает направления на них относительно своей внутренней системы координат (ВСК). Измерительная информация об угловых координатах звезды подается на вход алгоритма опознавания, который ставит в соответствие измеренной звезде каталожную звезду. Далее алгоритм расчета ориентации, используя соответствие между визируемыми и каталожными координатами звезд, рассчитывает ориентацию КА относительно инерциальной системы координат.

Имеется множество работ, посвященных вопросам определения ориентации КА по информации об угловых координатах звезды [5–9]. Ос-

новные недостатки всех этих алгоритмов определения ориентации следующие. Погрешность определения ориентации обратно пропорциональна синусу угла между единичными векторами направления на звезды, который не превышает угловой размер поля зрения астродатчика. Современные астродатчики имеют сравнительно небольшое поле зрения — порядка $10\text{--}25^\circ$, и поэтому погрешность расчета ориентации по звездам, попавшим в поле зрения одного астродатчика, достаточно велика.

Для устранения этого недостатка на борту КА устанавливают два и более астродатчика, и ориентация рассчитывается по всем звездам, попавшим в поле зрения этих астродатчиков. При этом угол между направлениями на звезды из разных астродатчиков может достигать нескольких десятков градусов, что значительно повышает точность определения ориентации. При таком подходе возникает задача уточнения параметров ориентации по информации нескольких астродатчиков.

Ниже предложен алгоритм уточнения параметров ориентации по информации двух астродатчиков. Для нахождения оценки применен рекуррентный метод наименьших квадратов с регуляризацией по Тихонову решения некорректно поставленной задачи [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть на борту КА имеется два астродатчика АД1 и АД2. Астродатчики установлены таким образом, что угол между их оптическими осями равен α и удовлетворяет условию $\alpha \geq 2 \cdot \chi$, где χ — угловой размер поля зрения астродатчика. Свяжем с ПЗС-матрицами астродатчиков правые ортогональные внутренние системы координат P_1 и P_2 . Взаимное положение базисов P_1 и P_2 определим кватернионом $Q_{P_2P_1}$, задающем переход от базиса P_2 к базису P_1 . Будем полагать, что в составе программно-алгоритмического обеспечения системы управления космического аппарата имеется алгоритм взаимной привязки внутренних систем координат астродатчиков [2], и значение кватерниона $Q_{P_2P_1}$ нам известно. Примем, что в первом астродатчике опознано m_1 , во втором — m_2 звезд, и каждый астродатчик в момент времени t_k выдает следующую информацию:

— оценку $\hat{Q}_{IP_i}$ ($i = 1, 2$) кватерниона перехода Q_{IP_i} от инерциальной системы координат I к своей внутренней системе координат P_i ;

— измеренные координаты $\hat{\mathbf{r}}_{P_1j_1}$, ($j_1 = 1, 2, \dots, m_1$) и $\hat{\mathbf{s}}_{P_2j_2}$, ($j_2 = 1, 2, \dots, m_2$) единичных направлений на опознанные звезды относительно своих внутренних систем координат P_1 и P_2 соответственно;

— каталожные направления $\mathbf{r}_{Ij_1}$ и $\mathbf{s}_{Ij_2}$ на опознанные звезды относительно инерциальной системы координат I .

Измерения производятся с погрешностями $\delta \mathbf{r}_{P_1j_1}$ и $\delta \mathbf{s}_{P_2j_2}$. О погрешностях измерений известно лишь то, что они удовлетворяют условиям

$$\|\delta \mathbf{r}\|_{P_1j_1}^2 \leq \delta_r^2, \quad \|\delta \mathbf{s}\|_{P_2j_2}^2 \leq \delta_s^2,$$

где скаляры δ_r и δ_s полагаются заданными. Требуется по измеренным и каталожным единичным векторам направления на звезды уточнить кватернион $\hat{Q}_{IP_1}$.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Для единичных векторов $\mathbf{r}_{P_1k}$ ($k = 1, 2, \dots, m_1$) и $\mathbf{s}_{P_2j}$ ($j = 1, 2, \dots, m_2$) можно записать соотношения

$$\mathbf{r}_{P_1k} = \bar{Q}_{IP_1} \circ \mathbf{r}_{Ik} \circ Q_{IP_1}, \quad (1)$$

$$\mathbf{s}_{P_2j} = Q_{P_2P_1} \circ \bar{Q}_{IP_1} \circ \mathbf{s}_{Ij} \circ Q_{IP_1} \circ \bar{Q}_{P_2P_1}. \quad (2)$$

В выражениях (1), (2) черта над обозначением кватерниона обозначает сопряженный кватернион.

Представим кватернион Q_{IP_1} следующим образом:

$$Q_{IP_1} = \hat{Q}_{IP_1} \circ E. \quad (3)$$

Здесь E — кватернионное представление ошибки определения ориентации по звездам, опознанным в астродатчике АД1. Кватернион $\hat{Q}_{IP_1}$ можно интерпретировать как кватернион, задающий ориентацию некоторого расчетного базиса P'_1 , в общем случае не совпадающего с базисом P_1 . Кватернион E как кватернион малого поворота представим в виде

$$E = 1 + \frac{1}{2} \mathbf{e}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} -$$

вектор малого поворота. Подставив (4) в выражения (1), (2) и перейдя в базис P_1 , получим

$$\mathbf{r}_{P_1k} = \bar{E} \circ \bar{\hat{Q}}_{IP_1} \circ \mathbf{r}_{Ik} \circ \hat{Q}_{IP_1} \circ E, \quad (5)$$

$$Q_{P_1P_2} \circ \mathbf{s}_{P_2j} \circ \bar{Q}_{P_1P_2} = \bar{E} \circ \bar{\hat{Q}}_{IP_1} \circ \mathbf{s}_{Ij} \circ \hat{Q}_{IP_1} \circ E. \quad (6)$$

Введем следующие обозначения:

$$\hat{\mathbf{r}}_{P_1k} = \bar{\hat{Q}}_{IP_1} \circ \mathbf{r}_{Ik} \circ \hat{Q}_{IP_1},$$

$$\hat{\mathbf{s}}_{P_1j} = \bar{\hat{Q}}_{IP_1} \circ \mathbf{s}_{Ij} \circ \hat{Q}_{IP_1}.$$

С учетом принятых обозначений уравнения (5), (6) можно записать в виде

$$\mathbf{r}_{P_1k} = \bar{E} \circ \hat{\mathbf{r}}_{P_1k} \circ E, \quad (7)$$

$$Q_{P_1P_2} \circ \hat{\mathbf{s}}_{P_2j} \circ \bar{Q}_{P_1P_2} = \bar{E} \circ \hat{\mathbf{s}}_{P_1j} \circ E. \quad (8)$$

Подставив соотношение (4) в выражения (7) и (8), с точностью до величин второго порядка малости получим

$$\mathbf{r}_{P_1k} - \hat{\mathbf{r}}_{P_1k} = \hat{\mathbf{r}}_{P_1k} \times \mathbf{e}, \quad (9)$$

$$Q_{P_1P_2} \circ \hat{\mathbf{s}}_{P_2j} \circ \bar{Q}_{P_1P_2} - \hat{\mathbf{s}}_{P_1j} = \hat{\mathbf{s}}_{P_1j} \times \mathbf{e}. \quad (10)$$

Система уравнений (9), (10) представляет собой линейную переопределенную систему из $3(m_1 + m_2)$ уравнений относительно неизвестного вектора малого поворота $\mathbf{e} \in R^3$. Запишем эту

систему в матричном виде:

$$\mathbf{A}\mathbf{e} = \mathbf{Y}, \quad (11)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{C}_{m_1+m_2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{Y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_{m_1+m_2} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{C}_k = \begin{cases} F(\hat{\mathbf{r}}_{p1k}) & (k=1,2,\dots,m1), \\ F(\mathbf{s}_{p1j}) & (k=m1+1,\dots,m1+m2, \\ & j=1,2,\dots,m2), \end{cases} \quad (13)$$

$$\mathbf{Y}_k = \begin{cases} \mathbf{r}_{p1k} - \hat{\mathbf{r}}_{p1k} & (k=1,2,\dots,m1), \\ Q_{p1p2} \circ \mathbf{s}_{p2j} \circ \bar{Q}_{p1p2} - \hat{\mathbf{s}}_{p1j} & (k=m1+1,\dots,m1+m2, \\ & j=1,2,\dots,m2). \end{cases} \quad (14)$$

Эта система будет иметь единственное решение в том случае, когда ранг матрицы

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^{m1} F^2(\hat{\mathbf{r}}_{p1i}) + \sum_{j=1}^{m2} F^2(\hat{\mathbf{s}}_{p1j}) \quad (15)$$

равен трем. В выражении (15) матрица

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 0 & x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{pmatrix}$$

представляет собой линейный кососимметрический оператор векторного произведения, определяемый равенством

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}.$$

Для того чтобы ранг матрицы $\mathbf{P}$ был равен трем, необходимо и достаточно, чтобы среди векторов $\mathbf{r}_{p1k}$ ($k = 1, 2, \dots, m1$) и $\mathbf{s}_{p2j}$ ($j = 1, 2, \dots, m2$) нашлась пара непараллельных векторов. Так как по предположению угол $\alpha \geq 2 \cdot \chi$, то это условие всегда выполняется, и система уравнений (9)–(10) имеет единственное решение. Для нахождения этого решения поступим следующим образом. Представим систему (11) в развернутом виде

$$\mathbf{a}_l \mathbf{e} = \mathbf{y}_l, \quad l = 1, 2, \dots, 3 \cdot (m1 + m2), \quad (16)$$

где $\mathbf{a}_l$ — l -я строка матрицы $\mathbf{A}$, $\mathbf{y}_l$ — l -й элемент вектора $\mathbf{Y}$. Так как измерения производятся

с погрешностями, то вместо вектора $\mathbf{Y}$ нам доступен вектор

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} + \delta \mathbf{Y}, \quad (17)$$

где $\delta \mathbf{Y}$ — погрешность измерений. Выразив из (17) вектор $\mathbf{Y}$ и подставив найденное выражение в (16), получим

$$\mathbf{a}_l \mathbf{e} = \tilde{\mathbf{y}}_l - \delta \tilde{\mathbf{y}}_l. \quad (18)$$

В выражении (18) $\delta \tilde{\mathbf{y}}_l$ — l -й элемент вектора $\delta \mathbf{Y}$. Очевидно, что

$$\delta \tilde{\mathbf{y}}_l^2 \leq \|\delta \mathbf{r}\|^2 + \|\delta \mathbf{s}\|^2. \quad (19)$$

Пусть $\hat{\mathbf{e}}_l$ — решение системы (11), полученное путем решения системы из l уравнений вида (18). Уточненную оценку $\hat{\mathbf{e}}_{l+1}$ вектора малого поворота $\mathbf{e}$ по $l+1$ уравнению будем находить как решение следующей оптимизационной задачи.

Необходимо найти

$$\inf_{\mathbf{e} \in Y_h} \frac{1}{2} (\mathbf{e} - \hat{\mathbf{e}}_l)^T \mathbf{R}_l^{-1} (\mathbf{e} - \hat{\mathbf{e}}_l), \quad (20)$$

$$Y_h = \{\mathbf{e} \in R^3, \mathbf{e} : (\tilde{\mathbf{y}}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1} \mathbf{e})^2 \leq \delta_r^2 + \delta_s^2\}.$$

Заменой переменных $\boldsymbol{\eta}_{l+1} = \mathbf{e} - \hat{\mathbf{e}}_l$ задача (20) преобразуется к виду

$$\inf_{\boldsymbol{\eta} \in Y_h} \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}_{l+1}^T \mathbf{R}_l^{-1} \boldsymbol{\eta}_{l+1}, \quad (21)$$

$$Y_h = \{\boldsymbol{\eta} \in R^3, \boldsymbol{\eta} : (\tilde{\mathbf{y}}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1} \cdot \boldsymbol{\eta}_{l+1})^2 \leq \delta_r^2 + \delta_s^2\}, \quad (22)$$

где $\tilde{\mathbf{y}}_{l+1} = \tilde{\mathbf{y}}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1} \hat{\mathbf{e}}_l$. Если $\tilde{\mathbf{y}}_{l+1}^2 \leq \delta_r^2 + \delta_s^2$, то решение задачи (22) тривиально:

$$\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1} = 0. \quad (23)$$

При значении $\tilde{\mathbf{y}}_{l+1}^2 > \delta_r^2 + \delta_s^2$ решение можно найти, используя лемму [2], согласно которой задача минимизации функционала

$$\Omega(\boldsymbol{\eta}_{l+1}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}_{l+1}^T \mathbf{R}_l^{-1} \boldsymbol{\eta}_{l+1}$$

с невыпуклыми ограничениями

$$Y_h = \{\boldsymbol{\eta} \in R^3, \boldsymbol{\eta} : (\tilde{\mathbf{y}}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1} \cdot \boldsymbol{\eta}_{l+1})^2 \leq \delta_r^2 + \delta_s^2\}$$

сводится к задаче минимизации $\Omega(\boldsymbol{\eta}_{l+1})$ при условии, что $(\tilde{\mathbf{y}}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1} \boldsymbol{\eta}_{l+1})^2 = \delta_r^2 + \delta_s^2$. Она решается методом неопределенных множителей Лагранжа путем минимизации на Y_h сглаживающего функционала

$$M(\boldsymbol{\eta}_{l+1}) = \Omega(\boldsymbol{\eta}_{l+1}) + \lambda (\tilde{\mathbf{y}}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1} \boldsymbol{\eta}_{l+1})^2. \quad (24)$$

При этом λ определяется из уравнения обобщенной невязки

$$(\tilde{y}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1}^T \hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1})^2 = \delta_r^2 + \delta_s^2, \quad (25)$$

которое в этом случае всегда имеет положительный корень [2]. В уравнении (25) $\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1}$ — элемент из Y_h , минимизирующий функционал $M(\boldsymbol{\eta}_{l+1})$. Найдем минимум $M(\boldsymbol{\eta}_{l+1})$. Для того чтобы вектор $\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1}$ был точкой минимума функционала (24), необходимо, чтобы он удовлетворял уравнению

$$\mathbf{R}_k^{-1}(\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1}) + \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1} - \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \tilde{y}_{l+1} = 0.$$

Разрешив это уравнение относительно $\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1}$, получим

$$\hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1} = (\mathbf{R}_l^{-1} + \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \mathbf{a}_{l+1})^{-1} \cdot \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \tilde{y}_{l+1} \quad (26)$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned} \psi_{l+1} &= 1 + \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}, \\ \mathbf{R}_{l+1} &= (\mathbf{R}_l^{-1} + \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \mathbf{a}_{l+1})^{-1}. \end{aligned}$$

Тогда на основании леммы об обращении матрицы [1] имеем

$$\mathbf{R}_{l+1} = \mathbf{R}_l - \lambda \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \psi_{l+1}^{-1} \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l. \quad (27)$$

Подставив (27) в (26), получим

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\eta}}_{l+1} &= (\mathbf{R}_l - \lambda \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \psi_{l+1}^{-1} \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l) \cdot \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \tilde{y}_{l+1} = \\ &= \lambda \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \tilde{y}_{l+1} - \lambda^2 \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \psi_{l+1}^{-1} \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \tilde{y}_{l+1} = \\ &= \lambda \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot (\tilde{y}_{l+1} - \lambda \cdot \psi_{l+1}^{-1} \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \tilde{y}_{l+1}) = \\ &= \lambda \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \psi_{l+1}^{-1} \cdot (\psi_{l+1} - \lambda \cdot \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T) \tilde{y}_{l+1} = \\ &= \beta \cdot \mathbf{K}_{l+1} \cdot \tilde{y}_{l+1}, \end{aligned} \quad (28)$$

где

$$\mathbf{K}_{l+1} = \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T \cdot \sigma^{-2}, \quad (29)$$

$$\sigma^2 = \mathbf{a}_{l+1} \cdot \mathbf{R}_l \cdot \mathbf{a}_{l+1}^T, \quad (30)$$

$$\beta = \frac{\lambda \cdot \sigma^2}{1 + \sigma^2}. \quad (31)$$

Перейдя к исходным переменным, с учетом (23) получим

$$\hat{\mathbf{e}}_{l+1} = \hat{\mathbf{e}}_l + \beta \cdot \mathbf{K}_{l+1} \tilde{y}_{l+1}. \quad (32)$$

Рассмотрим уравнение обобщенной невязки (25). Подставив в него выражения (28)—(31), получим уравнение для нахождения параметра β :

$$(1 - \beta) \cdot |\tilde{y}_{l+1}| = \delta_r^2 + \delta_s^2. \quad (33)$$

Разрешив уравнение (33) относительно β , находим

$$\beta = 1 - \frac{\delta_r^2 + \delta_s^2}{|\tilde{y}_{l+1}|}, \quad (34)$$

что приводит к следующему алгоритму вычисления уточненной оценки кватерниона Q_{IP1} :

$$\tilde{y}_{l+1} = \tilde{y}_{l+1} - \mathbf{a}_{l+1} \cdot \hat{\mathbf{e}}_l,$$

$$\hat{\mathbf{e}}_{l+1} = \hat{\mathbf{e}}_l + \beta_{l+1} \mathbf{K}_{l+1} \tilde{y}_{l+1},$$

$$\mathbf{R}_{l+1} = (\mathbf{R}_l - \beta_{l+1} \mathbf{K}_{l+1} \mathbf{a}_{l+1} \mathbf{R}_l),$$

$$\mathbf{K}_{l+1} = \mathbf{R}_l \mathbf{a}_{l+1}^T \sigma_{l+1}^{-2},$$

$$\sigma_{l+1}^2 = \mathbf{a}_{l+1} \mathbf{R}_l \mathbf{a}_{l+1}^T,$$

$$\beta_{l+1} = \begin{cases} 0, & |\tilde{y}_{l+1}| \leq \delta_r^2 + \delta_s^2, \\ 1 - \frac{\delta_r^2 + \delta_s^2}{|\tilde{y}_{l+1}|}, & |\tilde{y}_{l+1}| > \delta_r^2 + \delta_s^2. \end{cases}$$

$$Q_{IP1} = \hat{Q}_{IP1} \circ E,$$

$$E = e_0 + \frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}},$$

$$e_0 = \sqrt{1 - \frac{1}{4} \|\hat{\mathbf{e}}\|^2}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО АЛГОРИТМА

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма было проведено численное моделирование. Моделировался процесс определения ориентации спутника, стабилизированного относительно инерциальной системы координат. Взаимное расположение астродатчиков было выбрано таким образом, что угол α между их оптическими осями был равен 66° .

Численные значения параметров модели астродатчиков были следующими:

- поле зрения — 17° ;
- максимально допустимая ошибка измерения угловых координат осей ВСК относительно ИСК: для оси $O_B Z_B$ — не более $6''$; для осей $O_B X_B$ и $O_B Y_B$ — не более $45''$;

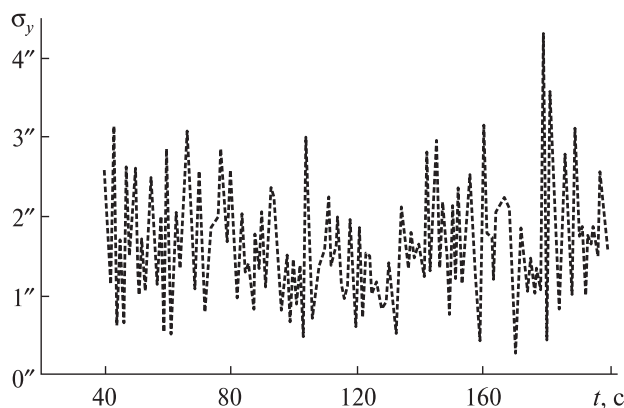


Рис. 1. Изменения нормы σ_y вектора погрешности уточненного кватерниона ориентации, полученного по информации астродатчиков АД1 и АД2 с использованием предлагаемого алгоритма

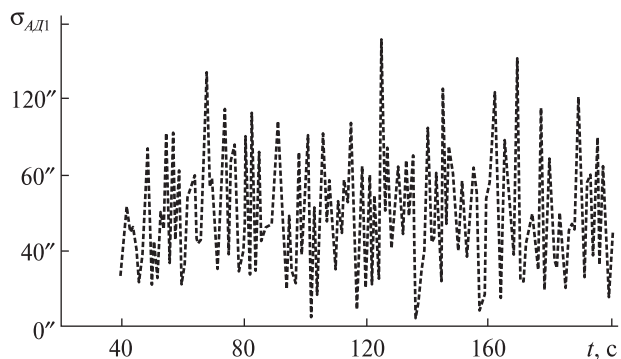


Рис. 2. Норма σ_{AD1} вектора ошибки определения кватерниона ориентации по показаниям астродатчика АД1

- максимально допустимая ошибка измерения угловых координат единичного вектора направления на опознанную звезду относительно ВСК — не более 3".

При моделировании полагалось, что в первом астродатчике опознано пять звезд, во втором — десять звезд. На рис. 1 показан график изменения нормы σ_y вектора погрешности уточненного кватерниона ориентации, полученного по информации астродатчиков АД1 и АД2 с использованием предлагаемого алгоритма. На рис. 2 приведена норма σ_{AD1} вектора ошибки определения кватерниона ориентации по показаниям только одного астродатчика АД1.

Как видно из рисунков, предлагаемый алгоритм обеспечивает высокую точность определе-

ния ориентации внутренней системы координат астродатчика АД1 относительно инерциальной системы координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен алгоритм уточнения параметров ориентации по информации двух астродатчиков. Для нахождения оценки применен рекуррентный метод наименьших квадратов с регуляризацией по Тихонову решения некорректно поставленной задачи. Приведены результаты численного моделирования предложенного алгоритма. Результаты моделирования показали, что предлагаемый алгоритм обеспечивает значительно более высокую точность определения ориентации по сравнению с алгоритмом определения ориентации по информации одного астродатчика. Алгоритм может быть применен при разработке высокоточных систем определения ориентации.

1. Гончарский А. Б., Леонов А. С., Ягола А. Г. Обобщенный принцип невязки // Журн. вычислительной математики и математической физики. — 1973. — **13**, № 2. — С. 294—302.
2. Ефименко Н. В. Взаимная привязка внутренних систем координат астродатчиков в задаче высокоточного определения ориентации космического аппарата // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 6. — С. 12—17.
3. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1986. — 286 с.
4. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. — М.: Мир, 1989. — 655 с.
5. Mortari D. EULER-q algorithm for attitude determination from vector observations // J. Guidance, Control, and Dynamics. — 1998. — **21**, N 2. — P. 328—334.
6. Mortari D. Second estimator of the optimal quaternion // J. Guidance, Control, and Dynamics. — 2000. — **23**, N 5. — P. 885—888.
7. Rupert P. SMART — a three-axis stabilized attitude reference technique // J. Spacecraft and Rockets. — 1971. — **8**. — P. 1195—1201.
8. Shuster M. D. Effective — direction measurements for spacecraft attitude: II. Predicted directions // J. Astronaut. Sci. — 2007. — **55**, N 4. — P. 479—492.
9. Zanetti R., Bishop R. H. A new method to introduce a priori information in QUEST // J. Astronaut. Sci. — 2007. — **55**, N 4. — P. 451—461.

Стаття надійшла до редакції 24.04.14

М. В. Єфіменко

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ
ОРІЄНТАЦІЇ КОСМІЧНОГО АПАРАТА
ПО ЗІРКАХ ШЛЯХОМ СПІЛЬНОЇ ОБРОБКИ
ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДВОХ АСТРОДАВАЧІВ

Розглядається задача підвищення точності визначення орієнтації КА по зірках шляхом спільної обробки інформації двох астродавачів. При цьому передбачається, що один з астродавачів є базовим, і його вихідна інформація уточнюється за даними другого астродавача. Отримано математичну модель помилки базового астродавача та запропоновано алгоритм зменшення цієї помилки шляхом спільної обробки вихідної інформації двох астродавачів. Наведено результати чисельного моделювання запропонованого алгоритму.

N. V. Efimenko

DETERMINING SPACECRAFT
ORIENTATION USING INFORMATION
FROM TWO JOINTLY PROCESSED
STAR TRACKERS

We consider the problem to increase the accuracy of determining spacecraft orientation using information obtained from two jointly processed star trackers. One of the trackers is the main one. Its information is specified by the second tracker. A mathematical model of the main star tracker error is constructed and an error correction algorithm of using second star tracker is proposed. We present some results of numerical simulation of the algorithms.

УДК 629.7.054

Г. В. Бойко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

РЕЗОНАНС ВОЛНОВОГО СОВПАДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОЛЕТА

Приводятся результаты анализа возникновения волнового совпадения в подвесе двухстепенного поплавкового гироскопа в условиях гиперзвукового полета. Строится расчетная модель упругого взаимодействия ультразвукового луча с полиагрегатным подвесом и определяются условия возникновения явления «акустической прозрачности» для двух типов генерируемых в корпусе прибора волн.

ВВЕДЕНИЕ

Оборонное научное агентство DARPA планирует потратить около \$ 800 млн с 2015 по 2018 гг. на разработку многоразового космического челнока с уникальными возможностями. О разработке нового челнока заявили осенью 2013 г., но перспективы проекта до сих пор были туманными. Теперь на это выделены деньги и начинается практическая реализация проекта.

XS-1 сможет летать в космос десять раз в течение десяти дней, т. е. один раз в сутки на протяжении не менее десяти дней, при этом стоимость запуска составит менее \$ 5 млн, т. е. как минимум в десять раз дешевле, чем с помощью обычных ракет-носителей. По размеру многоразовый челнок XS-1 будет сравним с истребителем и сможет выводить на орбиту небольшую нагрузку в 1.5–2 Т, например в виде созвездия нано- или микроспутников. При этом легкий композитный челнок должен будет развивать скорость до 10 М и выше, т. е. это будет гиперзвуковой аппарат с большим военным потенциалом.

По заявлению DARPA технологии, полученные благодаря программе XS-1, позволят переложить процедуру выведения небольших спутников с ракет на многоразовые челноки. Эти технологии также будут использованы для создания на-

дежных, относительно дешевых в эксплуатации коммерческих и правительственных летательных аппаратов различного назначения, включая гиперзвуковые и суборбитальные самолеты.

Специалисты DARPA надеются найти подрядчика для разработки и строительства XS-1 уже в 2015 г. Первый орбитальный полет прототипа запланирован на 2018 г.

Программа XS-1 существенно отличается от множества аналогичных проектов тем, что правительство США предлагает частным компаниям самим составить перечень перспективных технологий и конструкций, которые позволят выполнить только лишь четыре требования заказчиков — частота полетов, стоимость запуска, грузоподъемность, скорость. Поэтому пока что трудно утверждать, каким образом будет осуществляться запуск XS-1 — с помощью ракеты, с помощью самолета-носителя или же по-самолетному, т. е. с дозаправкой в воздухе [<http://www.cnews.ru/news/line/index.shtml?2014/03/24/565441>].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В системах управления ракетами-носителями (РН), крылатыми ракетами, гиперзвуковыми ЛА широкое применение нашли так называемые поплавокковые гироскопы, конструктивно лишенные основных недостатков «сухих» приборов — значительных по величине (и, главное, непостоянных) моментов сил сухого трения на

выходной оси, а также недопустимо высокой чувствительности к ударным и вибрационным воздействиям, особенно нежелательных для интегрирующих гироскопов. Отличительной особенностью поплавковых модификаций стало наличие подвижной части прибора, погруженной в тяжелую фторорганическую или хлорорганическую жидкость. Гироскоп располагается в герметичном, заполненном гелием или водородом, цилиндрическом поплавке, который продольными цапфами устанавливается в наружном, также герметичном, коаксиальном круговом цилиндре, выполняющем роль корпуса прибора. Опоры подвижной части в некоторых случаях выполняются на камнях [3, 6].

Такое техническое решение характерно для целого ряда конструкций. Плавающие приборы, в отличие от поплавковых, не имеют остаточного веса.

Зазор между цилиндрической частью кожуха и корпусом весьма мал и составляет приблизительно 0.2 мм в радиальном направлении. Большая вязкость жидкости и малая величина рабочего зазора позволяют получить требуемый коэффициент демпфирования в интегрирующем гироскопе.

Все дальнейшие рассуждения будем строить ориентируясь на конкретную техническую реализацию серийно выпускаемого авиационной промышленностью поплавкового прибора. Например, на унифицированный гироскопический датчик угловых скоростей класса ДУСУ2-30В, предназначенный для использования в летательных аппаратах длительного действия.

По принципу действия прибор является инерциальным, т. е. не нуждается в связи с внешней средой. Динамические свойства датчика описываются колебательным звеном. По своему целевому назначению прибор служит измерителем угловой скорости гиперзвукового ЛА [5].

Атмосферным гиперзвуковым летательным аппаратам, кроме сверхвысоких температур, вибрации и др. внешних факторов, сопутствует мощная ударная N -волна и проникающее ультразвуковое излучение [4, 5].

Подвес гироскопа представляет собой полиагрегатную структуру — металлический цилинд-

рический корпус, жидкостатический подвес и заполненный инертным газом коаксиальный поплавок с гироскопом внутри [1, 2]. Падающая на поверхность корпуса звуковая волна порождает несколько типов волн, которые при определенных условиях транслируют звуковую энергию далее, внутрь подвеса. Поэтому опасность возникновения дополнительных погрешностей гироскопа при летной эксплуатации будет обусловлена формированием резонансной обстановки в подвесе двумя типами волн — изгибной, как результата воздействия антисимметричной составляющей звукового давления, а также окружной (по линии шпангоута) волны, обусловленной действием симметричной составляющей звукового давления.

В работе ставится задача построения расчетных моделей упругого взаимодействия подвеса гироскопа с ультразвуковым лучом в эксплуатационных условиях, установить условия возникновения волнового совпадения (пространственного резонанса) для двух типов волн и оценить степень влияния угла падения ультразвукового луча и частоты излучения на опасность проявления эффекта «акустической прозрачности» корпуса прибора, порождающей прохождение луча внутрь подвеса без диссипации звуковой энергии.

ПРОХОЖДЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЛУЧА ЧЕРЕЗ ДВУХСТЕПЕННОЙ ГИРОСКОП С ЖИДКОСТАТИЧЕСКИМ ПОДВЕСОМ

Строя расчетную модель, прежде всего оговорим условие значительной величины волнового размера корпуса (см. рис. 1), т. е. примем

$$kR > 1, \quad (1)$$

что позволяет в дальнейшем рассматривать отдельно взятый элемент Π поверхности корпуса в виде безграничной по протяженности тонкой упругой изотропной пластины толщиной 2δ (рис. 2).

Пусть на пластину Π под углом θ падает плоская звуковая волна I . Ось Ox параллельна фронту волны. Давление в этой волне примем в виде

$$P_1 = P_{10} \exp i \{ \omega t - k_b [(z + \delta) \cos \theta + y \sin \theta] \}, \quad (2)$$

где $k_b = \omega / c_0$ — волновое число воздушного

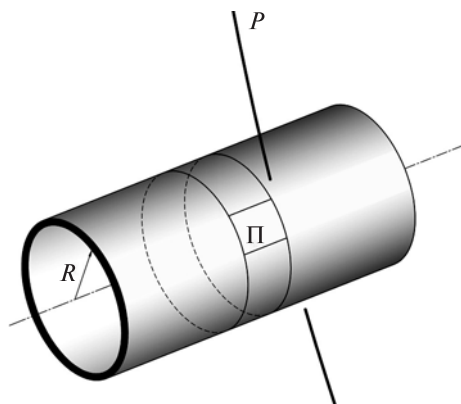


Рис. 1. Корпус гироскопического прибора

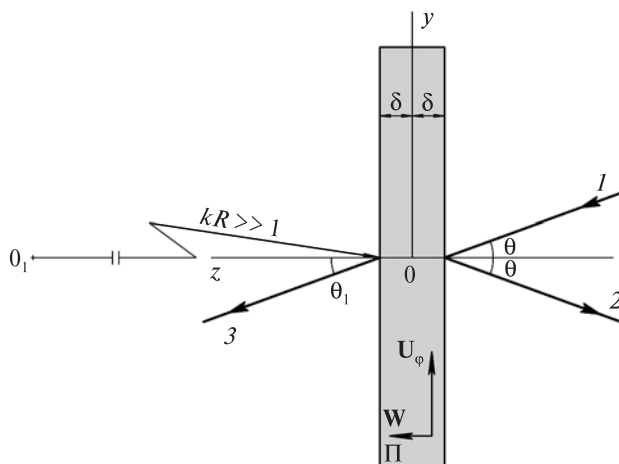


Рис. 2. Прохождение ультразвукового луча через упругий изотропный слой шпангоута корпуса

пространства снаружи корпуса прибора, P_{10} — амплитуда давления в падающей звуковой волне I . Если считать волновые числа со стороны падающей (P_1) и со стороны прошедшей (P_3) волн приблизительно одинаковыми, тогда $\theta_1 = \theta$. В противном случае следует воспользоваться законом Снеллиуса.

Давление в отраженной (2) и прошедшей (3) волнах можно записать в виде

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{20} \exp i \{ \omega t - k_b [-(z + \delta) \cos \theta + y \sin \theta] \}, \\ P_3 &= P_{30} \exp i \{ \omega t - k_b [(z + \delta) \cos \theta_1 + y \sin \theta_1] \}. \end{aligned} \quad (3)$$

Имеет место плоская деформация слоя пластины в направлении y, z , которая не зависит от третьей координаты x , так как вдоль нее давление не изменяется.

Как известно, колебания пластины из жестких материалов в этом случае описываются уравнениями движения тонких плит в форме Ламе, но при условии, что длина следа падающей волны не меньше шестикратной толщины пластины:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) &= \rho_c \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \\ (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) &= \rho_c \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)},$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)},$$

где V, W — упругие смещения в направлении осей O_y и O_z , ρ_c — плотность слоя материала, λ, μ — упругие постоянные Ламе, E — модуль Юнга, σ — коэффициент Пуассона.

Звуковое давление на внешнюю поверхность корпуса равно

$$(P_1 + P_2)_{z=-\delta} = (P_{10} + P_{20}) \exp(-ik_b y \sin \theta),$$

а на внутреннюю —

$$(P_3)_{z=\delta} = P_{30} \exp(-ik_b y \sin \theta_1).$$

Представим акустическое давление в виде суммы симметричной и антисимметричной составляющих

$$P_c = \frac{1}{2} (P_{10} + P_{20} + P_{30}) \exp(-ik_b y \sin \theta),$$

$$P_a = \frac{1}{2} (P_{10} + P_{20} - P_{30}) \exp(-ik_b y \sin \theta_1)$$

и установим степень их влияния на колебания пластины «П».

Когда к пластине приложена симметричная составляющая P_c , граничные условия имеют вид

$$Z_z \Big|_{z=-\delta} = -P_c, \quad Z_y \Big|_{z=-\delta} = 0. \quad (5)$$

Когда к пластине приложена антисимметричная составляющая P_a давления, граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} Z_z \Big|_{z=-\delta} &= -P_a, \quad Z_y \Big|_{z=-\delta} = 0, \\ Z_z \Big|_{z=\delta} &= P_a, \quad Z_y \Big|_{z=\delta} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Звукоизоляция преграды от звукового воздействия характеризуется долей звуковой мощ-

ности прошедшего излучения. Коэффициентом прохождения звука A называется отношение амплитуды P_{30} прошедшей волны к амплитуде P_{10} падающей волны, т. е. $A = P_{30}/P_{10}$. И поскольку мощности, переносимые волнами, пропорциональны квадратам амплитуды давлений, то величина $|A|^2$ есть коэффициент звукопроницаемости τ_θ преграды при падении звуковой волны под углом θ . Понятно, что в диффузном поле коэффициент звукопроницаемости τ_θ будет определяться осреднением по Пэрису

$$\tau = \int_0^{\pi/2} \tau_\theta \sin 2\theta d\theta.$$

Общая колебательная скорость слоев преграды под действием симметричной и антисимметричной составляющих звукового давления равна сумме симметричных и антисимметричных скоростей смещений на лицевой стороне корпуса ДУСУ (внешней стороне) и разности на внутренней (теневого) стороне корпуса.

С другой стороны, колебательные скорости поверхностей должны быть равны нормальным составляющим скоростей колебаний воздуха на передней и жидкости на внутренней стороне. Эти граничные условия можно записать в виде

$$\begin{aligned} \left. \frac{dW}{dt} \right|_{z=-\delta} &= \frac{P_1 - P_2}{\rho_b c_b} \cos \theta, \\ \left. \frac{dW}{dt} \right|_{z=\delta} &= \frac{P_3}{\rho_k c_k} \cos \theta, \end{aligned} \quad (7)$$

где $c_k = 6c_b$.

Принимая сопротивление корпуса симметричным колебаниям значительно большим сопротивлению антисимметричным колебаниям, звукопроницаемость элементов корпуса чисто изгибным колебаниям можно записать в виде

$$\begin{aligned} \tau_\theta &= \left[\left(1 + \eta \frac{c_n^4}{c_b^4} \cdot \frac{m_\Pi \omega}{2\rho_b c_b} \sin^4 \theta \cos \theta \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{c_n^4}{c_b^4} \sin^4 \theta \right)^2 \left(\frac{\omega m_\Pi}{2\rho_b c_b} \cos \theta \right)^2 \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $c_n = \sqrt[4]{D\omega^2 / m_\Pi}$ — фазовая скорость распространения изгибных волн в корпусе, $m_\Pi = 2\rho_k \delta$ —

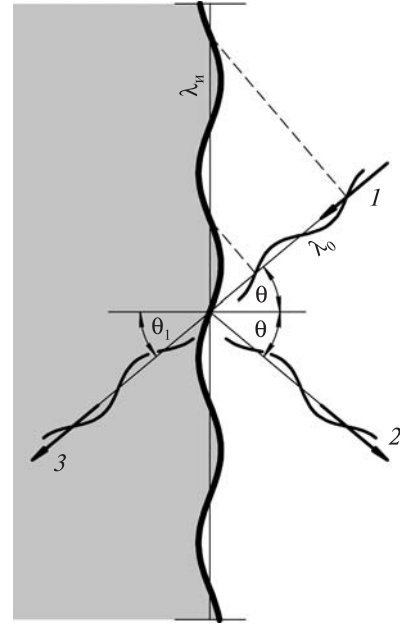


Рис. 3. Явление волнового совпадения: 1 — падающая волна, 2 — отраженная волна, 3 — прошедшая волна

удельная масса единицы площади корпуса,

$$D = \frac{2 E \delta^3}{3(1 - \sigma^2)} \text{ — цилиндрическая жесткость мате-}$$

риала корпуса, ρ_b — плотность воздуха (масса в единице объема).

Очевидно, что на низких частотах, когда $c_n < c_b$,

$$\tau_\theta = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega m_\Pi}{2\rho_b c_b} \cos \theta \right)^2}.$$

С увеличением частоты ω скорость изгибных волн увеличивается. Начиная с некоторой так называемой граничной (критической) частоты, при соответствующем подборе угла падения θ всегда возможно равенство нулю второго члена знаменателя в выражении (8), т. е.

$$c_n = \frac{c_b}{\sin \theta_c}. \quad (9)$$

Соотношение (9) очерчивает явление волнового совпадения при изгибных колебаниях, установленное Л. Кремером. Разделив обе части формулы (9) на f , запишем ее в виде (рис. 3)

$$\lambda_b = \lambda_n \sin \theta,$$

где $\lambda_b = c_b / f$ — длина звуковой волны на лицевой (внешней) стороне корпуса, $\lambda_n = c_n / f$ — длина волны изгиба в элементарном участке корпуса.

Наличие волнового совпадения обеспечивает трансляцию энергии звукового излучения в зону акустической тени практически без потерь. В отличие от частотного резонанса, порожденного равенством собственной частоты и частоты излучения, при волновом резонансе имеет место совпадение геометрических размеров, а именно, следы падающей и изгибной волны совпадают. Поскольку выделенный участок «П» корпуса предполагается неограниченным, то все частоты колебаний будут собственными. При явлении совпадения распределение давления в падающей волне I вдоль пластины точно соответствует распределению упругих смещений при собственных колебаниях пластины той же частоты, что и приводит к интенсивному росту колебаний.

При иных значениях угла θ звукопередача резко снижается, т.е. растет звукоизоляция. Наименьшая частота $f_{гр}$, при которой становится возможным волновое совпадение, будет, очевидно, при $\theta = \pi/2$ рад. Это следует из формулы (9):

$$f = \frac{c_b^2}{2\pi \sin \theta} \sqrt{\frac{m_{п}}{D}},$$

$$f_{гр} = f \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = \frac{c_b^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{п}}{D}}. \quad (10)$$

Начиная с граничной частоты, характер прохождения звука через корпус определяется явлением совпадения. Из формулы (9) видно, что каждой частоте соответствует свой угол падения θ_c , при котором звуковая волна проходит внутрь прибора с минимальными потерями. Основное значение для звукопроницаемости при частотах $f_{гр} < f$ приобретает область углов падения

$$\theta_c = \arcsin \frac{c_b}{c_n}.$$

Для иллюстрации проведем численную оценку явления. Пусть для алюминия $\sigma = 0.25$, $E = 10300 \cdot 10^7$ Н·м⁻², $m_{п} = 54$ Н·с², $\omega = 2\pi f$, $f = 42$ кГц, $\rho_k = 27$ кН·м⁻¹с², $\delta = 1$ мм, $c_b =$

$= 331$ м·с⁻¹. Тогда

$$c_n = \sqrt[4]{\frac{D(2\pi)^2 f^2}{m_{п}}} = \sqrt[4]{\frac{2E\delta^2(2\pi)^2 f^2}{3m_{п}(1-\sigma^2)}} = 1900 \text{ м·с}^{-1},$$

$$f_{гр} = 15.453 \text{ кГц},$$

$$c_n = \frac{c_b}{\sin \theta_n};$$

$$\sin \theta_n = 0.1742, \theta_n = 10^\circ,$$

$$c_{п} = \sqrt{\frac{E}{\rho_k(1-\sigma^2)}} = 3333 \text{ м·с}^{-1},$$

$$c_{п} = \frac{c_b}{\sin \theta_{п}}, \sin \theta_{п} = 0.09, \theta_{п} = 5^\circ 10'.$$

Таким образом, корпус прибора становится «акустически прозрачным» при значениях угла падения волны $\theta = 10^\circ$ (в этом случае интенсивная перекачка звуковой энергии осуществляется изгибной волной корпуса и зависит от частоты f акустического излучения) и при значениях угла $\theta = 5^\circ 10'$, когда интенсивную трансляцию звуковой энергии осуществляет окружающая, по параллели, скорость, которая не зависит от частоты излучения.

Эти два значения угла θ наиболее опасны, так как способствуют практически беспрепятственному прохождению внутрь прибора, точнее в жидкостатическую часть подвеса, акустического излучения извне.

В этом случае предполагается, что импеданс $Z_c < Z_a$, т.е. сопротивление материала корпуса антисимметричным (изгибным) колебаниям значительно больше сопротивления симметричным колебаниям. В этом случае имеет место соотношение

$$c_{п} = \frac{c_b}{\sin \theta}, \quad (11)$$

где $c_{п} = [E\rho_k^{-1}(1-\sigma^2)^{-1}]^{1/2}$ — скорость распространения продольной (окружной) волны.

Равенство (11) определяет явление волнового совпадения при *симметричных* колебаниях корпуса, которое возникает каждый раз, когда следы падающей и продольной волн совпадают, причем, совпадение зависит только от угла падения волны и может проявляться на любой частоте излучения.

ВЫВОДЫ

Представленные результаты обращают внимание на особенности летной эксплуатации гиперзвуковых летательных аппаратов. В частности, анализируется природа появления дополнительных погрешностей пилотажно-навигационного оборудования в поле ультразвукового излучения.

Установлены условия возникновения резонансных проявлений в полиагрегатном подвесе гироскопа и проведена оценка влияния угла падения ультразвукового луча, а также частоты излучения на возникновение пространственного резонанса (волнового совпадения) в подвесе.

Результаты представляют интерес для специалистов авиационно-космической отрасли и могут быть использованы при тестировании изделий на стендах предполетной аттестации.

1. Бойко Г. В. Линейно упругий подвес поплавкового гироскопа в акустическом поле // Технологический аудит и резервы производства. — 2013. — № 1 (14). — С. 7—10.
2. Калініна М. Ф., Шибецький В. Ю. Прояв акустичного імпедансу при старті РН // Людина і космос: Тез. доп. XIV Міжнарод. наук.-практ. конф. — Дніпропетровськ: НЦАОМУ ім. О. М. Макарова, 2012. — С. 14.
3. Карачун В. В., Мельник В. Н., Ковалец О. Я. Линейно-упругий поплавокый подвес гироскопа. — К.: «Корнейчук», 2009. — 239 с.
4. Косова В. П. Надзвуковий політ і похибки поплавкового гіроскопа // Achievement of high school: Матер.

VIII междунар. науч.-практ. конф. — София: «Бял ГРАД-БГ», 2012. — С. 30—32.

5. Мельник В. М., Карачун В. В. Уменьшение акустической погрешности поплавкового дифференцирующего гироскопа пассивными методами // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. — 2013. — № 6/7 (66). — С. 39—41.
6. Ригли У., Холлистер У., Денхард У. Теория, проектирование и испытания гироскопов: Пер. с англ. — М: Мир, 1972. — 416 с.

Стаття надійшла до редакції 08.05.14

Г. В. Бойко

РЕЗОНАНС ХВИЛЬОВОГО ЗБИГУ
В УМОВАХ ГІПЕРЗВУКОВОГО ПОЛЬОТУ

Наводяться результати аналізу виникнення хвильового збігу у підвісі двостепенного поплавкового гіроскопа в умовах гіперзвукового польоту. Будується розрахункова модель пружної взаємодії ультразвукового променя з поліагрегатним підвісом і визначаються умови виникнення явища «акустичної прозорості» для двох типів генерованих у корпусі приладу хвиль.

G. V. Boiko

COINCIDENCE RESONANCE
IN HYPERSOUND FLIGHT CONDITIONS

We present some results of our analysis of the origin of wave coinciding in the suspension of a two-step float gyroscope in hypersound flight conditions. We construct a calculation model of resilient interaction between the ultrasonic ray and polyaggregate suspension. The conditions necessary for the occurrence of the acoustic transparency phenomenon are considered for two types of waves generated in the device body.

УДК 521.93

А. О. Корсунь¹, Г. С. Курбасова²

¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

² Кримська астрофізична обсерваторія

РЕАЛІЗАЦІЯ GPS-ЧАСУ І ГЛОНАСС-ЧАСУ: ПОРІВНЯННЯ ЧАСОВИХ ДАНИХ НА ІНТЕРВАЛІ 2009—2012 РОКІВ

GPS і ГЛОНАСС — дві незалежні глобальні навігаційні супутникові системи. Кожна забезпечує, незалежно одна від іншої, визначення точного місця розташування і часу у будь-якій точці світу. Зсув часу між GPS і ГЛОНАСС є важливим параметром у комбінованій обробці GPS/ГЛОНАСС-вимірювань. Високоточна система оцінки різниці у часі може забезпечити сантиметрову точність визначення місця розташування. Супутники GPS і ГЛОНАСС широко використовуються, зокрема ВІРМ, для синхронізації атомних годинників різних лабораторій світу. Точність синхронізації становить 2 нс для відстаней до 1000 км і 6 нс — понад 1000 км. Мета цієї роботи полягає у зіставленні вимірювань C0 (GPS-час) і C1 (ГЛОНАСС-час) на інтервалі 2009 — 2012 рр.

ВСТУП

У зв'язку із запуском супутників Глобальної позиційної системи GPS (Global Positioning System) та Глобальної навігаційної системи (ГЛОНАСС), оснащених атомними годинниками (цезієвими стандартами частоти, або квантовими генераторами), з'явилися нові реалізації шкал часу: GPS-час і ГЛОНАСС-час, які належать до атомних шкал часу. Бортові атомні годинники мають точність приблизно 1 нс та 1 нс на добу за темпом їхнього ходу.

Космічні сегменти обох систем містять по 24 навігаційні супутники, які безперервно випромінюють радіонавігаційні сигнали. Прийняті спеціальним приймачем, сигнали навігаційних супутників дають змогу визначити місцеположення, швидкість і поточний час споживача, а також отримати інформацію про дієздатність супутникових систем. Для розв'язання поставлених завдань потрібно, щоб у зоні радіовидимості приймача перебували щонайменше чотири супутники, які належать до одного сузір'я, або п'ять супутників, що належать до різних сузір'їв (конфігурацій) супутників.

Атомні годинники GPS регулюються на Землі перед запуском так, щоб після виходу на орбіту годинники відмічали цілі секунди з тією ж самою середньою швидкістю, що і годинники на Землі. Тому здається, що годинники GPS перед запуском на орбіту з відповідною висотою ідуть з тією ж самою швидкістю, що і годинники на Землі.

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ НА СУПУТНИКАХ І ЇХНІЙ ЗВ'ЯЗОК З НАЗЕМНИМ ЧАСОМ

GPS-час має сталий зсув на 19 с відносно міжнародного атомного часу (TAI) та збігається із всесвітнім координованим часом (UTC) на стандартну GPS-епоху: 1980 січень 6.0. Шкала GPS-часу відтворює безперервний час, який не коригується стрибком секунди, як це робиться в шкалі UTC.

Шкалу GPS-часу спочатку встановив Контрольний відділ морської обсерваторії США (USNO), який базувався в Колорадо-Спринг (штат Колорадо, США). Ця шкала складалася з невеликого ансамблю цезієвих годинників на супутниках GPS. Спочатку шкалу GPS-час синхронізували зі шкалою всесвітнього координованого часу UTC (USNO) Морської обсерваторії США. Тепер шкала GPS-часу контролюється у

Паризькій обсерваторії, а уточнені добові значення публікуються в Бюлетенях Міжнародного бюро мір і ваг (BIPM).

Для GPS-часу та TAI прийнято таке співвідношення:

$$[TAI - \text{GPS-час}] = 19 \text{ с} + C_0,$$

де різниця 19 с утримується сталою, а C_0 (порядку десятка наносекунд) змінюється з часом.

Співвідношення між GPS-часом і часом UTC містить змінну кількість секунд як результат зміни останнього стрибками на одну секунду та має такий вигляд:

від моменту 2009 січень 1, 0 годин UTC до моменту 2012 липень 1, 0 год UTC

$$[UTC - \text{GPS-час}] = -15 \text{ с} + C_0,$$

від моменту 2012 липень 1, 0 год UTC до повідомлення

$$[UTC - \text{GPS-час}] = -16 \text{ с} + C_0.$$

У Паризькій обсерваторії отримують добові значення C_0 з урахуванням у GPS-спостереженнях високих супутників поправок елементів орбіт супутників та іоносферних затримок, а потім ці значення згладжують для отримання різниць UTC(OP) – GPS-час на 0 год UTC. Середня квадратична похибка добових значень C_0 становить 10 нс.

Система ГЛОНАСС, аналогічна GPS, розроблялася в колишньому СРСР, зараз підпорядкована Росії. Згідно з «Інтерфейсним контрольным документом» ред. 5-1 система ГЛОНАСС повністю розгорнута з 2008 р. Ця система складається з 24 супутників (включаючи три активні запасні), рівномірно розташованих у трьох орбітальних площинах з нахилом 64.8° до екватора. Орбіти супутників цієї системи близькі до колових з висотою 19100 км та періодом 11 год 15 хв, тобто подібні до GPS-орбіт. На відміну від GPS супутники ГЛОНАСС мають різні несучі частоти. Відмінною є також структура навігаційного повідомлення. Крім того, у ГЛОНАСС застосовуються інші системи координат і часу.

Розроблено приймачі, які можуть одночасно реєструвати сигнали як від GPS-, так і від ГЛОНАСС-супутників, і обидві системи разом використовуються для розв'язання різних наукових задач. Основна відмінність системи ГЛОНАСС від GPS у тому, що супутники ГЛОНАСС

в своєму орбітальному русі не мають резонансу (синхронності) з обертанням Землі, що забезпечує їм більшу стабільність. Таким чином, угруповання космічних апаратів ГЛОНАСС не вимагає додаткових коригувань протягом усього терміну активного існування. ГЛОНАСС дає корисну додаткову інформацію: більший в порівнянні з GPS нахил орбіт супутників ГЛОНАСС дозволяє досягати вищих положень над горизонтом, що дуже важливо для користувачів у вищих географічних широтах, особливо у полярній області, причому більш точне визначення висоти може бути отримане для геоїда. Крім того, усі супутники ГЛОНАСС оснащені світловідбивачами для їхньої лазерної локації, у той же час станом на 2014 р. GPS не має супутника з кутовими відбивачами.

ГЛОНАСС-супутники поширюють загальну часову шкалу, визначену як ГЛОНАСС-час. ГЛОНАСС-час з 1 січня 1999 р. має сталий зсув відносно TAI на 32 с. Співвідношення між ГЛОНАСС-часом і UTC має вигляд

$$[UTC - \text{ГЛОНАСС-час}] = 0 \text{ с} + C_1,$$

де часова різниця 0 с є сталою, а величина C_1 змінюється з часом (порядку декількох сотен наносекунд з моменту липень 1977 р.).

Співвідношення між ГЛОНАСС-часом і TAI включає змінне число секунд і є таким:

від моменту 2009 січень 1, 0 год UTC до моменту 2012 липень 1, 0 год UTC

$$[TAI - \text{ГЛОНАСС-час}] = 34 \text{ с} + C_1;$$

від моменту 2012 липень 1, 0 год UTC:

$$[TAI - \text{ГЛОНАСС-час}] = 35 \text{ с} + C_1,$$

де C_1 подано на 0 год UTC кожного дня.

Величини C_1 обчислюються за даними спостережень ГЛОНАСС у астрогеодинамічній обсерваторії в Боровці (Польща), середня квадратична похибка добових значень C_1 становить декілька сотень наносекунд.

Щодобові значення C_0 і C_1 публікуються у щомісячних Циркулярах Міжнародного бюро ваг і вимірів (BIPM). Інформація про співвідношення шкал часу UTC і TAI із шкалами GPS-час та ГЛОНАСС-час надається в BIPM, а також на сайті <http://www.bipm.org>.

В Річних звітах BIPM з 2011 р. також публікуються значення C_0' і C_1' , які стосуються від-

повідно обробки спостережень GPS у Морській обсерваторії США (USNO) та спостережень ГЛОНАСС в Інституті метрології часу і простору (ВНПФТРІ) Росії.

Відмітимо також, що супутники GPS і ГЛОНАСС широко використовуються, зокрема у ВІРМ, для синхронізації атомних годинників різних лабораторій світу. Точність синхронізації становить 2 нс для відстаней до 1000 км і 6 нс — для відстаней понад 1000 км.

Глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС), до якої належать системи GPS і ГЛОНАСС, насамперед покликана забезпечити глобальну просторово-часову і навігаційну підтримку з високою точністю і надійністю. З метою забезпечення високої точності вимірювань регулярно виконується коригування похибки годинників приймача та багатьох інших ефектів, але є ще залишкові похибки, що не виправлені.

Постійно діюча мережа ГНСС спільно із перманентними опорними станціями систем спостережень має таку щільність, яка дозволить фахівцям використовувати її як геодезичну референцну систему для визначення географічних координат та проведення наукових досліджень у галузі геодинаміки, фізики іоносфери і тропосфери. При цьому для наукових досліджень особливо важливі дані за тривалий проміжок часу. Однією з найважливіших наукових проблем є експериментальна перевірка загальної та спеціальної теорій відносності. Подальше підвищення точності синхронізації годин дозволить вирішувати питання про експериментальну перевірку уповільнення часу на супутниках ГНСС.

ВИХІДНІ ДАНІ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ

Вихідні дані для аналізу та порівняння взяті такі:

- часові ряди **C0** і **C1** за період з 30 листопада 2008 р. по 29 грудня 2012 р. [3];
- часовий ряд відхилень тривалості доби від стандартної [www.iers.org/IERS/].

На рис. 1 наведені графіки вихідних даних і тенденції їхніх змін з часом. T_0 є тренд в даних **C0**; T_1 , T_2 , T_3 — тренди на окремих ділянках даних **C1** відповідно до знаку тенденцій. Математичний опис трендів має вигляд:

$$T_0 = -4.0028 \text{ нс} + 0.0034 \text{ нс/добу} \cdot dt_0,$$

$$T_1 = 35.91 \text{ нс} + 0.1838 \text{ нс/добу} \cdot dt_1,$$

$$T_2 = -231.4 \text{ нс} + 0.3000 \text{ нс/добу} \cdot dt_2,$$

$$T_3 = -156.3 \text{ нс} - 0.0089 \text{ нс/добу} \cdot dt_3,$$

де $dt_0 = 1459$ діб, $dt_1 = 260$ діб, $dt_2 = 260$ діб, $dt_3 = 890$ діб.

Методи аналізу даних **C0** і **C1** обрано з урахуванням специфіки вихідних даних: обмежений обсяг, нерегулярний характер змін, наявність прихованих періодичностей і нерегулярною на різних ділянках часової осі складовою шуму. Для зіставлення послідовностей даних **C0** і **C1** були обрані: двоканальний спектральний авторегресійний аналіз (АР-аналіз) і дискретний вейвлет-аналіз. Суть цих методів полягає в наступному.

Двоканальний спектральний АР-аналіз полягає в обчисленні та АР-оцінці взаємної спектральної щільності потужності (СЩП) для двох послідовностей (два канали) даних. Спектральна щільність потужності у разі авторегресійних коефіцієнтів передбачення вперед і спектральна щільність у разі авторегресійних коефіцієнтів передбачення назад має вигляд [2]

$$P_{AP} = T[A(f)]^{-1} P_p^f [A(f)]^{-H}, \quad (1)$$

$$P_{AP} = T[B(f)]^{-1} P_p^b [B(f)]^{-H}, \quad (2)$$

де

$$A(f) = 1 + \sum_{k=1}^p A[k] \exp(-j2\pi f k T), \quad (3)$$

$$B(f) = \exp(-j2\pi f p T) \left[1 + \sum_{k=1}^p B[k] \exp(-j2\pi f k T) \right]. \quad (4)$$

Визначення порядку двоканальної АР-моделі виконується за допомогою АІК-критерію Акаїке:

$$AIC[p] = \ln(\det P_p^f) + 8p, \quad (5)$$

де p — порядок моделі, N — число відліків даних у каналі. Оптимальний порядок той, при якому вираз (5) має мінімум.

Для вимірювання подібності (як функції частоти) двох сигналів обчислюється квадрат модуля когерентності (КМК)

$$КМК(f) = |P_{xy}(f)| / (P_{xx}(f) P_{yy}(f)), \quad (6)$$

де $P_{xx}(f)$, $P_{yy}(f)$, $P_{xy}(f)$ — елементи матриці когерентності.

Величина КМК повинна лежати між нулем (для частот, на яких немає когерентності між ка-

налами) і одиницею (для частот, на яких канали повністю когерентні).

Вирази (1) — (6) складають основу алгоритму програми MCARPSD [2], яка використовувалася нами для проведення АР-аналізу.

Неоднорідність на різних часових інтервалах, наявність стрибків потребує застосування методу локального аналізу для зіставлення даних. Тому ми застосовували вейвлет-аналіз.

Вейвлет-метод має перевагу наданої вейвлетами — можливість виконувати локальний аналіз, тобто аналіз локалізованої області більшого сигналу. Вейвлет-аналіз дозволяє використовувати тривалі проміжки часу, де ми хочемо отримати точнішу низькочастотну інформацію і короткі проміжки для виявлення високочастотної інформації.

На відміну від звичайних методів, вейвлет-розклад породжує сімейство ієрархічно організованих розкладень. Вибір відповідного рівня ієрархії залежатиме від характеристик даних і постановки конкретного завдання: перший рівень розкладу можна використати для усунення більшої частини шуму, скачки і неоднорідності частіше видно на вищому рівні розкладання. Математичний опис одновимірного вейвлета має вигляд

$$\frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right),$$

де $a > 0$, $b \in R$, R — область визначення функції сигналу.

Послідовності даних $C0$ і $C1$ — дискретні, тому не всі значення вейвлет-розкладання необхідні для розподілу вихідного сигналу на складові: відновлений сигнал і шум. З двох типів вейвлет-перетворення (неперервного і дискретного) в цьому випадку доречно застосувати дискретне вейвлет-перетворення. При цьому вейвлет повинен задовольняти деякі умови допустимості. Ці умови задовольняють всі вейвлети сімейства Добеши [1]. Для вирішення задачі відновлення сигналу і аналізу складової шуму ми використовували програми пакетного вейвлет-аналізу зі складу програмного забезпечення МАТЛАБ.

Для встановлення складу низькочастотних коливань використовувався фур'є-аналіз.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

На рис. 2 приведено графіки періодограм вихідних даних, обчислені за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Максимальні значення потужності на обох графіках визначаються на частоті $f = 0.004883$ циклів на добу, що відповідає періоду коливань 204.8 доби.

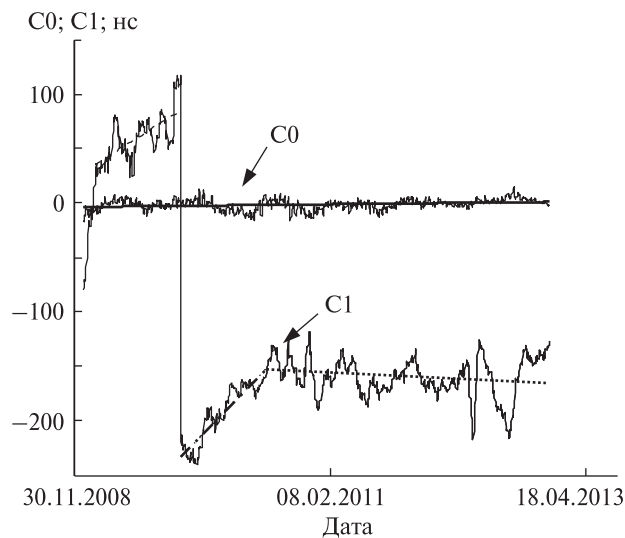


Рис. 1. Вихідні дані $C0$, $C1$ та їхні тренди $T0$, $T1$, $T2$, $T3$ на інтервалі часу 30.11.2008 — 28.12.2012

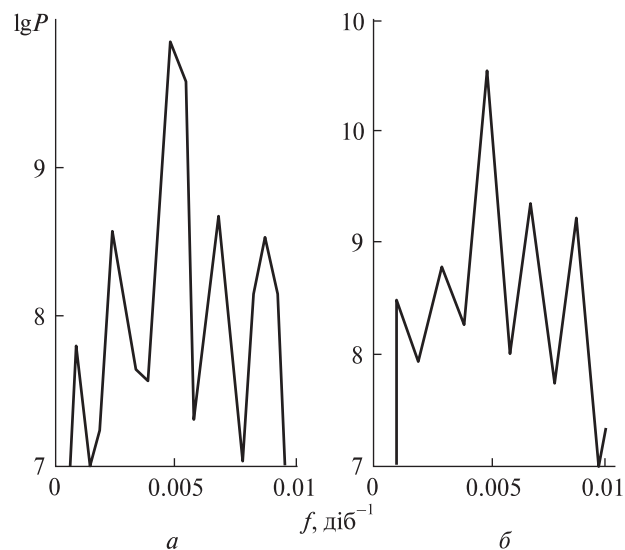


Рис. 2. Періодограми вихідних даних: а — дані $C0$, б — дані $C1$ (f — частота, P — потужність)

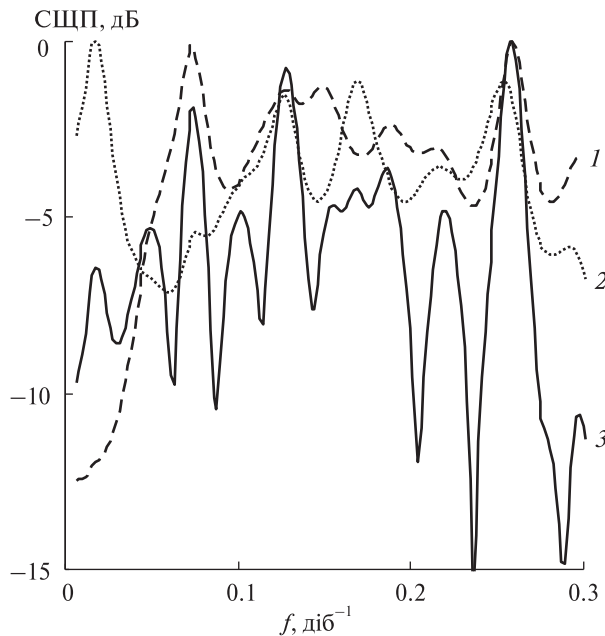


Рис. 3. Двоканальний періодограмний АР-аналіз даних dC0 і dC1: 1 — автоспектр даних dC0, 2 — автоспектр даних dC1, 3 — взаємна спектральна щільність потужності даних dC0 і dC1

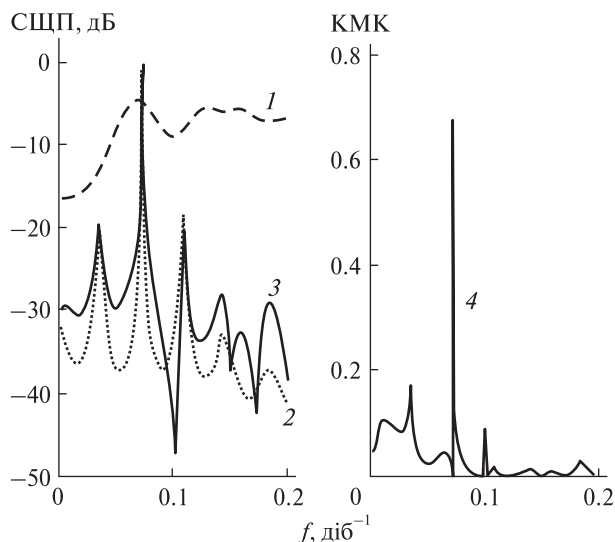


Рис. 4. Двоканальний періодограмний АР-аналіз даних про зміни день у день даних C0 і відхилень тривалості доби від стандартних (LOD): 1 — автоспектр даних dC0, 2 — автоспектр даних dLOD, 3 — взаємна спектральна щільність потужності даних dC0 і dLOD, 4 — амплітуда квадрата модуля когерентності

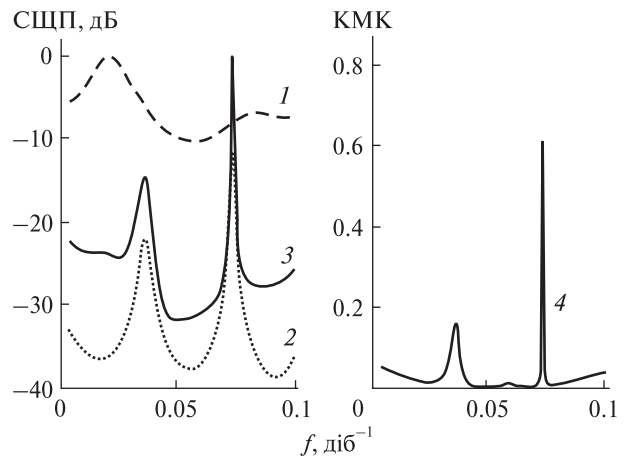


Рис. 5. Те ж для даних C1

GPS-час і ГЛОНАСС-час є дві незалежні один від одного системи вимірювань. Тим не менш їхні зміни день у день мають когерентні коливання.

За допомогою двоканального АР-аналізу встановлено кореляції між деякими варіаціями dC0 і dC1. Результати аналізу наведено на рис. 3. Згідно з формулою (5) обрано оптимальний порядок АР-моделі $p = 27$. Наведені на рис. 3 взаємний спектр dC0 і dC1 і автоспектри показують на кореляцію між варіаціями.

Графік взаємної спектральної щільності потужності показує наявність кореляцій між окремими варіаціями даних dC0 і dC1 (рис. 3), що робить доцільним встановлення кореляцій між dC0, dC1 і змінами день у день відхилень тривалості доби від стандартної доби dLOD (Long of Days). На рис. 4, а наведені графіки автоспектрів і взаємного спектру даних про зміни dC0 і dLOD. Когерентність виявляється лише на одній частоті 0.0733 циклів за добу (13.64 діб за цикл). На цій частоті, як показано на рис. 4, б, КМК = 0.68, що свідчить про можливість зв'язку швидкості обертання Землі і змін день у день відліків в даних C0.

Встановлення когерентності між даними dC1 і dLOD проведено з 2010 р. (рис. 1). Відповідні графіки показано на рис. 5. Істотна когерентність (КМК = 0.64) виявляється на частоті 0.0733 циклів/добу (13.64 діб/цикл). Результати АР-аналізу свідчать про можливість зв'язку швидкості обертання Землі і змін день у день відліків

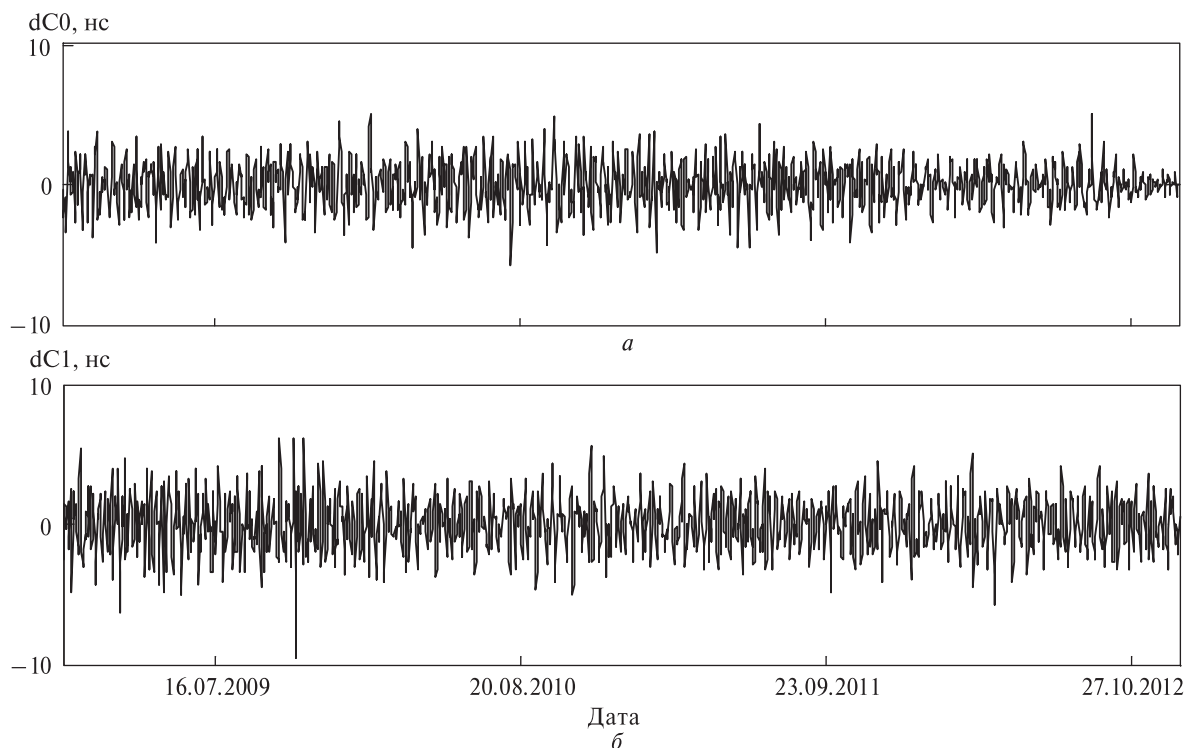


Рис. 6. Складові шумів dC0 і dC1 у відповідних даних

Статистики шуму в даних C0, C1

Дані	$\bar{X}$, 10^{-3} нс	M , нс	MM , нс	MAX , нс	MIN , нс	Σ	$L1$, нс	$L2$, нс	LL , нс
C0	-3.5	-0.004	0.175	5.062	-5.798	1.536	1767	58.7	5.798
C1	-2.5	-0.0011	0.0377	6.16	-9.538	1.863	2167	71.2	9.539

в даних C0 і C1 на частоті 0.0733. Оптимальний порядок AP-моделі відповідно до формули (5) дорівнює $p = 27$.

Для зіставлення експериментальних послідовностей даних слід насамперед зіставити їхні моделі. Ми будемо виходити з базової моделі для сигналу з шумом, яка має в основному вигляд [2]

$$s(n) = f(n) + \sigma e(n), \quad (7)$$

де n — рівновіддалені відліки часу.

У простій моделі ми припускаємо, що $e(n)$ є гауссівським білим шумом $N(0, 1)$, а рівень шуму повинен дорівнювати $\sigma = 1$. Складові $f(n)$ моделі (7) — сигнал, спектральна структура якого нами встановлена і зіставлена в даних C0 і C1 за допомогою фур'є- і AP-аналізу.

Виконаємо вейвлет-аналіз складової шуму в даних C0 і C1 за допомогою вейвлетів Добеші db4, де 4 — порядковий номер в сімействі вейвлетів Добеші [1]. Згідно з критерієм [4] оптимальний рівень розкладання для даних C0 і C1 дорівнює 3. Шумовий компонент визначався як різниця вхідного сигналу і сигналу, відновленого за допомогою вейвлет-перетворення. Аналіз графіків шумових компонентів (рис. 6) вказує на нерівномірний розподіл екстремальних відхилень від середнього на різних ділянках часової осі. На графіку рис. 6, б максимальне відхилення пов'язане зі стрибком у вихідних даних C1. Аналіз даних dC0 (рис. 6, а) вказує на істотне зменшення амплітуди відхилень від середнього у 2012 р., що свідчить про стабілізацію і зниження похибки вимірювань C0.

У таблиці наведено статистики шуму: $\bar{X}$ — середнє, M — медіана, MM — мода, MAX — максимальне відхилення від середнього значення, MIN — мінімальне відхилення від середнього значення, σ — стандартне відхилення від середнього значення, $L1$, $L2$ — верхній і нижній рівень відхилення від нормального розподілу, LL — максимальне відхилення від нормального розподілу.

ВИСНОВКИ

1. Графіки вихідних даних за період 2009—2012 рр. (рис. 1) вказують на стабільний характер розвитку тенденції зменшення тренду відліків даних C0. Тенденції розвитку відліків даних C1, навпаки, нестабільні, тренди на окремих ділянках часової осі мають значний нахил.

2. Характеристики вихідних даних зумовили вибір методів порівняння даних C0 і C1: фур'є-аналіз, АР-аналіз, вейвлет-аналіз.

3. Зіставлення періодограм даних C0 і C1, обчислених методом швидкого перетворення Фур'є, виявляє максимальне значення потужності на обох графіках на частоті $f = 0.004883$ циклів на добу, що відповідає періоду коливаний 204.8 доби.

4. Висновки з проведеного двоканального АР-аналізу такі: спостерігається кореляція між змінами день у день даних C0 і змінами день у день даних C1, встановлено істотну когерентність (квадрат модуля когерентності $KMK > 0.6$) між змінами день у день даних C0 і C1 і змінами день у день відхилень тривалості доби від стандартних LOD (стандартна тривалість доби — Lengs of Day) для колювання з періодом 13.6 діб.

5. Вейвлет-аналіз виявляє неоднорідність розподілу шуму на різних ділянках часової осі. Аналіз графіка складової шуму даних C0 (рис. 6, а) показує на істотне зниження рівня шуму за 2012 рік.

6. Наведені в таблиці статистики свідчать про відхилення експериментального розподілу даних C0 і C1 від нормального. В цілому статистики даних C0 мають меншу розбіжність із статистиками нормального розподілу, ніж статистики даних C1.

7. Виявлення змін C0 і C1 з періодами 13.6 і 204.8 діб допускає можливість впливу на виміри припливних хвиль.

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 464 с.
2. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. — М: Мир, 1990. — 584 с.
3. BIPM Annual Report on Time Activities. — 2010—2013. — Vol. 5—8.
4. Coifman R. R., Wickerhauser M. V. Entropy-based algorithms for best basis selection // IEEE Trans. Inform. Theory. — 1992. — 38, N 2. — P. 713—718.

Стаття надійшла до редакції 13.02.14

А. А. Корсунь, Г. С. Курбасова

РЕАЛИЗАЦИЯ GPS-ВРЕМЕНИ И ГЛОНАСС-ВРЕМЕНИ: СРАВНЕНИЕ ЧАСОВЫХ ДАННЫХ НА ИНТЕРВАЛЕ 2009 — 2012 ЛЕТ

GPS и ГЛОНАСС — две независимые глобальные навигационные спутниковые системы. Каждая обеспечивает, независимо друг от друга, определение точного местоположения и времени в любой точке мира. Смещение времени между GPS и ГЛОНАСС является важным параметром в комбинированной обработке GPS/ГЛОНАСС-измерений. Высокоточная система оценки разницы во времени может обеспечить сантиметровую точность определения местоположения. Спутники GPS и ГЛОНАСС широко используются, в частности BIPM, для синхронизации атомных часов разных лабораторий мира. Точность синхронизации составляет 2 нс для расстояний до 1000 км и 6 нс — более 1000 км. Цель этой работы заключается в сопоставлении измерений C0 (GPS-время) и C1 (ГЛОНАСС-время) на интервале 2009—2012 гг.

А. А. Korsun', G. S. Kurbasova

REALIZATION OF GPS TIME AND GLONASS TIME: A COMPARISON OF CLOCK DATA IN THE INTERVAL FROM 2009 TO 2012

GPS and GLONASS are two independent global navigation satellite systems. Each of them provides, independently of one another, the determination of precise location and time moment for any point in the world. The time displacement between GPS and GLONASS is an important parameter in the combined processing of GPS / GLONASS measurements. A precise system of time difference evaluation can provide centimeter accuracy of the location. GPS and GLONASS satellites are widely used, particularly BIPM, to synchronize atomic clocks at various laboratories in the world. The synchronization accuracy is 2 and 6 ns for distances up to 1000 km and for ones more than 1000 km, respectively. We compare measurements of C0 (GPS time) and C1 (GLONASS time) for the interval from 2009 to 2012.

М. В. Ищенко

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

РЕПРОЦЕССИНГ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ НА ПЕРМАНЕНТНЫХ СТАНЦИЯХ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ДЛЯ GPS-НЕДЕЛЬ 935—1399

Приведены результаты обработки архивных GPS-наблюдений (репроцессинга), выполненной в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины для периода наблюдений с 7 декабря 1997 г. по 4 ноября 2006 г. (464 GPS-недели) для 31 GPS-станции, расположенных на территории Восточной Европы (12 из которых — на территории Украины). Впервые получены однородные координатные ряды в системе координат IGS05 и значения зенитной тропосферной рефракции для этих станций для GPS-недель 935—1399, лишённые эффектов, приносимых изменениями в методиках обработки, моделях, априорных данных и программном обеспечении.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с GPS-недели 1400 (5 ноября 2006 г.), IGS ввело новые модели и методики обработки ГНСС-наблюдений. Рекомендовано использовать абсолютные модели вариаций фазовых центров комбинаций антенна-купол вместо относительных, модель океанической нагрузки FES2004 вместо GOT00.2_PP и т. д. С этого же момента все продукты IGS, включая комбинированные точные эфемериды ГНСС-спутников, координаты и скорости перманентных ГНСС-станций, выражаются в системе координат IGS05 (IGS-реализация системы координат ITRF2005).

Изменения методик обработки, моделей, априорных данных и программного обеспечения привели к несогласованности координатных рядов перманентных ГНСС-станций, полученных до и после 5 ноября 2006 г.

В 2008 г. IGS начала кампанию репроцессинга, которая была направлена на улучшение орбит GPS-спутников [13]. Наличие точных эфемерид в системе координат IGS05 позволило организовать репроцессинг архивных данных GPS-наблюдений в Центре анализа ГАО НАН Украины. Для репроцессинга использовались рекомендации Центрального Бюро Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN), вступившие в

силу с GPS-недели 1400 [http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.php].

Цель представленного репроцессинга — получить согласованные координатные ряды и значения зенитной тропосферной рефракции для восточноевропейских GPS-станций. Решение данной проблемы позволит уточнить результаты в следующих направлениях: определение параметров вращения Земли, исследование деформации земной коры и атмосферы планеты, уточнение земной системы координат, которая задается координатами и скоростями ГНСС-станций и т. д.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕПРОЦЕССИНГ НАБЛЮДЕНИЙ

В Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины выполнен репроцессинг наблюдений GPS-спутников для GPS-недель 935—1399 (с 7 декабря 1997 г. по 4 ноября 2006 г.). Репроцессинг выполнен для 31 восточноевропейской GPS-станции, 12 из которых — на территории Украины. Список GPS-станций приведен в табл. 1, а их географическое расположение — на рис. 1. Для получения решения использовался программный комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» [3], разработанный в Астрономическом институте Бернского университета, Швейцария. Данный программный комплекс позволяет об-

рабатывать как кодовые, так и фазовые наблюдения ГНСС-спутников на пунктах локального, регионального и глобального масштабов. С помощью модуля «Bernese Processing Engine», который входит в «Bernese GPS Software ver. 5.0», стало возможным выполнять автоматизированную обработку сетей, состоящих из большого количества перманентных ГНСС-станций.

В результате обработки доступны координаты станций с высокой точностью, параметры орбит

спутников, поправки к часам спутников и приемников, параметры тропосферной и ионосферной рефракции и т. д.

Для выполнения репроцессинга были использованы 30-секундные файлы наблюдений GPS-спутников в формате RINEX. Данные наблюдений для украинских станций доступны на ftp-сервере ГАО НАН Украины (ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gnss/data/CRINEX_30s/). Решение обозначено как *MAI*.

Использовались комбинированные точные эфемериды GPS-спутников и параметры вращения Земли, которые были рассчитаны в рамках кампании репроцессинга *IGS Repro 1* [13].

Абсолютные калибровки фазовых центров комбинаций «антенна — купол» были взяты из стандартного файла в формате ANTEX [http://www.iers.org/products/2/11428/orig/message_071.txt], который рекомендовано использовать IGS при обработке ГНСС-наблюдений.

Океанические нагрузки для станций были рассчитаны по модели FES2004 [6].

Использовалась гравитационная модель JGM3 и эфемериды Солнца и Луны DE2000 [12], предоставленные Лабораторией реактивного движения JPL, США.

При использовании поправок к показателям часов GPS-спутников использовались оценки разностей кодовых наблюдений. Оценки пред-

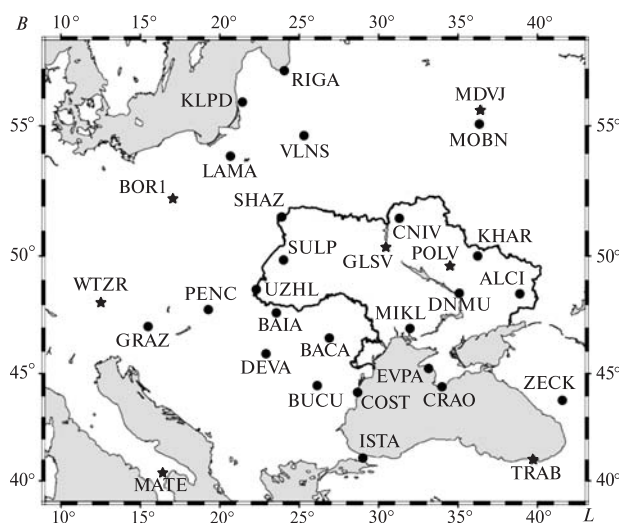


Рис. 1. Расположение GPS-станций

Таблица 1. Список перманентных GPS-станций за период наблюдений GPS-недель 935—1399

Станция	Страна	Идентификатор	Номер DOMEС	Международные сети	Приемник	Антенна	Купол	Примечание
Киев/Голосиив	Украина	GLSV	12356M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Симеиз	Украина	CRAO	12337M002	IGS, MGN	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T	SCIS	
Евпатория	Украина	EVPA	12344M001	EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Харьков	Украина	KHAR	12314M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Николаев	Украина	MIKL	12335M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	
Полтава	Украина	POLV	12336M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4700	TRM29659.00	NONE	
Львов	Украина	SULP	12366M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4700	TRM33429.20+GPRM41249.00	NONE NONE	до 10.06.2001 с 13.10.2001
Ужгород	Украина	USHL	12301M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Чернигов	Украина	CNIV	15501M001	EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Алчевск	Украина	ALCI	12371S001		TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	
Шацк	Украина	SHAZ	12370M001		TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	

Продолжение табл. 1

Станция	Страна	Идентификатор	Номер DOMEC	Международные сети	Приемник	Антенна	Купол	Примечание
Днепропетровск	Украина	DNMU	12369M001		TRIMBLE 7400MSI	TRM14532.00	NONE	
Зеленчукская	Россия	ZECK	12351M001	EPN, IGS	ROGUE SNR-8000 AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T AOAD/M_T	NONE NONE	до 12.07.2001 с 12.07.2001 до 18.10.2005 с 30.07.2006
Менделеево	Россия	MDVJ	12309M005	EPN, IGS	ASHTeck Z-XII3 JPS LEGACY	ASH700936D_M JPSREGANT_DD_E	SNOW NONE	
Обнинск	Россия	MOBN	12365M001	IGS	ASHTeck Z-XII3	ASH701945C_M	SCIS	
Боровец	Польша	BOR1	12205M002	EPN, IGS	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T	NONE	
Ольштын	Польша	LAMA	12209M001	EPN, IGS	ROGUE SNR-8000 ASHTeck Z-XII3	AOAD/M_T ASH700936F_C	NONE SNOW	до 25.04.1998 с 26.04.1998
Трабзон	Турция	TRAB	20808M001	EPN, IGS	ASHTeck Z-XII3	ASH700936D_M	SNOW	
Стамбул	Турция	ISTA	20807M001	EPN, IGS	ASHTeck Z-XII3	ASH700936D_M	SNOW	
Бухарест	Румыния	BUCU	11401M001	EPN, IGS	ASHTeck Z-XII3	ASH700936D_M	SNOW	
Констанца	Румыния	COST	11407M001	EPN	ASHTeck Z-X	ASH700936B_M	NONE	
Бакэу	Румыния	BACA	11405M001	EPN	LEICA RX1200PRO	LEIAT504	LEIS	
Байя-Маре	Румыния	BAIA	11406M001	EPN	LEICA RX1200PRO	LEIAT504	LEIS	
Дева	Румыния	DEVA	11408M001	EPN	LEICA RX1200PRO	LEIAT504	LEIS	
Грац	Австрия	GRAZ	11001M002	EPN, IGS, ECGN	ROGUE SNR-8000 AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T AOAD/M_T	NONE NONE	до 10.05.2000 с 05.10.2000 до 01.07.2000 с 01.07.2000 до 29.04.2001 с 29.04.2001 до 17.03.2005 с 17.03.2005 до 22.03.2005 с 22.03.2005
Пенц	Венгрия	PENC	11206M006	EPN, IGS	ROGUE SNR-8000 AOA SNR-8000 ACT	ASH701945C_M ASH701945C_M	NONE NONE	до 20.05.2003 с 22.05.2003
Вильнюс	Литва	VLNS	10801M001	EPN, ECGN	ASHTeck Z-XII3	ASH700936A_M	NONE	
Рига	Латвия	RIGA	12302M002	EPN, IGS, ECGN	ROGUE SNR-8000 AOA BENCHMARK ACT	ASH700936D_M AOAD/M_T	NONE NONE	до 13.01.2005 с 13.01.2005 до 20.05.2006 с 22.05.2006 до 17.06.2006 с 18.06.2006
Матера	Италия	MATE	12734M008	EPN, IGS, TOS	ROGUE SNR-8000 TRIMBLE 4000SSI	ASH700936D_M TRM29659.00	NONE NONE	до 08.06.1999 с 18.06.1999
Ветцель	Германия	WTZR	14201M010	EPN, IGS, TOS, ECGN	ROGUE SNR-8000 AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T	NONE	до 17.06.1999 с 17.06.1999

ставлены в виде DCB-файлов, которые являются продуктом Центра анализа CODE [5].

Координаты и скорости априорных станций на эпоху 2000.0, задававшие систему координат, взяты из каталога IGS05. В табл. 2 приведены значения координат и скоростей для GPS-станций GLSV, POLV, BOR1, MDVJ, MATE, TRAB и WTZR.

Для моделирования значений зенитной тропосферной рефракции использовалась априорная модель Саастамойнена [10].

Использовалась глобальная модель ионосферы на каждые сутки, представленная Центром анализа CODE [11].

Для учета нутации и прецессии использовалась модель IAU2000 [7], рекомендованная IERS. Модель включает в себя коэффициенты для солнечно-лунных и планетных нутаций, а также их аргументы.

Процесс получения решения для отдельной GPS-недели можно разделить на несколько эта-

пов. Схема этапов обработки представлена в работе [1]:

- 1) предварительная обработка суточных сессий наблюдений;
- 2) получение оценок координат для отдельных суток наблюдений;
- 3) получение оценок координат для отдельной недели;
- 4) получение финальных значений зенитной тропосферной рефракции для GPS-станций.

На этапе предварительной обработки сначала выполнялась проверка качества наблюдений на уровне RINEX-файлов и преобразование данных во внутренние форматы программного комплекса. С помощью программы PRETAB выполнялось преобразование точных эфемерид GPS-спутников с земной системы координат в небесную и интегрирование (программа ORBGEN), в результате чего были получены так называемые табличные орбиты. Файлы стандартных орбит создавались с помощью интегрирования движения GPS-спутников.

С помощью программы RNXGRA с RINEX-файлов данных наблюдений собиралась информация о количестве и качестве наблюдений для каждой GPS-станции. В соответствии с установленными параметрами станции, наблюдения на которых не соответствовали минимальным установленным критериям, исключались из дальнейшей обработки. На следующем этапе выполнялось объединение нескольких файлов с координатами/скоростями в один полный набор координат/скоростей с возможностью добавления новых станций с помощью программы CRDMERGE. Программа NUVELO вычисляла скорости станций с учетом модели движения тектонических плит, используя модель NNR-NUVEL-1A [2], согласно рекомендациям собрания IERS2004. После получения новых значений скоростей движения GPS-станций снова выполнялась программа CRGMERGE. На следующем шаге выполнялось вычисление координат на эпоху середины дня наблюдений с помощью соответствующих значений скоростей для станции, которые были получены ранее. После этого высчитывались поправки к часам на приемниках, расположенных на GPS-станциях (програм-

Таблица 2. Априорные координаты и скорости GPS-станций (система координат IGS05, эпоха 2000.0)

Станция	Координата, м		Скорости, м/год	
	X		V_x	
	Y		V_y	
	Z		V_z	
GLSV	3512889.0509		-0.0194	
	2068979.8074		0.0083	
	4888903.1612		0.0083	
POLV	3411557.4503		-0.0211	
	2348463.9223		0.0129	
	4834396.8425		0.0076	
BOR1	3738358.5380		-0.0157	
	1148173.6323		0.0156	
	5021815.7236		0.0095	
MDVJ	2845456.1887		-0.0211	
	2160954.1827		0.0128	
	5265993.1839		0.0090	
MATE	4641949.6466		-0.0179	
	1393049.3344		0.0188	
	4133287.3864		0.0155	
TRAB	3705250.4858		-0.0230	
	3084421.6286		0.0135	
	4162044.7216		0.0104	
WTZR	4075580.5290		-0.0151	
	931853.7115		0.0173	
	4801568.0771		0.0114	

ма CODSP). Предварительная обработка фазовых наблюдений позволяла определить моменты скачков фаз. Далее выполнялась маркировка наблюдений с короткими интервалами наблюдений спутников с углом места менее 3° . Кроме этого, исключались из обработки станции с большим количеством плохих наблюдений (программа MAUPRP). На следующем этапе обработки с помощью программы GPSEST было получено решение с действительными значениями фазовой неоднозначности с помощью линейной комбинации LC3 [4, 11]. Наряду с этим выполнялась оценка параметров тропосферы. Для задания априорной модели Саастамойнена использовалась опция DRY_NIELL [9] и функция наклона $\text{nmf}h2.0$ для приведения к зениту. Для задания функции наклона для параметра зенитной тропосферной рефракции, который оценивался, использовалась опция WET_NIELL. Для оценки горизонтального тропосферного градиента задавалась опция TILTING. Фиксирование фазовых неоднозначностей выполнялось с помощью методики QIF [8]. Для уменьшения влияния ионосферы использовалась детерминированная модель ионосферы, основанная на разложении общего содержания электронов в ряд по сферическим гармоникам в зависимости от географической широты и часового угла Солнца.

Далее выполнялась обработка наблюдений с фиксированными фазовыми неоднозначностями с целью получения нормальных уравнений. Зенитная тропосферная рефракция была оценена с использованием априорной модели и опций наклона. С помощью программы ADDNEQ создавались файлы нормальных уравнений. На координаты станций GLSV, POLV, MDVJ, BOR1, TRAB, MATE и WTZR накладывалось условие «No-net translation». Параметры преобразования Гельмерта (только смещение) между системой координат, которая задавалась оцененными координатами референчных станций, и системой координат, которая задавалась координатами референчных станций из каталога IGS05, должны равняться нулю в пределах погрешности. Проверка выполнялась программой HELMR1. Если остатки после преобразования для любой компоненты координат любой референчной

станции превышали заданные максимальные значения, то эта станция исключалась из списка референчных станций для этой эпохи и выполнялось повторное уравнивание с использованием нового набора референчных станций (программа ADDNEQ2). Финальное уравнивание позволило получить оценки координат для суточных решений и нормальные уравнения, которые сохранились в формате SINEX. После того как было получено решение для всех дней недели, выполнялось уравнивание суточных файлов нормальных уравнений с помощью программы ADDNEQ2. Задание системы координат и проверка оценки координат референчных станций выполнялись так же, как и для суточного решения с помощью программы HELMR1. Сохранялся итоговый файл для недельного решения в формате SINEX.

На последнем этапе выполнялась финальная оценка зенитной тропосферной рефракции отдельно для каждого суток для каждой GPS-станции с помощью программы ADDNEQ2. При этом фиксировались координаты всех станций, которые были получены на третьем шаге. Сохранялся финальный файл оценки параметров тропосферы в формате TROPX.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполненной обработки архивных наблюдений GPS-наблюдений в Центре анализа ГНСС-данных получены однородные координатные ряды и значения зенитной тропосферной рефракции GPS-станций для GPS-недель 935—1399. В качестве примера в табл. 3 приведены значения полученных координат для GPS-недель 1090, 1206 и 1399 для 12 украинских перманентных станций в системе координат IGS05. Полученные файлы решения *MA1* для 31 GPS-станции в форматах SINEX и TROPX размещены на ftp-сервере ГАО НАН Украины (<ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gnss/products/IGS05/>). В качестве примера на рис. 2 приведены графики изменения широты, долготы, высоты и зенитной тропосферной рефракции для станций в середине (ГНСС-станция EVPA) и на краю сети (ГНСС-станция CRAO). Графики для остальных украинских ГНСС-станций, для которых было

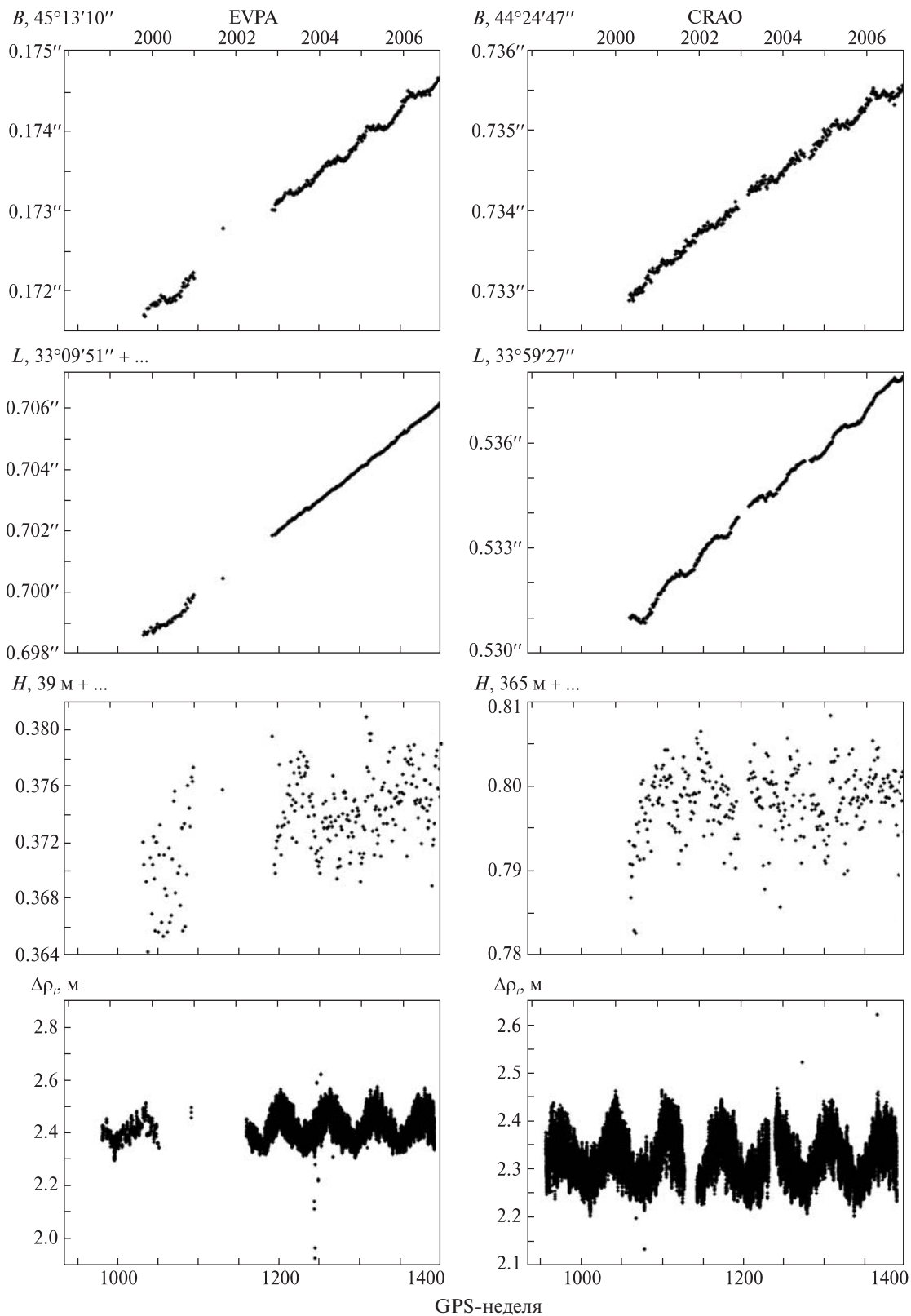


Рис. 2. Значения изменений широты, долготы, высоты и зенитной тропосферной рефракции для ГНСС-станций EVPA и CRAO

Таблица 3. Значения координат для GPS-недель 1090, 1206 и 1399 в системе координат IGS05 для украинских GPS-станций

Станция	GPS-неделя 1090	GPS-неделя 1206	GPS-неделя 1399
	X, м Y, м Z, м	X, м Y, м Z, м	X, м Y, м Z, м
GLSV	3512889.0312 2068979.8198 4888903.1675	3512888.9916 2068979.8515 4888903.1864	3512888.9164 2068979.9021 4888903.2181
UZHL	3907587.5306 1602428.6298 4763783.7234	3907587.4846 1602428.6656 4763783.7388	3907587.4231 1602428.7224 4763783.7753
CRAO	3783897.1927 2551404.3540 4441264.2434	3783897.1415 2551404.3933 4441264.2657	3783897.0719 2551404.4460 4441264.2960
EVPA	3767253.5716 2461876.2871 4504591.7577	3767253.5237 2461876.3201 4504591.7798	3767253.4523 2461876.3777 4504591.8160
POLV		3411557.3830 2348463.9655 4834396.8690	3411557.3074 2348464.0129 4834396.9000
KHAR		3312984.3590 2428203.4091 4863307.8070	3312984.2903 2428203.4624 4863307.8359
MIKL		3698554.0218 2308675.9765 4639769.4760	3698553.9493 2308676.0304 4639769.5066
SULP		3765297.0246 1677559.1766 4851297.3886	3765296.9567 1677559.2308 4851297.4224
ALCI			3297847.8933 2661607.4363 4750829.8351
CNIV			3397785.1825 2066990.5707 4969811.5963
DNMU			3468976.8727 2434669.3590 4750720.1331
SHAZ			3631977.9598 1609614.5120 4973373.0815

получено решение *MA1*, размещены на сайте Украинской перманентной ГНСС-сети (<http://gnss.mao.kiev.ua/>).

Подводя итог, можно сказать, что полученные однородные координатные ряды позволяют получить более точную координатную реализацию ITRF на территории Украины.

Ознакомиться с результатами для украинских станций (на графиках представлены изменения широты, долготы, высоты и зенитной тропосферной рефракции) можно на web-страничке Украинской перманентной сети (<http://gnss.mao.kiev.ua/>) в разделе «Центр аналізу ГНСС-даних».

1. *Хода О. А.* Обработка эталонной тестовой кампании EPN в центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 4. — С. 59—65.
2. *Argus D., Gordon R.* No-net rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model Nuvel-1 // Geophys. Res. Lett. — 1991. — **18**. — P. 2038—2042.
3. *Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M.* Bernese GPS Software version 5.0. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2007. — 612 p.
4. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Walse E.* GNSS — Global Navigation Satellite System. — New York: Springer, Wien, 2008. — 343 p.
5. *Jefferson D., Heflin D., Muellerschoen R.* Examining the C1-P1 pseudorange bias // GPS Solutions N 4(4). — 2001. — P. 25—30.
6. *Lyard F., Lefvre F., Letellier T., Francis O.* Modeling the global ocean tides: a modern insight from FES2004 // Ocean Dynamics N 56. — 2006. — P. 394—415.
7. *McCarthy D., Petit G.* IERS Conventions // IERS Technical Note 32. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main. — 2004.
8. *Mervart L.* Ambiguity resolution techniques in geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System // Geodätisch geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 53, Schweizerische Geodätische Kommission, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich, Zürich. — 1995. — 155 p.
9. *Niell A.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // J. Geophys. Res. — 1996. — N 101. — P. 3227—3246.
10. *Saastamoinen J.* Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // The use of artificial satellites for Geodesy, Vol. 15 of Geophysics Monogram Series, AGU. — 1972. — P. 244—251.
11. *Schaer S.* Stochastische Ionosphärenmodellierung beim Rapid Static Positioning GPS // Diplomarbeit, Astronomisches Institut, Universität Bern, Switzerland. — 1994.
12. *Standish E.* The Observational basis for JPL's DE200, the planetary ephemerides of the astronomical almanac // Astron. and Astrophys. — 1990. — N 233 (1). — P. 252—271.
13. *Steigenberg P., Rothacher M., Fritsche M., Rulke A., Dietrich R.* Quality of reprocessed GPS satellite orbits // J. Geodesy. — 2009. — **83**, N 3-4. — P. 241—248.

Стаття надійшла до редакції 12.05.14

М. В. Ищенко

РЕПРОЦЕСИНГ GPS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ
НА ПЕРМАНЕНТНИХ СТАНЦІЯХ РЕГІОНАЛЬНОЇ
МЕРЕЖІ ДЛЯ GPS-ТИЖНІВ 935—1399

Наведено результати репроцесингу архівних GPS-спостережень, який виконано в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України для періоду спостережень з 7 грудня 1997 р. до 4 листопада 2006 р. (464 GPS-тижні) для 31 GPS-станцій, розташованих на території Східної Європи (12 з яких — на території України). Вперше отримано однорідні координатні ряди в системі координат IGS05 і значення зенітної тропосферної рефракції для GPS-тижнів 935—1399, що вільні від ефектів, привнесених змінами в методиках обробки, моделях, апіорних даних та програмному забезпеченні.

M. V. Ishchenko

REPROCESSING OF GPS OBSERVATIONS
AT PERMANENT STATIONS OF THE REGIONAL
NETWORK FOR GPS WEEKS 935—1399

We present our results of reprocessing of archival GPS observations which was performed at the GNSS data analysis centre of the MAO NAS of Ukraine for the observation period from 12 December 1997 to 4 November 2006 (464 GPS weeks) for 31 GPS stations located in the Eastern Europe (12 of them are located on the territory of Ukraine). Homogeneous coordinate solution in the IGS05 reference frame and values of zenith tropospheric refraction for the GPS weeks 935—1399 which are free from effects caused by changes in processing procedures, models, a priori data, and software are obtained for the first time.

В. В. Донец¹, А. А. Броварец², В. В. Бровченко¹

¹ Корпорація «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ

² Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛЕВОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Представлен анализ особенностей полевой спектральной аппаратуры, созданной начиная с 1930-х гг. для исследования земной поверхности и наземных объектов, а также для подспутниковой валидации спектрометрических данных. Достижения передовых технологий, которые были разработаны и апробированы в полевых спектрометрах, были и будут в дальнейшем внедрены в ряд бортовых спектрометров разного применения.

ВСТУПЛЕНИЕ

Спектральную отражательную способность земной поверхности, ее покрытия, в том числе лесов и полей, в СССР начал Е. Л. Кринов [8–11] еще в 1930-е гг. Для спектрографирования природных образований использовались полевые спектрографы [11]: кварцевый спектрограф А. Хилгера, стеклянный спектрограф НИЛ, стеклянный спектрограф ЦНИИГАиК и двухпризменный спектрограф ЦНИИГАиК для инфракрасной области спектра. На одной фотографической пластинке 3×6.5 см при ширине спектрограмм в 1 мм могло помещаться до 11 спектрограмм.

При спектрографировании горизонтально расположенных поверхностей спектрограф, укрепленный на штативе, направлялся на поверхность вертикально (в надир) или же под углом 45° и азимуте 90° относительно Солнца. При таких условиях имело место наименьшее влияние зеркального отражения тех образований, которые им вообще обладали. Эталонная поверхность располагалась горизонтально. Спектрограф направлялся на эталонную поверхность под тем же углом и в том же азимуте, как и при спектрографировании изучаемого образования.

В качестве эталонной поверхности использовалась гипсовая пластинка [11]. Она имела размеры 10×10 см и толщину 1 см. Эта пластинка была приготовлена из химически чистого гипса

с 10 % содержанием порошка магнезии (карбоната магния — MgCO_3). Лишь с 1937 г. стала применяться баритовая бумага, представляющая собой подложку фотографической бромосеребряной бумаги [11], покрытой несколькими слоями желатина с серноокислым барием BaSO_4 .

ПОЛЕВОЙ СПЕКТРОГРАФ

В 1956 г. по заданию Лаборатории аэрофотометодов МГУ мастерскими ЛИТМО был изготовлен летный спектрограф ЛС-2 [5]. Он предназначался как для наземной работы в полевых условиях, так и с воздуха — с самолета или вертолета. В наземных условиях этот прибор работает от аккумуляторов, а в самолете питается от бортовой сети. В полевом варианте прибора имеется специальный штатив с градуированной головкой, обеспечивающей поворот спектрографа вокруг вертикальной оси на 360° и наклон от 0 до 90° (рис. 1).

Спектрограф ЛС-2 — двухканальный: один из каналов обеспечивает дисперсию в диапазоне 420–630 нм, другой — 620–800 нм. Отличие каналов (как видно из рис. 2) — только в угле разворота спектральных призм.

Фотографирование обеих частей спектра производится одновременно на две различные фотопленки. Диспергирующими системами служат стеклянные призмы.

Спектрограф состоит из камеры 1 и съемной кассеты 2 (рис. 3). В камере 1 расположены вход-



Рис. 1. Подспутниковые наблюдения с полевым спектрометром ЛС-2 на высокогорном полигоне (Терскол, Приэльбрусье, 1979 г.)

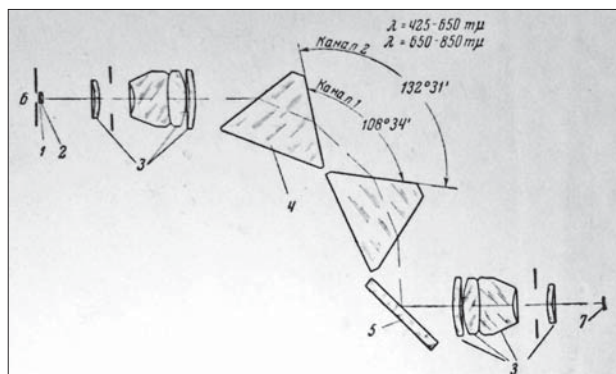


Рис. 2. Оптическая схема спектрографа ЛС-2 [5]

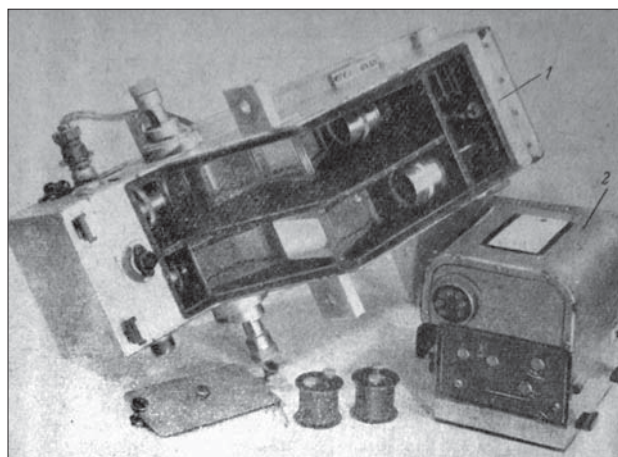


Рис. 3. Спектрограф ЛС-2 (видны оба канала) [5]

ные щели, затвор и вся оптическая часть прибора. В кассете 2 расположены два светонепроницаемых пенала, куда заряжаются фотопленки шириной в 35 мм, длиной до 2 м, на которых помещается по 140 спектрограмм.

Прибор работает полуавтоматически с включением от руки для единичных кадров и автоматически от командного прибора — при непрерывном спектрографировании. Первый способ используется при наземных работах, второй — в воздухе.

РАННИЕ ПОЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ

После запуска на орбиту в 1972 г. спутника «Landsat-1» (США) с установленной на его борту аппаратурой MSS (Multispectral Scanner System), которая позволяла вести съемку в четырех спектральных диапазонах, ширина каждого из которых составляла около 100 нм [16], стал вопрос о наземной заверке его результатов измерений.

Для этих целей были созданы полевые спектральные приборы. Первым из них был спектро-радиометр «Exotech» модели 20-B [32], изготовлен в 1973 г. фирмой «Exotech Inc». Этот прибор измеряет интенсивность падающего и отраженного излучения в спектральном диапазоне от 0.37 до 2.52 мкм и интенсивность излучения в спектральном диапазоне от 2.76 до 13.88 мкм.

В полевых условиях периодическую калибровку спектро-радиометров «Exotech» моделей 20-B и 20-C проводили, используя стандартизованную пластину, окрашенную сульфатом бария (BaSO_4) [46] с известными отражательными свойствами.

Полевые спектрометры могут быть выполнены как на основе спектральных систем с дифракционными решетками или спектральными диспергирующими призмами, так и на основе узкополосных интерференционных фильтров. Так, в работе [40] описан многополосный фильтровый полевой спектро-радиометр, который позволяет одновременно регистрировать аналоговые сигналы, пропорциональные яркости исследуемой сцены в восьми спектральных диапазонах. Прибор устанавливается на поворотной подъемной штанге, штативе, в вертолете или небольшом самолете.

Спектрорадиометр имеет стандартный набор (семь) спектральных диапазонов, которые соответствуют полосам мультиспектрального сканера «Марпер», запущенного в 1981 г. Положение исследуемых спектральных полос спектрорадиометра и сканера показано на рис. 4.

Конструкция фильтров выполнена прочной и защищенной для работы в полевых условиях при температуре от 0 до 60 °С и повышенной влажности.

Для регистрации коэффициентов спектрального отражения в неразрывном спектральном диапазоне в полевых условиях был создан спектрорадиометр «Exotech 20C-SW» (рис. 5) [20, 45]. В нем используются четыре круговые переменные по длине волны фильтра с двумя модулями детекторов (кремниевым и на основе сульфида свинца PbS (рис. 5, б). Рабочий диапазон длин волн прибора: 0.4–2.4 мкм. Спектральное разрешение $\delta\lambda/\lambda = 0.02$ –0.03. Так, на $\lambda = 2200$ нм $\delta\lambda = 44$ нм, что является слишком низким для практической полевой спектроскопии.

ПОРТАТИВНЫЕ ПОЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ ОТРАЖЕНИЯ JPL NASA

Портативный спектрометр PFRS. Хотя в мультиспектральных дистанционных исследованиях поверхности Земли (особенно на их начальной стадии в 1970-х гг.) доминирует низкая спектральная разрешающая способность измерений, все время возникал постоянный интерес к измерениям с более высоким спектральным разрешением, особенно в полевых условиях. К 1974 г. А. Гетц [45] был ведущим исследователем первого мультиспектрального сканера MSS, установленного на спутнике «Landsat-1». Обработка спектральных результатов изображений со сканера MSS показала тонкие изменения в почве на плато Сосопино к югу от Гранд-Каньон, которые не могли быть замечены на земле. Эти минералогические изменения в богатой железом почве были видны четче с помощью MSS в четвертой зоне — в ближней спектральной области (NIR), т. е. только за пределами видимого «красного края». Это привело к необходимости создания портативного полевого спектрометра отражения PFRS в лаборатории JPL NASA.

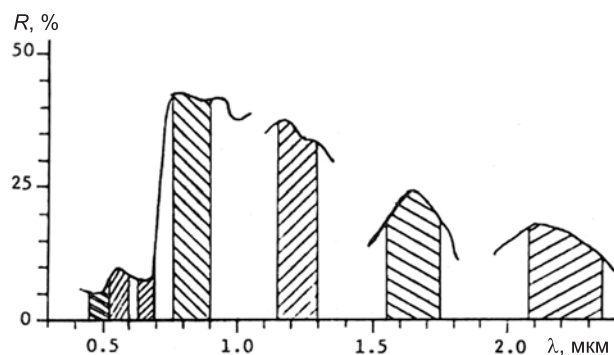
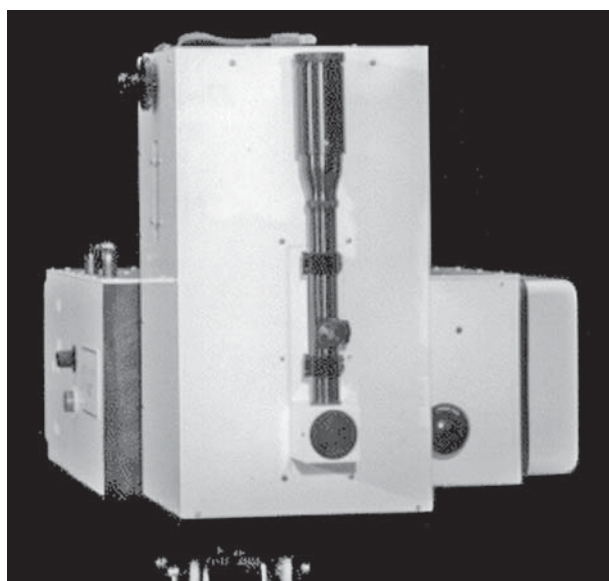
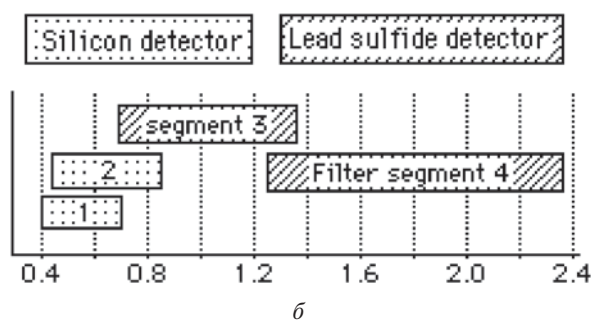


Рис. 4. Спектральное распределение полосы пропускания накладывается на типичный спектр растительности [40]



а



б

Рис. 5. Спектрорадиометр «Exotech 20C-SW» [20]: внешний вид (а) и перекрытие рабочего диапазона 0.4–2.4 мкм (б)

Портативный полевой спектрометр отражения PFRS (Portable Field Reflectance Spectrometer) был разработан Абрамсом и А. Гетцом в 1974 г. [19, 27, 28, 37] и предназначался для наземного уточнения результатов дистанционных исследований Земли.

Этот прибор регистрирует спектральный коэффициент отражения естественной поверхности (по отношению к спектральному коэффициенту отражения стандартной поверхности) в диапазоне длин волн от 0.45 до 2.5 мкм с умеренным разрешением ($\Delta\lambda/\lambda = 0.04$ от 0.45 до 0.7 мкм и $\Delta\lambda/\lambda = 0.015$ от 0.7 до 2.5 мкм), используя Солнце в качестве источника света. Каждый спектр регистрировался в течение 30 с.

Прибор PFRS содержит оптическую головку, установленную на штативе, и электронный блок в рюкзаке. В оптической головке расположены входная оптика, вращающиеся круговые переменные по длинам волн фильтры и охлаждаемый детектор — фоторезистор (ФР) на основе сульфида свинца PbS.

В то время микропроцессоры были еще недоступны. Поэтому электронный блок PFRS не имел возможности мгновенного отображения результатов для анализа, но имел возможность с помощью АЦП преобразовывать аналоговый сигнал от ФР в цифровой и записывать его для последующего анализа на компактные цифровые кассеты (около 200 спектров в день). Полученные таким образом данные в дальнейшем дополнительно обрабатывались с помощью программируемого цифрового компьютера. Недостаток всей этой системы PFRS — невозможность идентификации минералов на месте, что создавало проблемы при сопоставлении данных.

В качестве эталонного образца сравнения использовался Fiberfrax — белый керамический материал, который легко очищался и позволял создать чистые диффузно отражающие поверхности в рабочей спектральной области [45].

Портативный полевой спектрометр PIDAS. Для того чтобы уменьшить время сбора данных при полевых измерениях, в Jet Propulsion Laboratory (JPL) NASA в 1984 г. был разработан портативный быстродействующий полевой спектрометр отображения и анализа PIDAS (Por-

table Instant Display and Analysis Spectrometer) [2, 26, 38, 45], в основу которого легла компактная конструкция прибора с составными дифракционными решетками в виде вращающихся дисков, успешно примененная разработчиками гиперспектрометров AIS-1 и AIS-2 [2].

Несмотря на использование имеющихся на то время передовых технологий, созданный прибор весил 31 кг, что вызывало трудности работы с ним.

Полевой спектрометр PIDAS имел три составных дифракционных спектрометра, помещенных в сосуд с инертным газом. В качестве охлаждаемых фотоприемных устройств использовались: 512-элементный линейный кремниевый фотоприемник в сочетании с двумя 36-, а затем 45-элементными фотоприемными линейными массивами на основе сульфида цинка (PbS), обеспечивающими считывание за несколько секунд в 872 точках в пределах общего рабочего спектрального диапазона от 400 до 2500 нм со спектральным разрешением $\delta\lambda = 4.7$ нм. Ручной дисплей с ЖК-экраном позволял отображать текущий спектр и накладывать его на другие. В памяти прибора может обрабатываться и храниться до 288 спектров (128 постоянно хранятся в библиотеке спектров).

В полевом спектрометре PIDAS впервые использовались не только цифровое отображение спектров отражения на ЖК-экране в режиме реального времени, а и волоконно-оптический ввод в составные спектрометры прибора оптического сигнала от исследуемой зоны (используя уникальные оптические волокна на основе фторидов).

Полевые приборы для измерения отражения могут быть переносными, устанавливаться на треногах, кронштейнах, в ранцах и др. специальных подвесках, даже на велосипедах («Рефлектокар» лаборатории JPL NASA) [36, 37].

Полевой спектрофотометр СПА-1. В Агрофизическом институте (г. Санкт-Петербург, Россия) в 1983 г. был изготовлен полевой автоматический спектрофотометр СПА-1, разработанный в Лаборатории аэрометодов (Р. Л. Кирмалов с соавторами) производственного геологического объединения «Аэрогеология» [7, 14].

Этот прибор предназначен для автоматического измерения в полевых условиях коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) природных объектов в естественном и поляризованном свете, углового распределения поля отражения, а также спектральных контрастов между объектами.

Спектрофотометр СПА-1 построен по двухлучевой схеме [14] (рис. 6), на выходе которого индицируются непосредственно величины КСЯ исследуемого объекта относительно эталона I — белой баритовой бумаги (которая с точностью до множителя 0.85 может рассматриваться как идеальный рассеиватель) последовательно в фиксированных узких спектральных зонах.

Оптическая система прибора имеет два выходных коллиматора 8 для приема лучистых потоков соответственно от объекта и эталона 1 и один выходной коллиматор 12.

Излучение, отраженное от объекта исследования и эталона 1, проходит поляризатор 2, защитное стекло 3 и направляется с помощью зеркал 4 через анализаторы 5, входные спектральные щели 6, диафрагмы 7 и коллиматоры 8 на сканирующее зеркало 9, которое вращается вокруг оси 10, переключая каналы и обеспечивает прохождение спектра путем изменения угла падения светового потока (параллельного после коллиматоров 8) на дифракционную решетку 11. Дифрагированное излучение проходит объектив 12 и попадает на плоскость выходных щелей 13, которые выделяют два монохроматических потока излучения с центрами на определенных длинах волн λ_1 и λ_2 . Далее оба эти излучения проходят через светофильтры 14 для отрезания спектров высших порядков и с помощью световодов 15 попадают на вход фотоприемников 16. Фотоприемниками 16 служат фотоэлектронные умножители ФЭУ-51 (для области спектра 0.4—0.6 мкм) и ФЭУ-62 (для области спектра 0.6—0.9 мкм).

Для измерения КСЯ в поляризованном свете оба канала прибора снабжены съемными поляроидами (поляризатором 2 и анализатором 5), плоскость поляризации которых может быть ориентирована в трех фиксированных положениях: (0, 60 и 120°).

Основные технические параметры прибора СПА-1 [7, 14] приведены в сравнительной таблице.

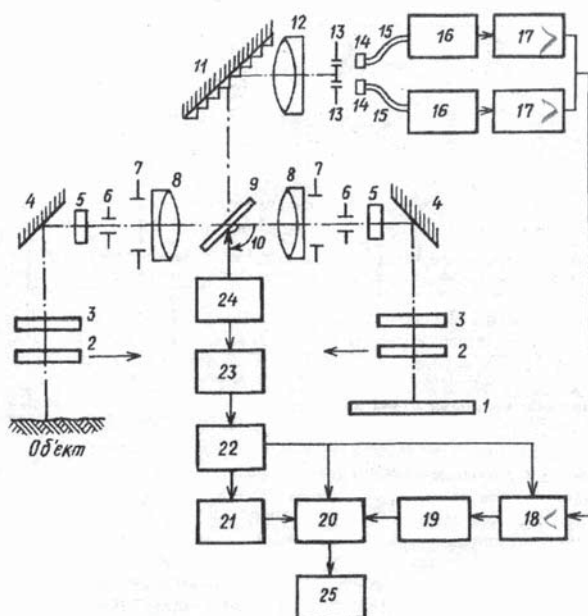


Рис. 6. Блок-схема спектрофотометр СПА-1 (пояснение в тексте) [14]

Спектрорадиометр с рабочим диапазоном в интервале длин волн 400—1900 нм был создан в Японии [42] в 1987 г. для сбора данных об отражательных свойствах посевов риса. Измерительная система включает в себя два монохроматора на дифракционных решетках с детекторами, которые работают одновременно. За 22 с происходит сканирование в диапазонах 400—900 нм и 900—1900 нм. Пара кварцевых оптических волокон длиной 10 м (расположенных на длинном поворотном кронштейне) используется в качестве световода для облегчения полевых измерений. Эта система была использована для оценки спектральных факторов отражательной способности риса, оценке надземной общей сухой массы и урожая зерна.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ

В настоящее время лидирующие позиции по полевым спектрометрам занимает фирма ASD, США (Analytical Spectral Devices, Inc.), главным конструктором-исследователем которой является А. Гетц [29, 34, 45]. За время своего существования фирмы ASD (с 1990 г.), были созданы десятки конструкций спектрометрической ап-

паратуры различного назначения, в том числе и полевых [18, 21–23, 31], которые используются для измерений и исследований на всех континентах, в более чем 1000 научно-исследовательских учреждениях и более чем в 70 странах мира.

Последней серийной конструкцией полевого спектрального прибора является «FieldSpec-4» [18, 22, 28], который пришел на смену зарекомендовавшему себя его предшественнику — «FieldSpec-3» [21]. 4-я серия «FieldSpec» включает в себя три модели спектрорадиометров: «FieldSpec-4-Wide-Res», «FieldSpec-4-Standard-Res» и «FieldSpec-4-Hi-Res» с оптоволоконным кабелем для ввода исследуемого оптического сигнала. Все они имеют дополнительные входные устройства.

Спектрорадиометры «FieldSpec-3» и «FieldSpec-4» имеют по три составных датчика (полихроматора на дифракционных решетках с линейными массивами фотоприемников).

Схема с использованием трех датчиков, используемая в спектрорадиометрах ASD [21, 22], выбрана по причине получения лучших результатов и возможности выбора диапазона конечным пользователем. Все эти три датчика — отдельные спектрометры. Оптоволоконный кабель имеет оптоволоконные жгуты, каждый из которых непосредственно впаян в спектрометр.

В первом датчике используется неподвижная исправленная отражающая голографическая дифракционная решетка для области 350–1050 нм и 512-элементная кремниевая фотодиодная линейка с фильтром. Этим удалось оптимизировать интервал осуществления выборки, чувствительности и температурной стабильности в этой области длин волн. Во втором и третьем датчиках используются отражающие голографические дифракционные решетки, установленные с возможностью быстрого сканирования и «градиентные» InGaAs-фотодиоды с термоохладителями и блокирующими фильтрами. В приборах имеется внутренняя шторка на оптике и встроенная система автоматического исправления DriftLock® для диапазона 1000–2500 нм.

Блокирующие фильтры каждого из датчиков служат для отклонения второго и других высоких порядков дифрагированного света, также

для исключения рассеянного света, попадающего на элементы датчика.

Внутренние шторки и специальное программное обеспечение для сбора темнового значения тока в текущем измерении позволяет проводить автоматическое последующее его вычитание из сигнала. Аппаратные средства совместно с программным обеспечением позволяют автоматически отслеживать темновой ток непрерывно и автоматически исправлять погашения к сигналу, для минимизации эффекта долгосрочного температурного дрейфа.

Спектрорадиометры «FieldSpec» имеют армированный оптоволоконный кабель, исключаящий его повреждение в полевых условиях, все три модели имеют диапазон 350–2500 нм, уменьшенное в несколько раз соотношение сигнал/шум, одинаковое для всех моделей. Спектральное разрешение на $\lambda = 700$ нм у всех моделей составляет менее 3 нм, при $\lambda = 1400$ и 2100 нм — 10 нм. Имеется заплочный рюкзак для переноса спектрорадиометра. Все спектрорадиометры имеют в комплекте GPS-приемник.

Портативный прибор «FieldSpec-HandHeld-2» [23] тоже создан фирмой ASD. Он одинаково удобный для правой и левой руки. Компактный, прочный и легкий, весит 1.17 кг, включая батареи. Спектрорадиометр работает в диапазоне длин волн 325–1075 нм с точностью ± 1 нм и спектральным разрешением $\delta\lambda < 3$ нм при длине волны 700 нм. «FieldSpec-HandHeld-2» обеспечивает высокую производительность.

Современные полевые спектрорадиометры GER-1500 и GER-3700 разработала и выпускает фирма GER (Geophysical and Environmental Research Corporation, США). GER-1500 [17, 24] — легкий, высокопроизводительный полевой однолучевой спектрорадиометр. Прибор имеет быстрое сканирование и может быть использован как в автономном режиме, с сохранением до 500 отдельных сканирований в его памяти, так и через ноутбук, который обеспечивает обработку и отображения спектра в реальном масштабе времени. У него возможен вариант двухканального режима работы «поле — обзор неба» (DFOV). Для этого два спектрорадиометра должны быть установлены рядом друг с другом таким образом,

чтобы собирать информационные (от объекта) и эталонные (от неба) сканирования одновременно. Это позволяет оператору минимизировать влияние изменения атмосферных условий на данных. GER-1500 может записывать спектр излучения в диапазоне длин волн от 350 до 1050 нм на 512 каналах с полушириной каждого канала $\delta\lambda \leq 1.5$ нм. Поле зрения (FOV) прибора составляет $4^\circ - 8^\circ - 14^\circ$. Прибор имеет погрешности радиометрических измерений ± 5 , ± 4 и ± 5 % на длинах волн 400, 700 и 1000 нм соответственно.

Прибор GER-3700 [25, 41] — однолучевой полевой спектрорадиометр, обладающий высокой производительностью измерений в широкой области длин волн (350—2500 нм) и имеющий возможность точного позиционирования с помощью луча лазера. Он изготовлен в прочном, влагоустойчивом корпусе. Отраженное излучение раскладывается на спектральные составляющие и измеряется тремя детекторами. Первый детектор является кремниевым (Si) линейным массивом с 512 элементами. Два оставшихся детектора — линейные массивы на основе сульфида свинца (PbS) с 128 и 64 элементами соответственно.

Спектрорадиометр GER-3700 управляется с помощью ноутбука «Panasonic» с корпусом повышенной прочности. Спектры, отображаются на экране в режиме реального времени для немедленного интерпретации и оценки. Данные хранятся в формате ASCII для легкого переноса в другие программы.

Фирма SVC (Spectra Vista Corporation, США) разработала и выпускает современные полевые приборы [32, 44] нового поколения: SVC HR-512i SVC HR-768si и SVC HR-1024i, параметры которых приведены в таблице.

На фирме «Zeiss» (Германия) создана серия портативных полевых спектрометров «HandySpec» [30, 43]. Все они — двухканальные. Эта спектральная система специально разработана для измерения диффузного отражения растений и почвы. В качестве естественного источника света используется солнечный свет. Рабочий спектральный диапазон — от 250 до 2150 нм.

Первым прибором такого типа был портативный полевой двухлучевой спектрометр модели



Рис. 7. Портативная система «HandySpec» в рюкзаке [39]

tec5 AG фирмы «Zeiss» (Германия), разработанный специально для фермеров. Прибор выполнен на базе двух спектрометров «Zeiss-MMS-1» [43, 50] с единственной сенсорной головкой входной световодной каналами. Апертурный угол рабочего канала — 25° . Рабочий спектральный диапазон комплекса 360—1100 нм. Спектральное разрешение — 3.3 нм/пкл, (10 нм — по критерию Релея). Время экспозиции 4—6 мс. Объем памяти — 1 MB Flash (~200 измерений).

Полевые спектрометры серии tec5 также известны как спектральные приборы для разработки и производства тракторной системы Yara N — Sensor [47, 50] компанией Yara GmbH & Co.KG в Dülmen (см. ниже).

Портативная система HandySpec [30, 43] состоит из основного измерительного блока и головки датчика, которая соединена с основным блоком с помощью гибких оптических волокон. Головка датчика содержит два входных окна (на каждый из каналов) с принимающей оптикой. По первому каналу в измерительный блок передается световой поток, отраженный от земли,

Параметры полевых спектрометров и спектрорадиометров

Прибор, изготовитель	Спектрометр (спектрограф)	Конфигурация сенсора	$\lambda\lambda$, мкм	Кол-во каналов	Спектральное разрешение, нм (линейная дисперсия)	Тип фотоприемника, разрядность АЦП	Дополнительные данные
Кварцевый спектрограф А. Хилгера, СССР [11]	Кварцевый спектрограф А. Хилгера	Спектрограф			12 мм между линиями С (6562.81 нм) и Н (3968.47 нм)	Фотопленка	
Полевой спектрограф НИЛ, СССР [11]	Полевой спектрограф НИЛ	Спектрограф			15 мм между линиями С и Н	Фотопленка	
Стекланный спектрограф ЦНИИГАиК, СССР [11]	Стекланный спектрограф ЦНИИГАиК	Спектрограф			12 мм между линиями С (6562.81 нм) и Н (3968.47 нм)	Фотопленка	
Двухпризмный ИК-спектрограф ЦНИИГАиК, СССР [11]	Стекланный ИК-спектрограф	Спектрограф			16.3 мм между линиями D и р	Фотопленка	
ЛС-2, СССР [5]	Стекланный призмный спектрограф	Спектрограф	0.42—0.63		н\д	Фотопленка	Радиус кривизны изображения 85.0 мм
		Спектрограф	0.62—0.8		н\д	Фотопленка	Радиус кривизны изображения 44.4 мм
СПА-1, СССР [7, 14]	Двухлучевой спектрофотометр на дифракционной решетке 600 штр/мм	Спектрометр (три блока: оптический-механический, электронный блок управления и индикации, батарея аккумуляторов)	0.4—0.9	20	15	ФЭУ-51+ФЭУ-62	Для измерений в поляризованном свете используются два поляроида (0, 60 и 120°)
«Exotech 20-B», «Exotech Inc.», США [32]	Спектрорадиометр	н\д	0.37—2.52 2.76—13.99		н\д		
Мультиполосный радиометр [40]	Спектрорадиометр	Фильтровый спектрорадиометр	0.45—0.52 0.52—0.60 0.63—0.69 0.76—0.90 1.55—1.75 2.08—2.35 10.4—12.5 1.15—1.3	8	н\д	Si PbS PbS LiTaO3 PbS	
«Exotech 20C-SW», «Exotech Inc.», США [20, 45]	Спектрометр на базе четырех вращающихся круговых переменных дихроичных фильтров	Спектрорадиометр	0.4—2.4		($\Delta\lambda/\lambda = 0.02—0.03$) 44 нм при 2200 нм	Si + PbS	Четыре круговых сегмента в виде переменных по λ линейных фильтров

PFRS, JPL, США, 1974 [19, 27, 28, 37]	Спектрометр на базе вращающегося кругового переменного дихроичного фильтра	Спектрометр	0.45—0.7			($\Delta\lambda/\lambda = 0.04$ от 0.45 до 0.7 мкм)	фоторезистор PbS	Охлаждаемый детектор PbS
			0.7—2.5			$\Delta\lambda/\lambda = 0.015$ от 0.7 до 2.5 мкм)	фоторезистор PbS 12 бит	
PIDAS, JPL, США, 1984 [2, 26, 38, 45]	Три спектрометра на дифракционных решетках (второй и третий — на вращающихся четырехсекционных дифракционных решетках)	Спектрометр	0.425—0.922	512		0.88 нм	14—16 бит	Спектрометры — в баллоне под давлением Охлаждаемые детекторы PbS Процессор типа Z80
			0.856—1.35	360		4.7 нм	Охлажд. линейка Si (VIS)-512 элем.	
			1.35—1.8				PbS (NIR и SWIR)	
			1.8—2.05					
«LabSpec-4», ASD, США [18, 22, 28]	Полевой спектро-радиометр	3 составных спектрометра на дифракционных решетках	Общий: 0.35—2.5 1) 0.35—1.05 2) 1.05—1.9 3) 1.9—2.5			3 нм (700 нм) 10 нм (1400 нм) 10 нм (2100 нм)	Фотодиодная линейка Si (512) и «градиентные» InGaAs-фотодиоды с термоохлаждаемыми	Все приемники имеют блокирующие фильтры. Рабочий температурный диапазон от 0 до 40 °С
			0.325—1.075			<3,0 нм на 700 нм	Фотодиодная линейка (512)	
«FieldSpec-HandHeld-2» [23]	Полевой спектро-радиометр	спектрометр на дифракционной решетке	0.35—1.05			1.5	Фотодиодная линейка Si (512)	Поле зрения 40, 80, 140 Память — 500 сканов
GER-1500, США [17, 24]	Полевой спектро-радиометр	спектрометр на дифракционной решетке					Фотодиодная линейка Si (512)	Визирование — диодный лазер Поле зрения 3-6-100
GER-3700, США [25, 41]	Полевой однолучевой спектро-радиометр	3 составных спектрометра на дифракционных решетках	Общий: 0.35—2.5 1) 0.3—1.0 2) 1.0—1.89 3) 1.89—2.5	704		3,0 нм на 700 нм 11 нм на 1600 нм 16 нм на 2100 нм	16 бит Линейка Si (512) 15 бит Линейка PbS (128) 15 бит Линейка PbS (64)	Визирование — диодный лазер Рабочий диапазон температур: –100 +400 С Поле зрения 40, 80, 140 Память — 1000 сканов
SVC HR-1024i, США [32, 44]	Полевой спектро-радиометр	3 составных спектрометра на дифракционных решетках	Общий $\Delta\lambda$: 0.35—2.5 1 — (0.35—1.05) 2 — (1.05—1.9) 3 — (1.9—2.5)	1024		3,5 нм на 700 нм 9,5 нм на 1500 нм 6,5 нм на 2100 нм	16 бит Фотодиодные линейки: Si (512) InGaAs (256) Расширенный InGaAs (256)	Поле зрения 250 Объем памяти — 1 MB (~200 измерений)
tec5 AG, [43, 50], «Zeiss» (Германия)	Полевой двухлучевой спектрометр	2 спектрометра Zeiss MMS 1 на дифракционных решетках	0.36—1.1			10 нм (3.3 нм/пкл)	Линейка спектрометра Zeiss MMS 1	

Прибор, изготовитель	Спектрометр (спектрограф)	Конфигурация сенсора	$\lambda\lambda$, мкм	Кол-во каналов	Спектральное разрешение, нм (линейная дисперсия)	Тип фотоприемника, разрядность АЦП	Дополнительные данные
«HandySpec Field VIS», «Zeiss» (Германия) [30, 43]	Полевой двухлучевой спектрометр	2 спектрометра Zeiss MMS 1 на дифракционных решетках	0.36—1.1		10		
«HandySpec Field NIR», «Zeiss» (Германия) [30, 43]	Полевой двухлучевой спектрометр	2 спектрометра Zeiss MMS 1 на дифракционных решетках	0.4—2.15		10		
Спектрорадиометр для рисовых полей (Япония) [42]	Полевой спектро-радиометр	2 составных спектрометра Черни — Торнера на дифракционных решетках: 300 и 600 штр/мм	Общий $\Delta\lambda$: 0.4—1.9 1 — (0.4—0.9) 2 — (0.9—1.9)		2.8 (400—900) 5.6 (900—1900)	12 бит Фотодиодные (Si) линейки: Hamamatsu S1226-8 (VIS) B2034-01 (IR)	Опτικο-волоконный ввод длиной 10 м Поле зрения 150, CPU Z80A
Полевой спектральный АПК (Украина) [1, 3, 4, 15]	Двухканальный полевой спектрофотометр	Спектрометр Черни — Торнера с разделенной входной щелью на дифракционной решетке 150 штр/мм ($\lambda_{\text{max}} = 725 \text{ нм}$) с матричным приемником	0.52—0.8	>90	1.8—3 нм	Матрица Kodak Digital Science KAC-1310 CMOS 1280×1024 пкл, 6×6 мкм ² , с внутренним АЦП	Имеется GPS-приемник и видеозерный канал
«YARA N-Sensor» «Zeiss» (Германия) [47, 50]	Двухканальный полевой спектрофотометр для растительности	2 спектрометра с волоконными входами	0.45—0.9	20 (5 задаются)	5 (10)	Фотодиодные (Si) линейки	Оптические входы: 2 или 4 отраженных от зелени сигнала — в один СФ и 1 опорный канал (излучения) — в другой СФ. Поле зрения 120°
«Shank Specs» «Veris P4000» «Veris Technologies, Inc.», США [33, 35, 48, 49]	Полевой спектрометр для почвы	2 спектрометра с волоконными входами	Общий: 0.35—2.2 или 0.45—2.2: 1) 0.35—1.0 Ia) 0.45—1.0 2) 1.1—2.2	384	8	16 бит 3648 element Toshiba TCD1304AP Linear CCD Array, 256 element InGaAs Linear image sensor G9206-02 с TE-охлаждением	Галогенная лампа для освещения почвы: 10.5 A 12 V (126 W) климат-контроль спектрометра, датчик температуры почвы

а по второму — освещающий. Основной блок содержит два спектрометрических модуля, управляющую электронику и сменный аккумулятор. Опорный канал снабжен косинусным диффузором. Само измерение управляется одним нажатием кнопки, расположенной на верхней части головки датчика.

Полевые спектрометры серии «HandySpec» [30, 43] доступны в трех различных основных версиях: рюкзак (рис. 7) предназначен для VIS—NIR-диапазонов; плечевая модель и с закреплением на поясе.

Корпорацией НПО «Арсенал» совместно с ГП «Завод «Арсенал», Институтом физиологии растений и генетики Национальной академии наук Украины и Институтом космических исследований Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины в 2008 г. был создан полевой двухканальный спектрофотометр для тестирования состояния растительности [1, 4, 13, 15], в том числе и посевов сельскохозяйственных культур. На базе этого прибора был создан полевой спектральный АПК для дистанционного исследования растительности [1, 3, 4], концепция построения которого была изложена еще в 2005 г. [51].

Особенности конструкции АПК для дистанционного исследования растительности испытывались в натуральных условиях на разных фазах вегетации в период весна—осень в течение нескольких лет. Эти испытания не только выявили преимущества прибора по сравнению с зарубежными аналогами, но и позволили получить ценную информацию, которая может быть положена в основу новых технологий в области валидации космических и авиационных мультиспектральных измерений, что важно в настоящее время, особенно для проведения оцифровки земель сельскохозяйственного назначения. По сравнению с известным современным полевым спектро радиометром «FieldSpec-3(4) FR» [21, 22], созданный образец специализированного АПК имеет следующие преимущества:

- АПК не требует повторной перекалибровки при даже незначительном изменении освещенности, цветовой температуры источника освещения или угла солнцестояния;
- АПК имеет возможность дистанционного определения содержания хлорофилла в расти-

тельности в полевых условиях, особенно в условиях низких значений проективного покрытия почвы растительностью (до 25 % включительно даже на таком высоком фоне, как песок) [1, 3, 4].

МОБИЛЬНЫЕ ПОЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ

Комплекс «YARA N-Sensor» («YARA FieldScan») представляет собой систему мультиспектрального сканирования (для установки на транспортном средстве) для удаленного зондирования сельскохозяйственных культур на основе двух спектрометров с высоким спектральным разрешением, блоком электроники с бортовым компьютером, с терминалом оператора и GPS. Он составляет карты спектральных индексов (*NDVI*, *SAVI*, отношения инфракрасного к красному и др.) и выдает управляющие сигналы на исполнительные системы, установленные на транспортном средстве [47, 50]. Устройство состоит из двух спектрометров S1 и S2 на диодной матрице, двух оптоволоконных кабелей (один из них разделен на две или четыре части волокна) с входными оптическими устройствами и микропроцессора в прочном корпусе, установленном на верхней части крыши транспортного средства.

Спектральное отражение спектрометром S1 измеряется на 20 длинах волн (пять выбирается пользователем) в спектральных диапазонах 450—900 нм при полуширине $\delta\lambda = 10$ нм от двух (или четырех) мест исследования, расположенных вокруг транспортного средства. Обычно за одно сканирование измеряется площадь около 50—100 м².

В измерительной системе «YARA FieldScan» выполняется коррекция полученных спектральных значений отражения из-за изменения освещенности путем регистрации спектрометром S2 опорного сигнала (от небесной полусферы), поступающего в этот спектрометр через пятый оптоволоконный кабель в том же спектральном диапазоне. Это позволяет производить расчет спектральных индексов *NDVI*, *SAVI*, отношения инфракрасного потока к красному и многих других параметров.

Система управляется с помощью пользовательского терминала, установленного внутри кабины транспортного средства. Данные сохраняются на карте памяти вместе с позиционированием (с частотой повторения 1 с).

СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОЧВЫ

Использование спектрометров для измерения свойств почвы является относительно новым.

В лабораторных условиях обнаружено, что в видимой и ближней инфракрасной областях (VIS—NIR) результаты измерений спектрально-го отражения проб почвы коррелируют со вместимостью органических веществ и свойствами почвы, таких как углерод и азот, pH, влажности почвы и др.

Системы, предназначены для измерения содержания углерода и азота в почве (по спектрам в VIS—NIR-области), разработаны и внедрены в Veris Technologies, Inc., США. VIS-NIR-спектрометры фирмы Veris являются первыми коммерчески доступными системами сбора спектральных данных о почве в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра [33, 35, 48, 49].

Одна система выполняет измерения на ходу трактора, с погружаемым в грунт хвостовиком для сбора VIS—NIR-спектров на дискретных глубинах. Глубина регулируется на 2.5—10 см до 115 см. Скорость измерений — от 3 до 6 км/ч. Вторая система проводит измерения в статике с помощью зонда для сбора VIS—NIR-спектров при исследовании почвенного профиля на глубину до 1 м.

Обе системы используют два спектрометра для покрытия широкого диапазона длин волн 350—2200 нм (или 450—2200 нм) со спектральным разрешением $\delta\lambda = 8$ нм. На входе обеих систем расположено входное сапфировое окно. Почва освещается от осветителя с мощной галогенной лампой (120 Вт) через то же сапфировое окно.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛЕВОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Перспективами полевых спектрометров являются надежные, удобные в эксплуатации приборы с высокой фотометрической и спектральной точностью, с высоким спектральным разрешением ($\delta\lambda \leq 1...2$ нм), результаты измерений которых не зависят от условий измерений, естественного освещения, угла стояния Солнца, с возможностью подсоединения дополнительных датчиков [3]. На базе таких приборов возможно построе-

ние специализированных АСК для решения определенных задач, например:

- определения содержания хлорофилла в растительности [3],

- дистанционное определения состояния растительности с последующим анализом и выдачей информации (в реальном масштабе времени) о необходимых параметрах дифференциального внесения удобрений [47, 50];

- подспутниковой валидации [1, 3] растительности с точной привязкой и выдачей географических координат и др.

Следующим поколением полевых спектральных приборов будут являться приборы так называемой новой генерации, расположенные на транспортных носителях, которые будут иметь все позитивные особенности приборов, изложенных выше, и иметь дополнительную возможность формировать информационные пакеты данных — спектральных характеристик (сигнатур), содержащих спектральную информацию не только от усредненных зон исследования, а и спектральные характеристики каждого пикселя изображения исследуемой зоны (сцены). Это так называемые полевые гиперспектральные комплексы, прототипами которых являются бортовые гиперспектральные комплексы, используемые для дистанционного зондирования земной поверхности [1 — 4, 12, 16, 51].

Отличие обычной спектральной аппаратуры и аппаратуры нового поколения (на основе гиперспектрометра) состоит в следующем.

Достоинство гиперспектрометра заключается в возможности регистрировать сигнал, отраженный от поверхности наблюдаемого объекта, который содержит спектральную информацию с одновременной пространственной привязкой участков объекта, видимых в поле зрения прибора [12]. При этом сканирование по одной из пространственных координат осуществляется за счет движения носителя гиперспектрометра (транспортного средства, на котором установлен спектральный прибор).

А регистрация в реальном времени полезного сигнала, который содержит спектральную информацию только от исследуемой растительности, без влияния отражения почвы, с одновре-

менной пространственной привязкой участков объекта, видимых в поле зрения прибора, — это основная цель создания мобильного ГС-АПК нового поколения.

Спектральные приборы такого класса обладают расширенными функциональными возможностями, например способностью выделять культурные растения на фоне почвы, а также сорняки на фоне основного поля культурных растений (работы начаты в 1970-е гг. К. Полевицким), имеют повышенную точность измерений параметров растительности при неполном проективном покрытии почвы зеленью, т. е. без учета отражения от почвы, используя при этом новые методики обработки и новые вегетативные деривативные индексы [3, 4].

Следует также отметить, что упомянутое выше новое направление полевых спектрометрических измерений, которое уже используется в США, Австралии и др. странах при анализе качества почвы [33, 35, 48, 49], необходимо расширять не только для корректировки вносимых удобрений, а и при исследовании почв, прогнозировании урожайности и составлении кадастровых карт земной поверхности с использованием космической [6], авиационной [2, 5] и наземной [3, 4] съемки.

ВЫВОДЫ

Создание полевых спектральных методов и полевых спектральных приборов, а также наземных систем подспутниковой валидации продемонстрировало, что спектрометрия вне лабораторий является ценным инструментом для количественной оценки соответствующих параметров, поддерживающих процессы для наземных экосистем.

В данной работе рассмотрены и проанализированы особенности построения полевой спектральной аппаратуры (от первых спектрографов до современных спектральных аппаратурно-программных комплексов) для спектрометрического исследования земной поверхности и ее почв. Часть из этих приборов стала своего рода испытательным полигоном при создании следующих поколений бортовой спектральной и гиперспектральной аппаратуры авиационного и космического базирования.

Полевые спектральные приборы претерпели много изменений и улучшений, на их базе созданы аппаратурно-программные комплексы для дистанционного исследования растительности, оперативного создания баз данных и управления исполнительными механизмами современной аграрной техники.

В данной работе мы рассмотрели только известные авторам конструкции полевой спектральной аппаратуры, хотя на самом деле таких полевых приборов в компаниях различных государств намного больше.

Результаты статьи будут полезны исследователям и разработчикам спектрометрических приборов, особенно спектральной аппаратуры нового поколения.

Авторы благодарны профессору Ю. Ф. Книжникову за предоставление сведений о полевом спектрографе ЛС-2 и его использовании в подспутниковых наблюдениях на высокогорном полигоне в 1979 г., Терскол, Приэльбрусье.

Работа поддержана и велась в рамках проекта УНТЦ № 5240.

1. Донець В. В. Обґрунтування структури апаратурно-програмного комплексу для дистанційного зондування рослинності в польових умовах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 2010. — 19 с.
2. Донець В. В. Особливості конструкцій бортових гіперспектрометрів AIS // Космічна наука і технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 5—11.
3. Донець В. В., Кочубей С. М., Яценко В. А. і др. Створення полевого спектрального апаратурно-програмного комплексу для підспутникової валидації дистанційного дослідження рослинності // Системи обробки інформації. — 2013. — **10**, вип 8 (115). — С. 36—42.
4. Донець В. В., Яценко В. А., Семенов О. В. Оптимізація основних параметрів гіперспектрального комплексу для дослідження рослинності // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2011. — Вип. 4(20). — С. 44—49.
5. Зайцев Ю. А., Мухина Л. А. Применение цветной и спектральной аэрофотосъемки в геологических целях. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966. — 304 с.
6. Информационное агентство «Интерфакс-Запад»: В России намерены прогнозировать урожаи при помощи космического мониторинга [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.interfax.by/news/world/143773>

7. Кирмалов Р. Л., Мартынов Г. П., Тимофеев Ю. В., Хазанова Т. М. Полевой автоматический спектрофотометр // *Агрофизика*. — 1983. — № 52. — С. 23–26.
8. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность некоторых земных образований // *Исследование отражательной способности: Сб. ст. по аэрофотометрии* / Под ред. Г. А. Тихона. — 1934. — № 2. — С. 29.
9. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных объектов с самолета // *Аэросъемка: Техбюл.* — 1934. — № 8-9.
10. Кринов Е. Л. Зависимость спектральных коэффициентов яркости природных объектов от направлений. разований // *Исследование отражательной способности: Сб. ст. по аэрофотометрии*. — 1935. — № 5-6.
11. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. — М.-Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1947. — 272 с.
12. Овчинников А. М. Разработка алгоритмических и программных средств регистрации и визуализации локальных гиперспектральных данных: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2009. — 18 с.
13. Пат. України на корисну модель № UA 70505 U від 11.06.2012, М. кл. G01T 7/00. Польовий спектрометр для тестування стану рослинності / С. М. Кочубей, В. В. Донець, Т. А. Казанцев. — № u 2011 15271. — Заявл. 23.12.2011; Опубл. 11.06.2012, Бюл. № 11.
14. Посудін Ю. І. Спектроскопічний моніторинг агросфери. — Київ: Урожай, 1998. — 128 с.
15. Річний звіт Національного космічного агентства України за 2008 рік. — Київ: Нац. косміч. агентство України, 2008. — С. 16–17. — Режим доступу: http://www.nkau.gov.ua/pdf/NSAU_report_2008.pdf
16. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. — М.: Техносфера, 2010. — 560 с.
17. Agapiou A., Hadjimitsis D., Sarris A., et al. Hyperspectral ground truth data for the detection of buried architectural remains // *EuroMed 2010* / Ed. by M. Ioannides. — 2010. — P. 318–331 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.euromed2010.eu/e-proceedings/content/full/318.pdf>
18. ASD_{inc} Authorized Partner LabSpec4 Specification [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.eniseylab.ru/upload/LabSpec4Specification.pdf>
19. Ashley R. P., Abrams M. J. Alteration mapping using multispectral images — Cuprite mining district, Esmeralda County, Nevada, 1980 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://pubs.usgs.gov/of/1980/0367/report.pdf>
20. Exotech 20C-SW Instrument Summary [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://engineering.purdue.edu/~frdata/FRData/Instruments/Exotech20CS.html>
21. FieldSpec-3 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://meteo-tech.co.il/e-Catalog/pdf/FieldSpec.pdf>
22. FieldSpec Portable Spectroradiometer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.asdi.com/products/fieldspec-spectroradiometers>
23. FieldSpec HandHeld 2 Accessory Bundles [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.asdi.com/products/accessories/remote-sensing-accessories/handheld-2-accessories>
24. GER 1500 System [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://fsf.nerc.ac.uk/instruments/ger1500.shtml>
25. GER 3700 System [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://fsf.nerc.ac.uk/instruments/ger3700.shtml>
26. Goetz A. F. H. The portable instant display and analysis spectrometer (PIDAS) // *Proc. Third Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*. — 1987. — Vol. 87-30. — P. 8–17: JPL Publ. N 88-13756 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880004374_1988004374.pdf
27. Goetz A. F. H. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view // *Remote Sens. Environ.* — 2009. — **113**. — P. S5–S16 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: ftp://lasftp.colorado.edu/pub/harvey/Gamblin/IDL_code/Geotz_2009.pdf
28. Goetz A. F. H., Billingsley F. C., Gillespie A. R., et al. Application of ERTS image processing to regional geologic problem and geologic mapping in northern Arizona, Pasadena, California // *JPL Techn. Rept.* — 1975. — N 13-1597.
29. Goetz A. F. H., Chabrilat S., Lu Z. Field reflectance spectrometry for detection of Swelling Clays at construction sites // *Field Anal. Chem. and Technol.* — 2001. — **5**, N 3. — P. 143–155.
30. HandySpec® Systems [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.tec5.com/products/84/en/handyspec%C2%AE-systems.html>
31. Hatchell D. C. Analytical Spectral Devices, Inc. (ASD) Technical Guide 3rd Ed. USA 1999 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.gep.uchile.cl/Biblioteca/radiometr%C3%ADa%20de%20campo/Tech-Guide.pdf>
32. Leamer R. W., Myers V. I., Silva L. F. A spectroradiometer for field use // *Rev. Sci. Instrum.* — 1973. — **44**. — P. 611–614 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/44/5/10.1063/1.1686195>
33. Lund E. D., Kweon G., Maxton C. R., Drummond P. E. VIS-NIR — Spectrophotometer addressing tomorrow's soil challenges today soil carbon and nitrogen mapping: how these relate to new markets and public policy [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.veristech.com/images/9th_ICPA.pdf
34. MacDonald J., Ustin S. L., Schaepman M. A review of the contributions of Dr. Alexander F. H. Goetz to imaging spectrometry [Электронный ресурс]. — Режим досту-

- на: http://webdocs.dow.wur.nl/internet/grs/Workshops/Environmental_Applications_Imaging_Spectroscopy/1_MacDonald_GoetzAchievements/MacDonald_Goetz_Achievements.pdf
35. Marcos N. F. Investigação preliminar sobre o Uso do Veris P4000 Soil Force/Eca/Spectral Profiler para predic o de densidade de carbono em solos australianos Dezembro, 2009 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ler.esalq.usp.br/download/gmap/estagio/Marcos.pdf>
 36. Milton E. J., Schaepman M. E., Anderson K., et al. Progress in field spectroscopy // Remote Sens. Environ. — 2009. — 113. — P. S92—S109 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.geo-informatie.nl/courses/grs60312/fieldwork/miltonetal2009.pdf>
 37. Milton T., Schaepman M., Anderson K., et al. Progress in field spectroscopy. Appendix E Goetz A. F. H. Portable Field Reflectance Spectrometer // JPL Techn. Rept. — 1975. — N 32-1597. — P. 183 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.wageningenur.nl/upload_mm/0/5/1/9990b361-9539-4200-ad67-57ee07b1b0cb_Milton_FieldSpectroscopy.pdf
 38. Portable instant display and analysis reflectance spectrometer: Patent US 4560275 A [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.google.co.in/patents/US4560275>
 39. Precision farming — mobile spectrometers in agriculture [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://spec-tronet.de/portals/visqua/story_docs/intern_spectronet/vortraege/120417_13_collab_vortraege/120417_09_kirchler_tec5.pdf
 40. Robinson B. F., Bauer M. E., DeWitt D. P., et al. A multi-band radiometer and data acquisition system for remote sensing field research [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.isprs.org/proceedings/XXIII/congress/part7-8/783_XXIII-B7-8.pdf
 41. Schaepman M. E. Calibration of field spectroradiometer Zurich 1998 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.geo.uzh.ch/fileadmin/files/content/abteilungen/rs11/Spe1998/RSS_98_31.pdf
 42. Shibayama Michio, Craig L. Wiegand, Tsuyoshi Akiyama, Yoshiki Yamagata. Radiometric predictions for agronomic variables of rice canopies using a visible to mid-infrared spectroradiometer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.isprs.org/proceedings/XXVII/congress/part7/508_XXVII-part7.pdf
 43. Spectrometer Systems: HandySpec® Series [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.tec5usa.com/header/specSystems/handySpec/>
 44. SVC HR-1024 field spectroradiometer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://fsf.nerc.ac.uk/instruments/svc_hr-1024.shtml
 45. The Future of Field Spectroscopy: Product development (Part 2 of 4) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://discover.asdi.com/bid/84163/The-Future-of-Field-Spectroscopy-Product-Development-Part-2-of-4>
 46. Vanderbilt V. C., Robinson B. F., Biehl L. L., et al. Simulated response of a multispectral scanner over wheat as a function of wavelength and view/Illumination irections [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.isprs.org/proceedings/XXIII/congress/part7-8/942_XXIII-B7-8.pdf
 47. Varco J. J. Sensor based fertilizer nitrogen management [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cottoninc.com/fiber/Agricultural-Research/Agricultural-Meetings-Conferences/Crop-Management-Seminars/2010%20Presentations/23-PA-Sensor-Based-Fertilizer-Nitrogen-Management.pdf>
 48. VIS—NIR shank specifications and standard features [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.veristech.com/products/shankspecs.aspx>
 49. VIS—NIR spectrophotometer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.veristech.com/images/VIS-NIR_shank.pdf
 50. YARA FieldScan — Multi-spectral system for remote sensing [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.tec5usa.com/header/specSystems/Yara/>
 51. Yatsenko V., Kochubey S., Donets V., Kazantsev T. Hardware-software complex for chlorophyll estimation in phytocenoses under field conditions // Proc. SPIE. — 2005. — 5964. — P. 6. — (Optical Systems Design: SPIE Europe Inter. Symp., 12—16 September 2005, Friedrich-Schiller-Universität Jena).

Стаття надійшла до редакції 17.03.14

В. В. Донець, О. О. Броварець, В. В. Бровченко

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОЛЬОВОЇ СПЕКТРАЛЬНОЇ АПАРАТУРИ

Подается анализ особенностей полевой спектральной аппаратуры, створеної починаючи з 1930-х рр. для дослідження земної поверхні та наземних об'єктів, а також для підсупутникової валідації спектрометричних даних. Досягнення передових технологій, які були розроблені та апробовані у польових спектрометрах, були і будуть надалі втілені в ряд бортових спектрометрів різного призначення.

V. V. Donets, A. A. Brovarets, V. V. Brovchenko

AN ANALYSIS OF FIELD SPECTRAL APPARATUS FEATURES

We present an analysis of the features of field spectrometers for remote sensing of the Earth's surface and ground objects as well as for satellite validation of spectrometric data which were developed from the 1930s to the present time. Advanced technology achievements developed and tested in field spectrometers were and will be implemented in a number of airborne spectrometers for various purposes.

УДК 528

А. Л. Макаров¹, В. Е. Шатихин², В. С. Хорошилов¹, Г. В. Петренко¹, О. В. Цуканов¹, В. М. Попель¹

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

²Державне космічне агентство України, Київ, e-mail: shatw@land.ru

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИВОДА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рассматривается вопрос повышения точности оценки действующих в зубчатом зацеплении редуктора динамических нагрузок привода исполнительных механизмов космического аппарата. Для уточнения оценки динамических нагрузок на этапе проектирования привода исполнительных механизмов, обеспечивающих движение солнечных батарей, антенн, различных манипуляторов и т. д., обосновано применение динамического коэффициента, а также предложено и обосновано применение коэффициента повышения динамической нагрузки. Получены сравнительные диаграммы уровней динамических нагрузок по предложенному и базовому методам.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка надежности бортового привода исполнительных механизмов является одной из главных задач по обеспечению выполнения космическим аппаратом (КА) возложенных на него целевых функций. Одним из наиболее распространенных приводов в современных КА является электрический привод. Важное место в структуре электропривода различных устройств продолжает занимать редуктор, использующий цилиндрические зубчатые передачи с эвольвентными профилями. Несмотря на все более широкое применение в космической технике механизмов с зубчатыми циклоидальными профилями, альтернатива полной замены зубчатых механизмов с эвольвентными зубчатыми профилями до настоящего времени все еще не найдена.

Развитие современных КА с учетом новых повышенных сроков эксплуатации, внедрения новых материалов и технологий обуславливает необходимость повышения точности оценки

безотказности зубчатых передач электропривода КА. Одним из ключевых факторов, определяющих безотказность, является точный учет расчетным методом действующих динамических нагрузок. По настоящее время данная проблема является актуальной и нерешенной. В предлагаемой статье рассматривается метод повышения точности оценки динамических нагрузок на этапе проектирования электропривода КА, в составе которого находится редуктор с жесткими колесами прямозубых цилиндрических передач.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Зубчатые колеса редуктора электропривода исполнительных механизмов КА в зависимости от срока эксплуатации и условий нагружения могут рассчитываться на контактные и изгибные напряжения. Составной частью в расчете действующих напряжений на этапе проектирования являются коэффициенты, учитывающие динамические нагрузки внешнего и внутреннего характера по ГОСТ 21354-87, которые определяются приближенно. Меньшие значения коэффициентов принимают, в частности, при высокой степени точности изготовления зубчатых колес и малой окружной скорости [3]. Кроме

© А. Л. МАКАРОВ, В. Е. ШАТИХИН, В. С. ХОРОШИЛОВ,
Г. В. ПЕТРЕНКО, О. В. ЦУКАНОВ, В. М. ПОПЕЛЬ, 2014

того, необходимо заметить, что ГОСТ не учитывает эволюцию нагрузок, связанных с износом находящихся в зацеплении поверхностей зубьев. Поэтому повышение точности определения динамических нагрузок остается очень важной задачей. Следует заметить, что предлагаемый подход не заменяет действующие ГОСТы и не решает в целом проблему точного учета ударных нагрузок на зубья во время зацепления, но повышает достоверность их определения для рассматриваемого случая математической модели с жесткими зубчатыми колесами. Полученные результаты фактически дополняют действующие нормативные документы в части оценки динамических нагрузок в зубчатом зацеплении.

С целью повышения точности учета динамических нагрузок, действующих на зубчатые колеса, предложено в расчетах использовать динамический коэффициент K_d [2] для зубчатой передачи (ступени) в соответствии с выражением (1) и коэффициент увеличения динамических нагрузок (8), о котором будет сказано ниже:

$$K_d = 1 + \left(1 - \frac{M_{ct}}{M^\Sigma} \right) \sqrt{1 + \frac{c_{12}^2 w_n^2}{J^2 \epsilon^2 \Theta^2}}, \quad (1)$$

где M^Σ — среднее суммарное сопротивление (сумма статического и динамического сопротивлений), M_{ct} — статический момент нагрузки, J — приведенный момент инерции нагрузки, c_{12} — жесткость передач, w_n — начальная скорость удара зубьев в зацеплении, Θ — частота свободных колебаний, ϵ — среднее ускорение выходного вала.

Представленная формула в целом позволяет учитывать нагрузки, вызванные неточностью изготовления зубчатых колес и их опор, а также упругие колебания валов редуктора, изменения массово-инерционных характеристик полезной нагрузки, статического сопротивления и других факторов, обусловленных эксплуатацией КА.

Максимальная нагрузка передач привода с учетом формулы (1) определяется соотношением согласно [2]

$$M_{\max} = M^\Sigma + (M^\Sigma - M_{ct}) \sqrt{1 + \frac{c_{12}^2 w_n^2}{J^2 \epsilon^2 \Theta^2}}. \quad (2)$$

В свою очередь [1],

$$M^\Sigma - M_{ct} = M_d, \quad (3)$$

поэтому выражение (2) можно записать в виде

$$M_{\max} = M^\Sigma + M_d \sqrt{1 + \frac{c_{12}^2 w_n^2}{J^2 \epsilon^2 \Theta^2}}. \quad (4)$$

Величина w_n определяется исходя из выражения [2]:

$$w_n = \sqrt{2\epsilon_{вз} \Delta\delta_{C_{\max\Sigma}}}, \quad (5)$$

где $\epsilon_{вз}$ — ускорение выборки зазора в зацеплении, $\Delta\delta_{C_{\max\Sigma}}$ — максимальный зазор с учетом кинематической погрешности (мертвого хода для реверсивного движения) и упругого хода. В случае выборки зазоров $\Delta\delta_{C_{\max\Sigma}} = 0$, $w_n = 0$ и тогда

$$M_{\max} = 2M_d + M_{ct}. \quad (6)$$

Для наглядности перепишем после несложных преобразований формулу (4) в следующем виде:

$$M_{\max} = M_d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{c_{12}^2 w_n^2}{J^2 \epsilon^2 \Theta^2}} \right) + M_{ct}. \quad (7)$$

Рассмотрим снова выражение (1) определения динамического коэффициента. Оно учитывает как динамические, так и статические нагрузки. Необходимо заметить, что значительный интерес, в частности для определения безотказности и ресурса, представляет эволюция максимальных динамических нагрузок с течением эксплуатации привода. Увеличению динамических нагрузок будет способствовать износ рабочих поверхностей зубчатых колес и опор подшипников. Динамические нагрузки являются преобладающими нагрузками, вызывающими разрушение узлов привода [1, 3]. Поэтому для оценки динамических нагрузок приводов, у которых динамическое сопротивление значительно превышает статическое (они также широко используются в ракетно-космической технике), возникла необходимость ввода коэффициента, учитывающего только динамические нагрузки и, кроме того, позволяющего оценить их эволюцию с течением времени эксплуатации.

Таким образом, рассматриваем случай $M_{ct} = 0$. Разделив выражение (7) на (6), получим соотношение, показывающее величину эволюции динамических нагрузок ν (авторы предложили назвать данную величину коэффициентом повышения динамической нагрузки). Так, данный коэффициент позволяет оценить увеличение

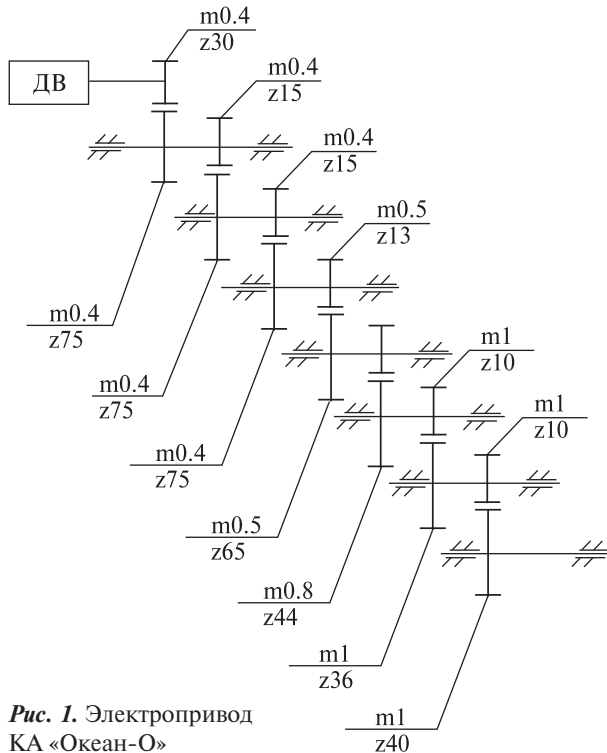


Рис. 1. Электропривод КА «Океан-О»

динамических нагрузок вследствие эволюции зазоров $\Delta\delta_{C_{\max\Sigma}}$, вызванной износом, полагая, что в выражении (7) все составные члены, кроме w_n (5), являются постоянными:

$$v = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{c_{12}^2 w_n^2}{J^2 \varepsilon^2 \Theta^2}} \right). \quad (8)$$

Максимальный зазор $\Delta\delta_{C_{\max}}$ с течением времени эксплуатации привода будет включать, помимо постоянного люфта, также прирост вследствие износа рабочих поверхностей зубчатых колес $\delta_{C_{\max div}}$.

Следующие аналитические выражения подтверждают сказанное выше [2]:

$$\begin{aligned} \delta_{C_{\max\Sigma}} &= \frac{M_{ст}}{c_{12}} + \delta_{C_{\max}}, \\ \varepsilon_{вз} &= \frac{M_{п}}{J}, \\ \delta_{C_{\max}} &= \delta_{C_{\max const}} + \delta_{C_{\max div}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $M_{п}$ — пусковой момент приводного двигателя, $\delta_{C_{\max const}}$ — приведенный к валу двигателя

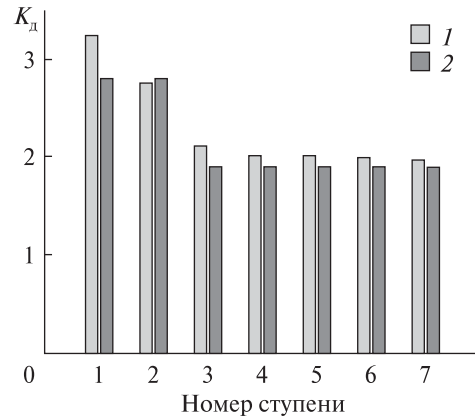


Рис. 2. Зависимость динамического коэффициента от номера ступени (1 — предложенный метод, 2 — общепринятый метод)

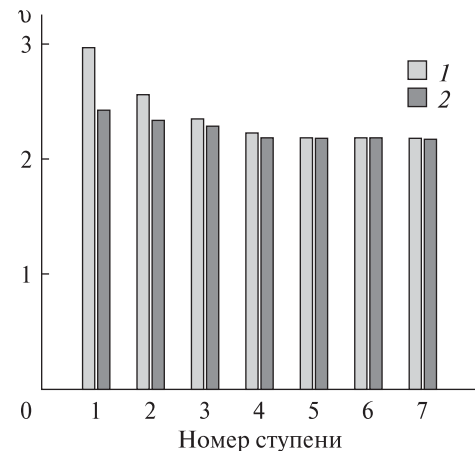


Рис. 3. Зависимость коэффициента повышения динамической нагрузки от номера ступени (1 — при достижении предельного износа, 2 — нулевая наработка)

зазор (люфт) с учетом кинематической погрешности или мертвого хода.

Как следует из (1) и (8), v отличается от K_d тем, что динамический коэффициент представляет собой отношение максимальной нагрузки (включая и статическую составляющую) к средней нагрузке, а v — отношение динамической нагрузки при нулевой наработке к динамической нагрузке, обусловленной наработкой в течение какого-то определенного времени. В нашем случае v определяет отношение максимальной динамической нагрузки, обусловленной изно-

сом, к максимальной динамической нагрузке без учета износа (начало эксплуатации привода). Поэтому численные значения ν должны быть меньше, чем значения, соответствующие данным режимам и условиям работы механизма значений K_d .

Итак, оба коэффициента описывают эволюцию динамических нагрузок в процессе эксплуатации КА, но коэффициент повышения динамической нагрузки более «нагляден» для применения в быстроходных механизмах; кроме того, исследование ν позволяет помимо анализа факторов, способствующих увеличению динамической нагрузки, также разрабатывать мероприятия по увеличению назначенного ресурса зубчатых колес и опор подшипников.

Определению износа зубчатых колес посвящено большое количество работ, в проведенных исследованиях для определения $\delta_{C_{\max div}}$ использованы методики, изложенные в источниках [3, 4].

В качестве примера эволюции динамических нагрузок вследствие износа был рассмотрен электропривод одного из отечественных космических аппаратов «Океан-О» (рис. 1). Семиступенчатый герметичный привод антенного устройства приводится в движение электрическим двигателем постоянного тока ДПР-52-Н-03М, превышение динамического сопротивления по отношению к статическому составляет 34, поэтому для исследования динамических нагрузок также целесообразно использование ν .

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 2 и 3. В качестве переменной составляющей $\delta_{C_{\max div}}$ рассматривался максимальный мертвый ход зубчатых передач. Аналитическая связь между эволюцией максимального мертвого хода и износом рабочих поверхностей зубчатых колес, опор подшипников изложена в [4].

На рис. 2 представлен для всех семи ступеней редуктора графический сравнительный анализ (с помощью диаграмм) уровня динамических нагрузок в соответствии с общепринятым методом (2) и предложенным в статье методом с использованием динамического коэффициента (1). Здесь рассмотрен случай для наработки в 100 часов, причем для всего привода $K_d = 2.34$.

Несложно заметить, что на тихоходных ступенях различие незначительное, большая разница наблюдается на самой быстроходной первой ступени.

На рис. 3 представлена эволюция коэффициента повышения динамической нагрузки для первых трех ступеней редуктора для случаев начальной (нулевой) наработки (2) и при достижении предельного износа (1).

Как следует из полученных графических зависимостей, значительные расхождения уровня динамических нагрузок по базовому и авторскому методам наблюдаются на самой быстроходной первой ступени, имеющей наименьший ресурс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложены аналитические соотношения для уточнения действующих в эвольвентном зубчатом зацеплении динамических нагрузок; обосновано использование динамического коэффициента; предложено и обосновано использование коэффициента повышения динамической нагрузки.

2. Получены диаграммы распределения уровня динамического коэффициента и коэффициента повышения динамической нагрузки в зависимости от ступени привода; проведено сравнение полученных результатов с базовым методом.

3. Показано, что наиболее целесообразно использование полученных результатов наряду с базовым методом для уточнения действующих динамических нагрузок при проектировании наименее надежных скоростных ступеней редуктора.

4. Предложенный коэффициент повышения динамической нагрузки целесообразно использовать для анализа быстроходных механизмов, у которых динамическое сопротивление значительно превышает статическое.

5. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения назначенного ресурса эвольвентных зубчатых передач.

1. Вульфсон И. И., Ерихов М. Л., Коловский М. З. Механика машин. — М.: Высш. шк., 1996. — 510 с.

2. Ключев В. И. Теория электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 560 с.
3. Проников А. С. Надежность машин. — М.: Машиностроение, 1978. — 574 с.
4. Шатихин В. Є., Семенов Л. П., Хорошилов В. С. та ін. Врахування зносу зубчатих передач при оцінюванні динамічних характеристик приводу сонячних батарей // Космічна наука і технологія. — 2006. — **12**, № 4. — С. 33—37.

Стаття надійшла до редакції 14.07.14

О. Л. Макаров, В. Є. Шатихин, В. С. Хорошилов,
Г. В. Петренко, О. В. Цуканов, В. М. Попель

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

Розглядається питання підвищення точності оцінки динамічних навантажень у зубчатому зацепленні приводу виконавчих механізмів космічного апарата. Для уточнення оцінки динамічних навантажень на етапі проектування приводу виконавчих механізмів, що забезпечують

рух сонячних батарей, антен, різноманітних маніпуляторів тощо, обґрунтовано застосування динамічного коефіцієнта, а також запропоновано та обґрунтовано застосування коефіцієнта підвищення динамічного навантаження. Отримано порівняльні діаграми рівнів динамічних навантажень за запропонованим та базовим методами.

*A. L. Makarov, V. E. Shatikhyn, V. S. Horoshilov,
G. V. Petrenko, O. V. Tsukanov, V. M. Popel'*

SOME INCREASE OF DYNAMIC LOADS OF SPACECRAFT ACTUATING MECHANISMS DRIVE

We consider the possibility to increase the assessment accuracy of dynamic loads operating in gear engagement for drive gearbox of spacecraft actuating mechanisms. To improve dynamic loads data assessment on the design stage of the following devices: solar panels, antennas, various manipulators etc., the application of dynamic ratio is substantiated and the application of the dynamic loads increasing ratio is proposed and substantiated. Comprehensive diagrams of dynamic load levels due to the proposed and basic methods are obtained.

АТАМАНЕНКО Борис Анатолійович — керівник напрямку міжнародного співробітництва Державного космічного агентства України, експерт з конверсії, кандидат фізико-математичних наук. Дійсний член Академії технологічних та інженерних наук України, почесний професор Національного університету «Львівська політехніка».

Напрямок науки — нерозповсюдження зброї масового ураження, зміцнення транспарентності та довіри в космічній діяльності.

БОЙКО Галина Володимирівна — здобувач кафедри біотехніки та інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Напрямок науки — гіроскопи та навігаційні системи.

БРОВАРЕЦЬ Олександр Олександрович — доцент Національного університету біоресурсів і природокористування України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — сільське господарство, точне землеробство, моніторинг.

БРОВЧЕНКО Вадим Володимирович — інженер-конструктор Корпорації «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал».

Напрямок науки — спектрометрія, гіперспектрометрія, радіолокаційні системи.

ДОНЕЦЬ Володимир Володимирович — голова правління Корпорації «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», кандидат технічних наук, Державний повіритель спектрофотометричної апаратури.

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

ЄСФИМЕНКО Микола Володимирович — заступник Головного конструктора з науки НВП ХАРТРОН-ІЮКОМ, доцент Запорізького національного технічного університету, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — системи керування космічними апаратами.

ІЩЕНКО Марина Вікторівна — науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — обробка ГНСС-спостережень.

КОРСУНЬ Алла Олексіївна — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — аналіз даних про варіації параметрів обертання Землі, космічна геодинаміка.

КОЧУБЕЙ Галина Сергіївна — науковий співробітник відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — механіка рідини, газу та плазми.

КУРБАСОВА Галина Сергіївна — провідний науковий співробітник Кримської астрофізичної обсерваторії, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — аналіз даних про варіації параметрів обертання Землі, космічна геодинаміка.

МАКАРОВ Олександр Леонідович — заступник Генерального конструктора з питань створення й експлуатації космічних апаратів, супутникових систем, контрольованих вимірювальних і інформаційно-керувальних засобів ракетно-космічного та наземного сегментів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук, заслужений машинобудівник України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

ПЕТРЕНКО Григорій Васильович — заступник Головного інженера — начальник служби Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

ПОПЕЛЬ Валерій Михайлович — заступник начальника відділу антенно-фідерних та НВЧ-пристроїв конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрямок науки — антенно-фідерні пристрої та засоби мікрохвильової техніки.

ТОКМАК Микола Анатолійович — науковий співробітник відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — механіка рідини, газу та плазми.

ФЕДОНЮК Роман Валентинович — заступник начальника управління міжнародного співробітництва Державного космічного агентства України, закінчив Дипломатичну академію України при МЗС України.

Напрямок науки — зовнішня політика, міжнародне співробітництво у космічній сфері.

ХОРОШИЛОВ Віктор Сергійович — начальник розрахунково-теоретичного сектору конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України.

Напрямок науки — динаміка, балістика та керування рухом літальних апаратів.

ЦОКУР Анатолій Григорович — старший науковий співробітник Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України.

Напрямок науки — механіка рідини, газу та плазми.

ЦУКАНОВ Олег Владиславович — інженер відділу антенно-фідерних та НВЧ-пристроїв конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрямок науки — антенно-фідерні пристрої та засоби мікрохвильової техніки.

ШАТІХІН Валерій Євгенович — головний спеціаліст департаменту космічних комплексів Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

ШУВАЛОВ Валентин Олексійович — завідувач відділу механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України, лауреат премії Національної академії наук України ім. М. К. Янгеля.

Напрямок науки — плазмоелектродинаміка космічних апаратів, фізика плазми.

75 років члену-кореспонденту НАН України МОРОЗОВУ Анатолію Олексійовичу



9 травня 2014 року виповнилось 75 років від дня народження директора Інституту проблем математичних машин і систем НАН України, члена-кореспондента НАН України, президента Академії технологічних наук, заслуженого діяча науки і техніки України, доктора технічних наук, професора Морозова Анатолія Олексійовича.

Морозов Анатолій Олексійович — відомий український вчений у галузі інтелектуальних систем управління та інформаційних технологій. Характерною особливістю діяльності А. О. Морозова є сполучення високого наукового рівня виконуваних досліджень з доведенням результатів до їхнього широкого практичного впровадження.

Анатолій Олексійович Морозов народився 9 травня 1939 р. в м. Києві. Закінчив Київський політехнічний інститут (1961 р.), аспіранту-

ру Інституту кібернетики Академії наук УРСР (1972 р.), кандидат технічних наук (1972 р.), доктор технічних наук (1983 р.), професор (1986 р.), член-кореспондент Національної академії наук України (1988 р.), академік Академії технологічних наук Росії (1991 р.), президент Академії технологічних наук України (1991 р.), заслужений діяч науки і техніки України (1991 р.), дійсний член Міжнародної академії інформатики (1995 р.). Його науково-технічні розробки відзначені двома Державними преміями СРСР, трьома Державними преміями України, Премією ЛКСМУ ім. М. Островського, Премією Ради Міністрів СРСР, Преміями НАН України ім. В. М. Глушкова та ім. С. О. Лебедева, орденами Трудового Червоного Прапора, «За заслуги» III ступеня, медалями, Почесними грамотами та відзнаками різних відомств. А. О. Морозов — лауреат Шостої загальнонаціональної програми «Людина року 2009» у номінації «Вчений року».

Трудову діяльність А. О. Морозов розпочав у 1961 р. в Інституті кібернетики Академії наук УРСР на посаді інженера. З 1969 р. працював на посадах начальника лабораторії, начальника відділу, заступника директора, а з 1983 р. — директора Спеціального конструкторського бюро математичних машин і систем Інститута кібернетики Академії наук УРСР, на базі якого в 1992 р. з ініціативи і під керівництвом А. О. Морозова створений Інститут проблем математичних машин і систем Національної академії наук України.

Початком творчої діяльності А. О. Морозова в Інституті кібернетики Академії наук УРСР був

цикл робіт зі створення ряду перших в СРСР автоматизованих систем управління різних класів, таких, як «Львів», «Ритм-2», «Траса», «Марс» та ін. Автоматизована система управління «Ритм-2» була впроваджена й успішно використана в Центрі управління пілотованими космічними польотами, відмінно показала себе в ході реалізації програм «Союз-Аполлон» та ін.

Роботами А. О. Морозова цього періоду, по суті, закладено підвалини подальших фундаментальних досліджень у цій галузі, які відкрили шлях до нових наукових напрямів, зокрема, до створення теоретичних і методологічних основ побудови цехів-автоматів, гнучких виробничих систем, а загалом і створення заводів-автоматів. Конкретними результатами цих теоретичних досліджень стало створення першої в СРСР комплексної АСУ «Ульяновськ», гнучких виробничих систем на НВО «Енергія» (м. Калінінград Московської обл.) та на заводі ім. Петровського (м. Київ).

Видатний науково-організаторський талант А. О. Морозова розкрився при вирішенні проблем з ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи. У стислі строки під його керівництвом була створена система моніторингу Дніпровського каскаду, яка дозволила вже у вересні 1986 р. прийняти рішення про забезпечення питною водою населення України, що живе південніше м. Чорнобиль. В період з травня 1986 р. по січень 1988 р. А. О. Морозов безпосередньо керував роботами з цього напрямку в м. Чорнобиль. У 1993 р. під його керівництвом групою вчених України та СНД була розроблена перша «Концепція ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС», яка була затверджена Верховною Радою України.

Отримані А. О. Морозовим результати в галузі інформаційних технологій і теорії прийняття рішень дозволили підійти до створення систем класу Ситуаційний центр для прийняття рішень на державному рівні. Під його керівництвом у 1985 р. створений перший в СРСР Ситуаційний центр (м. Москва), в 2003 р. створений та впроваджений перший в Україні Ситуаційний центр

Міністерства оборони України, системи інформаційного обслуговування народних депутатів «Рада», «Рада-1», «Рада-2», «Рада-3», які впроваджені в законотворчий процес як в Україні (Верховна Рада України, Київська міська рада, м. Дніпропетровськ, м. Харків, м. Донецьк, Крим), так і за кордоном (Узбекистан, Таджикистан).

Під керівництвом А. О. Морозова останнім часом виконані такі розробки світового рівня:

- спільно з ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України розроблено та впроваджено в унікальних установках електронно-променевого зварювання нового покоління КЛ115, КЛ118, КЛ117 системи управління на основі модельно-орієнтованого управління;

- на основі розроблених методів стиснення, кодування і декодування мовної інформації створено і виготовлено системи конфіденційного зв'язку;

- розроблено спеціальне програмне забезпечення для захисту локальних обчислювальних мереж;

- проведено моделювання нового укриття для Чорнобильської АЕС «Арка» у критичних умовах, за результатами якого внесено зміни в конструкцію укриття.

Анатолій Олексійович Морозов розвинув роботи академіків В. М. Глушкова та В. І. Скуріхіна в галузі автоматизованих систем підготовки та прийняття рішень. Ним створена своя наукова школа.

Результати робіт А. О. Морозова широко висвітлені у провідних наукових журналах, представлялися на всесоюзних і міжнародних науково-технічних конференціях та симпозіумах.

Науковий доробок А. О. Морозова складають більше 330 наукових праць та винаходів, у тому числі 9 монографій, 84 патенти на винаходи.

Анатолій Олексійович Морозов — головний редактор фахового наукового журналу «Математичні машини і системи», очолює спеціалізовану вчену раду з захисту докторських та кандидатських дисертацій за двома спеціальностями.

Серед учнів А. О. Морозова — 14 докторів та 33 кандидати наук.

*Вітаючи вельмишановного Ю. Л. Мазора з виходом нової книги
«Радиоконтакт с внеземными цивилизациями», редакційна колегія журналу
«Космічна наука і технологія» пропонує увазі читачів передмову до цього видання*

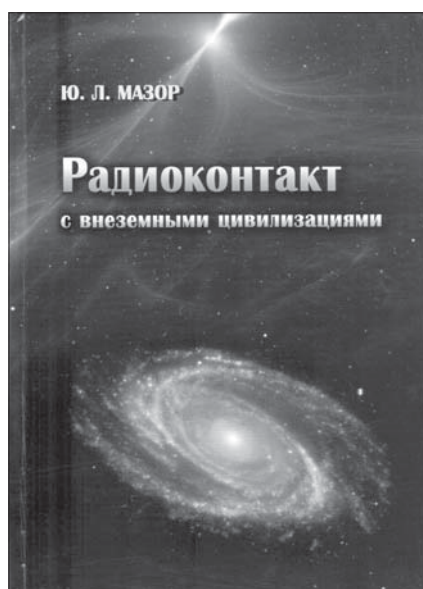
ПРЕДИСЛОВИЕ

Credo quia Verum — Верю, потому что верно.
Ищите и обрящите, ищите и найдете,
ибо ищущий находит. Стучите, и отворят Вам.

*Иисус Христос,
Нагорная проповедь,
Евангелие от Матфея.*

Книга, которую Вы открыли, это не фантастика и даже не научная фантастика — это рассказ о действительных событиях, которые происходят в наше время. Это рассказ об одной из самых дерзких и увлекательных попыток, которые когда-либо предпринимались в истории человечества — попытке связаться с нашими братьями по разуму, отдаленными от нас черной бездной Космоса.

Человека давно манит небо, с тех самых пор, когда он, став на ноги, впервые его увидел. Причины были разные: его волновал небесный огонь, страх перед могуществом богов и ожидание их знамений, потребности навигации, земледелия и многое другое. С тех пор прошло много времени, сегодня на Земле почти не осталось белых пятен. Поэтому естественно, что поиски других разумных существ и других цивилизаций, которые люди раньше искали за океаном, переместились от Земли к звездам. История великих географических открытий продолжается. Человеку всегда хотелось заглянуть за пределы уже известного, испытать волнующее ощущение тайны. А далекая Внеземная Цивилизация — это самая Великая Тайна для нас, землян.



Мазор Ю. Л.

Радиоконтакт с внеземными цивилизациями: монография / Ю. Л. Мазор. — К.: НТУУ КПИ, 2013. — 712 с. — Библиогр.: с. 690—698.

ISBN 978-966-622-602-3

Исследована проблема поисков внеземных цивилизаций, описаны главные реализованные проекты таких поисков. Рассмотрены астрономические, биологические, радиотехнические, исторические, статистические, лингвистические и социологические аспекты проблемы. Приведен многочисленный фактический материал, что делает научное изложение более познавательным и интересным.

Для ученых, инженеров, студентов, а также всех, кто интересуется исследованной проблемой. Доступна для читателей со средним образованием.

Досліджено проблеми пошуків позаземних цивілізацій, описано головні реалізовані проекти таких пошуків. Розглянуто астрономічні, біологічні, радіотехнічні, історичні, статистичні, лінгвістичні та соціологічні аспекти проблеми. Подано численний фактичний матеріал, що робить науковий виклад більш пізнавальним і цікавим.

Для науковців, інженерів, студентів, а також усіх, хто цікавиться досліджуваною проблемою. Доступна для читачів із середньою освітою, і в той же час на достатньо високому рівні для спеціалістів.

УДК 520/524 ББК22. 6

Человек взялся за великое и смелое предприятие, которое в случае успеха окажется столь же важным, как открытие Коперника, который предложил гелиоцентрическую модель Солнечной системы; или открытие Хаббла, увидевшего расширяющуюся Вселенную, заполненную галактиками; или открытие заокеанских земель в эпоху великих географических путешествий, или переселение наших далеких предков с деревьев в саванну. Проблема SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence — по международной терминологии — поиск внеземного разума) имеет значение, далеко выходящее за пределы научного любопытства. Установление самого факта существования даже нерасшифрованного сигнала внеземных цивилизаций влечет за собой далеко идущие выводы: показывает, что Человечество, как и они, может преодолеть тот кризис, который грозит нашему существованию, может преодолеть фатальную опасность самоуничтожения. В этом социальный смысл поиска ВЦ. Смысловая информация, полученная в результате обнаружения Разума в Космосе, вероятно, обеспечит возможности дальнейшего прогресса и укажет пути развития нашей цивилизации на астрономически большие интервалы времени. Мы уже больше никогда не будем такими как прежде: наша наука, техника, философия, наш взгляд на самих себя сделают громадный скачок вперед. Если у нас хватит мудрости и сил продолжить поиски. Следует подчеркнуть, что одной из главных причин поиска внеземного разума является подсознательное стремление людей чувствовать, что мы не одиноки в беспредельном пространстве Космоса.

Первые интуитивные предположения о множественности миров высказывались уже в глубочайшей древности. Так, древнегреческий философ Митродор (II в. до н. э.) бросил звонкую фразу: считать Землю единственным населенным миром в беспредельном пространстве было бы такой же вопиющей нелепостью, как утверждать, что на громадном засеянном поле взойдет только один пшеничный колос.

На протяжении всей истории человечества, вплоть до последних десятилетий, поиски жизни во Вселенной сводились к абстрактным рассу-

ждениям в области философии, научных гипотез или фантастики. Но недавно, буквально в последние мгновения по космической шкале времени, люди вооружились приборами, разработали научные методы для серьезного изучения этой проблемы, пытаются экспериментально ответить на этот старый и важный вопрос. Проблема поиска внеземных цивилизаций (ВЦ) уже более половины века как стала подлинно научной проблемой; из чисто умозрительной превратилась в задачу, поддающуюся экспериментальной проверке, из области веры перешла в область познания. Интерес к проблеме SETI подогревается новыми открытиями в области астрофизики и биологии.

Решающую роль здесь сыграли запуски первых искусственных спутников Земли. Появился ряд работ крупных ученых, в которых строго рассматривалась проблема установления связи с разумными существами, населяющими другие миры. В последние годы обнаружены сотни планетных систем. Межпланетные космические зонды приступили к разведке в пределах Солнечной системы. Сделаны первые попытки экспериментально обнаружить живые микроорганизмы на поверхности Марса и других небесных тел. Впервые аппарат, созданный руками и гением человека Земли, покинул Солнечную Систему. Значительно раздвинуты границы Вселенной. Обнаружены органические молекулы в метеоритах и кометах, в безбрежной тьме межзвездного пространства. Построены гигантские радиотелескопы и с их помощью предпринимаются попытки обнаружить сигналы ВЦ. Этим попыткам и посвящена наша книга.

Только наивные люди могли рассчитывать на быстрый успех. Проблема слишком сложна, и она оказалась сложнее, чем это предполагалось в начале пути. Мы думаем, что к этим трудностям нужно отнестись с пониманием. Главное, что за 60 лет, которые прошли с тех пор как был проведен первый поиск, интерес человечества к проблеме SETI не был утрачен, а предпринимаемые усилия неуклонно нарастали. В поиски сигналов ВЦ оказались вовлеченными многие страны мира: вначале США и Советский Союз, затем Великобритания, Канада, Франция, Ита-

лия, Австралия, Аргентина, Германия, Нидерланды, Испания, Япония, Китай. Были проведены более сотни проектов поиска сигналов ВЦ в радио- и оптическом диапазонах частот, многие из которых на самом высоком научно-техническом уровне. В результате были обнаружены тысячи «подозрительных» внеземных сигналов (исследователи называют их кандидат-сигналами), под которыми обычно понимают сигналы, которые прошли предварительную проверку на искусственность. Но не был обнаружен ни один кандидат-сигнал, отвечающий всем установленным требованиям искусственности — другими словами, сигналы внеземного разума не были обнаружены. Космос молчит или разговаривает на непонятном нам языке.

«Великое Молчание Вселенной» не означает, что внеземных цивилизаций нет — безуспешный пока поиск сигналов ВЦ лишь подчеркивает сложность задачи. В нашей книге рассмотрено более двадцати причин этого молчания — «астросоциологического парадокса», как его называют ученые: большой вероятности существования ВЦ во Вселенной и отсутствия в настоящее время достоверных наблюдаемых проявлений космической деятельности разумных существ.

Сегодня интенсивный поиск проводится с нарастающей эффективностью. Как говорит одна из ведущих руководителей многих проектов, Джил Корнелл Тартер, «возможно исследования будут долгими. Возможно, мы не будем иметь успеха долгое время. Но мы будем пытаться и, если не добьемся успеха, будем пытаться опять и опять». В то же время обнаружение может произойти уже завтра.

Мы дошли до края Вселенной и по пространству, и во времени, мы поняли эволюцию звезд, мы нашли возле них планеты. Но не обнаружили следов другого Разума. Неужели мы одиноки? Противоположный вывод подкрепляется всем современным научным знанием. Есть один совершенно достоверный научный факт, который указывает на возможность разумной жизни в Галактике — это факт нашего собственного существования. По современным данным в нашей Галактике сто миллиардов звезд, а таких галактик во Вселенной десять миллиардов. Всего 10^{21} звезд,

вокруг которых вращаются планеты. Законы естествознания во Вселенной всюду одинаковы.

Почему же жизнь и разум возникли и развились только возле одной, ничем не выдающейся звезды, которую мы называем Солнце, а астрономы желтым карликом класса G2? Законы статистики говорят о том, что при бесконечном количестве явлений любое случайное событие становится достоверным. Значит, мы не можем быть одни — ничто не уникально во Вселенной.

Книга содержит три части. Первая по существу отвечает на вопрос, стоит ли их искать. Первоначально определяется предмет поиска, уточняется понятие ВЦ. В настоящее время нет единого мнения о распространении разумной жизни во Вселенной. Существуют две крайние точки зрения: согласно первой — внеземные цивилизации это обычное явление в Космосе; согласно второй — жизнь и разум это исключительное явление во Вселенной и наша цивилизация, по-видимому, единственная. В первой главе обе гипотезы рассматриваются на качественном уровне, и сделан обоснованный вывод в пользу первой гипотезы. Во второй главе рассмотрены 24 возможных способов контакта с ВЦ, обоснованы преимущества радиоконтакта в настоящее время. В третьей главе, наиболее объемной в книге, по методике Ф. Д. Дрейка производится вероятностный расчет числа технологически развитых внеземных цивилизаций, существующих в настоящее время в достижимой для нас сегодня (завтра) области пространства.

Вторая часть книги содержит пять глав и посвящена проблемам, которые возникают в процессе поиска связи с внеземными цивилизациями: стратегии поиска, возможным целям передачи сигналов, возможным способам передачи информации; представляет ли интерес земная цивилизация для ВЦ, намного опередивших нас в своем развитии; проблема передач с Земли в Космос; возможности установления смыслового контакта, возможные последствия установления контакта. Приведена научная история SETI: основные проекты, теоретические исследования, конференции, 28 научных биографий основных ученых, работающих в области SETI. Показано существенное различие проблем поиска ВЦ и

НЛО (неопознанных летающих объектов), поскольку многие их путают.

В третьей части книги, которая включает шесть глав, рассмотрен поиск внеземных цивилизаций с помощью радиоэлектронных средств. Первоначально проанализированы космические помехи и произведен синтез предполагаемых сигналов внеземных цивилизаций. Синтез производится методом подстановки — исходя из общности законов природы, мы ставим себя на место отправителя. При этом формируется такая модель сигнала, которая обладает высокой помехоустойчивостью и несет признаки его искусственного происхождения. Методы поиска крайне интересны и остроумны, они очень напоминают детективную задачу, но только с той разницей, что по сравнению с ними любой, самый изощренный детективный сюжет кажется игрой детского ума.

Подробное рассмотрение более ста проведенных проектов невозможно, да и не нужно. Поэтому был принят такой подход: подробно рассмотрены первый проект «OZMA», выполненный Ф. Дрейком в 1960 г, и типовой проект HRMS (Heigh-Resolution Microwave Search — поиск микроволновых сигналов с высоким разрешением по частоте). После чего менее подробно приведены описания основных проектов конца XX и начала XXI века, выполненных в радио и оптическом диапазонах: Cyclops, Ohio project, SERENDIP, META/BETA, PHOENIX, SETI & HOME, ARGUS, ATA, SKA, OSST, PATAN-600, Радиоастрон, Мания, KPT, OSETI.

В заключении рассмотрено состояние проблемы SETI в настоящее время, пессимистические и оптимистические оценки. Проведен анализ полученных кандидат-сигналов. Подчеркнута значимость проблемы SETI: научная, техническая, социальная. Сделаны прогнозы на будущее. Рассмотрено возможное время установления контакта.

Основная трудность, с которой мы сталкиваемся, заключается в том, что, несмотря на громадный объем информации, которым мы располагаем по Земле и Космосу, мы знаем только одну форму жизни — это жизнь на Земле, одну технологически развитую цивилизацию — земную цивилизацию, один вид связи на безгранич-

но большие расстояния — радиосвязь. Поэтому мы были вынуждены экстраполировать, строить и обосновывать гипотезы, сочетать дерзкие допущения со строгими доказательствами; при всем этом мы работали в пределах не качественных, а количественных оценок, полагая их наибо- лее объективными.

Первая и вторая части книги общеобразовательны — проблема SETI представляет собой туго завязанный узел из всех земных наук, включая астрофизику, планетологию, химию, генетику, эволюционную биологию, теорию связи, математическую статистику, информатику, кибернетику, радиоэлектронику, сравнительную этологию, психологию, лингвистику, археологию, историю, социологию, философию. Знакомство с приведенными материалами не требует специальной подготовки, они изложены так, чтобы в них мог разобраться читатель со средним образованием. Следует подчеркнуть, что гипотеза о существовании разума в других мирах крайне интересна, она приводит нас к вопросам о сущности жизни, ее распространенности в Галактике, происхождении и эволюции жизни на Земле, возникновении разумной жизни, происхождении человека, технически развитой цивилизации, судьбах различных цивилизаций, предвидимого будущего и многого другого.

Третья часть, так же, как первая и вторая, рассчитана на широкую аудиторию; она написана в «двухслойной» структуре так, чтобы быть доступной читателю с минимальным радиотехническим образованием и в то же время на достаточно высоком уровне для специалистов. В книгу вложен максимум фактического материала с тем, чтобы сделать ее более познавательной и интересной. В тех случаях, когда вводятся специальные характеристики, обозначения или терминология, приводятся подробные их объяснения. При этом автор не стремился к математической строгости там, где отказ от нее мог упростить изложение и обеспечить лучшее понимание материала. Очевидно, что каждый читатель, в зависимости от уровня подготовки, найдет свое понимание этой книги.

Книга базируется на последних достижениях радиотехники и вычислительной техники, при-

меняемых при поисках ВЦ, использует опыт и материалы автора, который долгие годы работал в области статистического анализа и обнаружения пороговых сигналов, принимаемых на фоне сильных помех. Поскольку мы часто будем обращаться к идеям и теориям, возникающим в ходе последних исследований, читатель не должен ожидать установившихся взглядов и выводов. Напротив, мы надеемся передать Вам то чувство волнующего ожидания, которое овладевает человеком, пытающимся перешагнуть границу неведомого. Мы хотели бы, чтобы читатель получил удовольствие от знакомства с многочисленными загадками, с которыми сталкиваются исследователи жизни во Вселенной.

Ни одна книга, посвященная рассматриваемой проблеме, не может избежать влияния работ И. С. Шкловского «Вселенная, жизнь, разум», вышедшей шестью изданиями (1962—1987 гг.), К. Сагана «Космос» (2006 г.), самым многотиражным научно-популярным изданием в истории английского языка и Л. М. Гиндилиса «SETI: Поиск внеземного разума» (2004 г.), которые являются своеобразными SETI-энциклопедиями. При создании книги широко использованы материалы таких известных ученых и писателей как Д. Голдсмит, А. Горбовский, Д. Джохансон, Ф. Дрейк, С. Доул, Ю. Н. Ефремов, С. А. Каплан, Н. С. Кардашев, А. Кларк, А. Н. Колмогоров, В. И. Котельников, Ст. Лем, Л. В. Лесков, П. В. Маковецкий, Н. И. Моисеев, А. Д. Панов, Н. Т. Петрович, У. Саливан, Дж. Тартер, В. С. Троицкий, Т. Хейердал, С. Хокинг, С. фон

Хорнер, Н. Хоровиц, Су-ШуХуанг, В. Ф. Шварцман, и многие другие. Привлекались материалы проектов поиска ВЦ, бюллетени и вестники научно-культурного центра SETI Российской академии наук, труды многочисленных конференций и симпозиумов по проблеме поиска жизни во Вселенной, сотни статей, размещенных в журналах и Интернете.

Объем книги около 60 печатных листов, 12 глав, предисловие и заключение, более 100 рисунков, 220 библиографических ссылок. Цель книги — ознакомить самые широкие круги читателей с современным состоянием увлекательной проблемы поисков Внеземных Цивилизаций. Хочется верить, что это будет нескучное чтение. Ее издание представляется оправданным еще и потому, что в Украине нет серьезных научно-популярных книг в этой области. Важная задача, которую ставит перед собой автор — вызвать интерес у молодых радиоспециалистов и студентов, которые, может быть, захотят заниматься поисками ВЦ или примут участие в международных проектах, поскольку SETI — это планетарная, а не национальная проблема. Эта книга — приглашение к действию.

Автор выражает глубокую признательность профессору, д. т. н. Е. А. Мачусскому, системному аналитику В. К. Пономаренко, старшему научному сотруднику, к. т. н. В. Т. Белинскому, полковнику, к. т. н. С. Ю. Мазору за участие в обсуждении проблемы SETI, а также многочисленным студентам радиотехнического факультета НТУУ «КПИ» за помощь в сборе материалов.

Пам'яті Віталія Степановича КИСЛЮКА



3 травня 2014 року на 75-му році пішов з життя відповідальний секретар редколегії журналу «Космічна наука і технологія», видатний представник української астрономічної науки, всесвітньо відомий фахівець в галузі селенодезії, динаміки Місяця та астрометрії, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки та Премії НАН України ім. М. П. Барабашова, доктор фізико-математичних наук, професор Віталій Степанович КИСЛЮК.

Віталій Степанович Кислюк народився 20 січня 1940 р. у с. Невіроків Корецького району Рівненської області. Закінчивши в 1957 р. Невірківську середню школу, поступив у Львівський політехнічний інститут (нині Державний універ-

ситет «Львівська політехніка») на спеціальність «астрономо-геодезія» геодезичного факультету. Після закінчення в 1962 р. інституту отримав направлення на роботу в Головну астрономічну обсерваторію (ГАО) АН УРСР (м. Київ), де був зарахований на посаду інженера, а згодом поступив до аспірантури (1965—1968 рр.).

Наукову діяльність В. С. Кислюк розпочав під керівництвом І. В. Гаврилова, який, продовжуючи традиції члена-кор. АН УРСР А. О. Яковкіна, займався вивченням форми, фігури та руху Місяця. В. С. Кислюк відразу включився в роботу зі створення карт місячної поверхні, визначення координат точок і висотних характеристик вибраних ділянок та створення селенодезичної мережі опорних точок на поверхні Місяця. Ці роботи були піонерськими у колишньому Радянському Союзі та згодом були використані для планування і здійснення програм космічних місій «Луна» і «Зонд».

На основі порівняльного аналізу багатьох селенодезичних каталогів В. С. Кислюк запропонував методику їхнього об'єднання в єдиний зведений каталог, вперше використавши малі кути, які визначають взаємні повороти каталожних систем. Він дослідив також питання створення незалежної селенодезичної координатної системи, для чого визначив координати 50 кратерів видимого боку Місяця.

Одночасно, займаючись питаннями селенодезії, В. С. Кислюк зацікавився проблемою визначення параметрів обертання (фізичної лібрації) Місяця. Він запропонував визначати параметри лібрації не з аналізу зміщень центрального

кратера відносно лімба, а відносно мережі кратерів у крайовій зоні Місяця, що дозволило виключити вплив небажаних ефектів, пов'язаних з вимірюванням місячного краю.

Виконаний цикл досліджень В. С. Кислюка склав основу його кандидатської дисертації «Дослідження селенодезичних опорних мереж та спроба побудови незалежної системи», яку він успішно захистив 8 грудня 1970 р. на засіданні Вченої ради Інституту математики АН УРСР. На основі цих досліджень був побудований зведений каталог 2580 точок місячної поверхні. Виданий у 1970 р., цей каталог тривалий час служив математичною основою при картографуванні місячної поверхні та опорою при опрацюванні знімків Місяця, отримуваних за допомогою космічних апаратів. Зведені селенодезичні дані дали змогу також побудувати першу карту висот місячного рельєфу.

В. С. Кислюк, продовжуючи займатись селенодезичними дослідженнями, проаналізував причини виявлених ним деформацій селенодезичних опорних мереж та показав, що найбільша вісь еліпсоїда деформації спрямована у бік Землі. Це стало основою уявлень про те, що причини таких деформацій можуть бути зумовлені недостатнім урахуванням величини стереоефекту, викликаного розмахом лібрації Місяця, та ініціювало ряд оригінальних досліджень деформацій селенодезичних опорних мереж, проведених спільно із професором Казанського університету Ш. Т. Хабібুলліним.

Після того як з'явилась можливість порівнювати наземні каталоги з даними вимірювань з космічного корабля «Аполлон-15», В. С. Кислюк знову повернувся до проблеми деформації селенодезичних опорних систем і показав, що деформації селенодезичних опорних систем можуть бути зумовлені неспівпадінням центра фігури з центром мас Місяця. На той час уже було встановлено, що центр мас Місяця лежить приблизно на 2 км ближче в напрямку до Землі, ніж центр фігури Місяця. Неспівпадіння центра фігури, до якого відносились побудовані раніше опорні мережі, з центром мас, навколо якого відбувається лібрація Місяця, також спричиняє їхню деформацію у напрямку до Землі.

Весь досвід роботи в галузі селенодезії дав змогу київським науковцям узагальнити практично всі відомі на середину 1970-х рр. місячні каталоги та створити зведений селенодезичний каталог, що містить просторові координати 4900 точок видимого боку Місяця (каталог «Київ-4900»). Ця робота увійшла складовою частиною до циклу «Розробка теорії і практична побудова координатних систем для геодинамічних, селенодезичних і космічних досліджень», за який у 1983 р. В. С. Кислюк разом з колективом авторів був удостоєний Державної премії України в галузі науки і техніки.

З ініціативи В. С. Кислюка були продовжені фотографічні спостереження Місяця, що дало змогу визначити параметри орієнтації системи зведеного каталога та отримати уточнене значення середнього нахилу екватора Місяця до екліптики. За даними каталога «Київ-4900» спільно з кафедрою геодезії і картографії Київського державного університету була побудована карта меридіанів Місяця.

Продовжуючи традицію ГАО у вивченні так званої крайової зони Місяця, В. С. Кислюк виконав аналіз профілів західної частини зворотного боку Місяця за даними КА «Зонд-8» та підтвердив наявність висотної депресії на невидимому боці Місяця, виявленої раніше за даними КА «Зонд-6». Ця западина глибиною близько 6 км відносно середнього радіуса Місяця простягається принаймні на 1000 км. Майже через 20 років по тому за даними КА «Клементина» ця западина була детально вивчена. Згодом В. С. Кислюк досліджував також профілі східної частини зворотного боку Місяця, використовуючи для цього знімки «Аполлон-11».

Зважаючи на те, що знімки «Зонд-8» мають незвичний для земного спостерігача ракурс, деякі з них В. С. Кислюк використав також для уточнення положення кратерів видимого боку в напрямку до Землі. Це важливо також з точки зору вивчення деформацій селенодезичних опорних мереж, які найбільше проявляються саме в цьому напрямку.

Залучення даних, отриманих за допомогою космічної техніки, дало змогу перейти до вивчення глобальної фігури Місяця. В. С. Кислюк

виконав велику роботу із узагальнення всіх наявних на першу половину 1980-х рр. даних про абсолютні висоти на всій поверхні Місяця. В результаті була створена узагальнена система абсолютних висот, що об'єднувала наземні селенодезичні каталоги, фотограмметричні опорні мережі і профілі, побудовані за даними космічних апаратів, результати радіопрофілювання Місяця та ін. За даними узагальненої системи висот геометрична фігура Місяця була апроксимована тривісним еліпсоїдом, а детальний аналіз системи висот дав змогу вивчити особливості глобальної фігури Місяця, зокрема, стосовно її асиметрії.

Згодом був проведений гармонічний аналіз даних про абсолютні висоти Місяця — розклад рельєфу в ряд по сферичних функціях до 16-го степеня. За даними останньої моделі була побудована гіпсометрична карта Місяця, яка згодом була включена у відомий «Атлас планет земної групи і їх супутників». Пізніше за цією ж методикою було виконано гармонічний аналіз топографії Марса до 24-го степеня. Крім того, В. С. Кислюк проаналізував понад 30 моделей гравітаційного потенціалу Місяця, побудованих за даними американських та радянських космічних апаратів, а також лазерної локації кутикових відбивачів, встановлених на Місяці і даних довгобазисної радіоінтерферометрії. Результатом цієї роботи стала узагальнена система динамічних параметрів Місяця. Особливу увагу у цій системі приділено визначенню орієнтації еліпсоїда інерції Місяця, бо з цим пов'язане питання вибору координатної референц-системи на Місяці. Осі такої системи (її називають динамічною) повинні збігатись з головними осями інерції Місяця, і раніше вважалося, що найбільша з цих осей віднесена до середнього напрямку на Землю (В. С. Кислюк запропонував називати таку систему квазідинамічною). Проте з нових даних випливало, що осі динамічної системи координат не збігаються з осями квазідинамічної координатної системи. Ця обставина, а також достовірно встановлений факт неспівпадіння центра мас Місяця з центром його геометричної фігури, загострили питання вибору координатної референц-системи на Місяці.

Працюючи над цими питаннями, В. С. Кислюк запропонував новий погляд на визначення параметрів фізичної лібрації Місяця методом позиційних кутів.

Узагальнення динамічних характеристик Місяця дало змогу визначити кути взаємної орієнтації квазідинамічної і динамічної систем координат та побудувати високоточні моделі селенопотенціалу. Використовуючи ці дані, В. С. Кислюк знайшов, що вісь динамічної системи координат, яка спрямована в бік Землі, відхилена від відповідної осі квазідинамічної системи на $67.6 \pm 0.8''$ у східному та на $78.7 \pm 0.2''$ у південному напрямках.

Цикл селенодезичних досліджень геометричних та динамічних характеристик Місяця склав основу для докторської дисертації В. С. Кислюка на тему «Узагальнена система астрономоселенодезичних сталих», яку він успішно захистив 6 червня 1986 р. на засіданні Спеціалізованої ради ГАО АН УРСР. За цикл праць «Геометричні та оптичні властивості поверхні Місяця» у 1997 р. В. С. Кислюку разом із колективом авторів присуджено Премію НАН України ім. М. П. Барабашова.

До останніх днів свого життя В. С. Кислюк розробляв питання концепції перспективних космічних досліджень Місяця, зокрема вивчав наукові проблеми створення місячної бази.

В 1984 р. В. С. Кислюк був призначений завідувачем відділу фотографічної астрометрії (з 1994 р. відділ астрометрії), одним з основних напрямків наукової діяльності якого на той час було виконання всесоюзної кооперативної програми «Фотографічний огляд неба» (ФОН). Координація цих робіт здійснювалась відповідною робочою групою секції «Астрометрія» Астрономічної ради АН СРСР, керівником якої в 1986 р. став В. С. Кислюк. Завдяки намаганням В. С. Кислюка програма ФОН стала всесвітньо відомою. Про перші результати її виконання В. С. Кислюк доповів в 1985 р. в Пулкові на 23-й астрометричній конференції СРСР, а пізніше, в 1989 р., на Симпозіумі МАС № 141, на якому ним спільно з В. В. Нестеровим і Х. Й. Поттером була висловлена ідея створення оглядового астрометричного каталога 4 млн зір на основі програм

ФОН (північне небо) та ФОКАТ (південне небо) з використанням даних Астрографічного каталога (АК) як першої епохи спостережень.

В 1992 р. проф. Боннської обсерваторії П. Броше (Німеччина) запропонував програму прив'язки системи каталога HIPPARCOS, який створювався в результаті здійснення однойменної космічної місії Європейського космічного агентства, до системи позагалактичних об'єктів методами фотографічної астрометрії. У виконанні цієї спільної програми за умовною назвою «Бонн-Потсдам-Київ» взяла участь і ГАО НАН України. В. С. Кислюк здійснював наукове керівництво київською частиною програми, а згодом став членом робочої групи з опорних систем місії HIPPARCOS і співавтором каталога HIPPARCOS. Участь В. С. Кислюка у здійсненні астрометричного проекту HIPPARCOS як члена робочої групи з опорних систем відзначена у 1997 р. Сертифікатом Європейського космічного агентства.

Наукова робота В. С. Кислюка була тісно пов'язана з підготовкою кадрів, педагогічною та науково-організаційною діяльністю. З 1987 р. він регулярно читав лекції для студентів київських університетів. У 1995 р. йому присвоєно наукове звання професора зі спеціальності «Астрометрія і небесна механіка». Під керівництвом В. С. Кислюка захищено чотири кандидатські дисертації. Серед його учнів — співробітник Центрального Інституту Астрофізики (м. Потсдам) В. Дік. В. С. Кислюк брав участь в роботі атестаційної комісії в цьому інституті із захисту дисертацій В. Діка (1989 р.) і Р.-Д. Шольца (1990 р.) як член комісії і офіційний опонент.

З 1977 р. В. С. Кислюк входив до складу Спеціалізованої ради із захисту дисертацій при ГАО АН України (в 1977—1979 рр. був її першим вченим секретарем). Протягом 1993—1997 рр. він входив також до складу Спеціалізованих рад із захисту дисертацій при Державному університеті «Львівська політехніка» (м. Львів) та при Державному технічному університеті будівництва і архітектури (м. Київ).

В. С. Кислюк провадив велику науково-організаційну діяльність. З 1973 р. він працював на керівних посадах ГАО (вчений секретар, заступ-

ник директора із наукової роботи, завідувач наукового відділу). Основні наукові напрямки відділу астрометрії, яким Віталій Степанович керував у 1984—2002 рр., були пов'язані з побудовою каталогів зоряних даних різного призначення, вивченням кінематики і структури Галактики та астрометрії Сонячної системи. Крім згаданих вище програм ФОН та КСЗ у відділі виконувалась програма МЕГА з вивчення кінематики Галактики. Відділ брав участь у виконанні програм наземного астрономічного забезпечення космічних місій з дослідження комети Галлея, Фобоса та Марса. В. С. Кислюк був науковим співкерівником теми «Ефемеридне та координатно-часове забезпечення космічних місій Марс 94/96». Під керівництвом В. С. Кислюка провадилася велика робота зі створення бази даних про положення Марса і його супутників та положень інших планет, фотографічні спостереження штучних супутників Землі та теоретичні роботи, пов'язані з дослідженням орієнтації координатних систем у космічному просторі. Завдяки професіональним та моральним якостям В. С. Кислюка у відділі панувала атмосфера доброзичливості та творчого пошуку.

В. С. Кислюк — автор близько 150 праць. Серед них 4 монографії, понад 100 наукових та близько 25 науково-популярних статей, присвячених різним проблемам космічних досліджень та сучасної астрономічної науки. Він брав участь у популяризації астрономічних знань у пресі та на телебаченні. З 1977 по 1995 рр. був відповідальним редактором щорічника «Астрономічний календар». Під його редакцією вийшли 5 книг, збірників та монографій. Був членом редколегії міжвідомчого збірника «Астрометрія та астрофізика», з 1991 р. був членом редколегії науково-теоретичного журналу «Кінематика та фізика небесних тел». Із 1995 р. він став відповідальним секретарем науково-практичного журналу «Космічна наука і технологія», до заснування і становлення якого доклав багато зусиль.

В. С. Кислюк брав участь у роботі різних наукових організацій — був членом Міжнародної астрономічної спілки (комісія «Фотографічна астрометрія» та робоча група з оглядів неба), Європейського астрономічного товариства, Укра-

їнської астрономічної асоціації та робочої групи Німецького астрономічного товариства, входив до складу наукової ради з проблеми «Астрономія» НАН України, членом робочої групи «Місяць» секції «Сонячна система» Астроради АН СРСР (з 1988 р. — заступник голови робочої групи), співкоординатором з проблеми «Дослідження динаміки Місяця за даними астрометричних і світлолокаційних спостережень» секції «Астрометрія» Астроради АН СРСР (1979—1990 рр.), а з 1986 р. — керівником всесоюзної програми ФОН в рамках цієї ж секції. У плані координації

робіт із зазначених проблем В. С. Кислюк брав активну участь в організації та проведенні понад 10 тематичних наукових форумів, що проходили в різних наукових центрах колишнього СРСР і СНД, виступаючи на них з ініціативними пропозиціями.

В. С. Кислюк був чудовою людиною, добрим сім'янином та патріотом України. Завжди чуйний, врівноважений, коректний, він здобув велику повагу колег по роботі та безмежну любов рідних, і таким назавжди залишиться у пам'яті всіх тих, хто його знав.