

# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 20  
2(87) + 2014

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

## ЗМІСТ

Короткі повідомлення про виконання у 2013 р. Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр.

*Шибецький В. Ю.* Похибки двоступеневого гіроскопа у напівнатурних умовах гіперзвукового польоту

*Бомбарделлі К., Алпатов А. П., Пироженко А. В., Баранов Е. Ю., Осиновий Г. Г., Закржевський А. Е.* Проект «космічного пастуха» с ионным лучом. Идеи и задачи

*Клюева А. И.* Эффекты понижения интенсивности галактических космических лучей, связанные с высокоскоростными потоками от корональных дыр

*Засуха С. А., Лихолит Н. И., Макаров А. Л., Меленевский Ю. О., Архипов В. Т., Шатихин В. Е.* Криоохладитель Сплит-Стирлинг для фотоприемных устройств

### ДІЯЧІ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ

К 100-летию со дня рождения члена-корреспондента НАН Украины Николая Лукича Голего

### НАШІ АВТОРИ

## CONTENTS

3 Brief reports on the execution of «The Task Comprehensive Space Research Programm of the NAS of Ukraine for 2012—2016» in 2013

52 *Shybetskiy V.* Errors of two-stage gyro in semi-natural conditions of hypersonic flight

55 *Bombardelli C., Alpatov A. P., Pirozhenko A. V., Baranov E. Yu., Osinovyj G. G., Zakrzhevskii A. E.* Project «space sheppard» with ion beam. Ideas and problems

61 *Klyuyeva A. I.* Some effects of decrease in the intensity of galactic cosmic rays which are caused by coronal hole streams

67 *Zasuha S. A., Lykholit N. I., Makarov A. L., Melenevskiy Y. A., Arhipov V. T., Shatikhin V. Ye.* Split-Stirling cryocooler for photo-receptors

### FIGURES OF SPACE AND ROCKET INDUSTRY OF UKRAINE

73 The 100<sup>th</sup> birthday of Corresponding Member of NASU N. L. Golego

### 75 OUR AUTHORS

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

---

Підписано до друку 23.04.14. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс.  
Ум. друк. арк. 7,98. Обл.-вид. арк. 8,38. Тираж 100 прим. Зам. № 3888.

---

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.

---

**КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ**  
**ПРО ВИКОНАННЯ у 2013 р.**  
**Цільової комплексної програми НАН України**  
**з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр.**

**Н а п р я м А**

**Дослідження з проблем динаміки  
космічних апаратів, астродинаміки  
та механіки космічних польотів**

**ПРОЕКТ 1**

**Дослідження особливостей і механізмів  
керування орбітальним рухом КА  
в середовищі, яке проводить струм**

*Інститут технічної механіки  
НАН України та ДКА України*

Наукові керівники:  
доктор технічних наук *В. О. Шувалов*  
доктор технічних наук *А. П. Алпатов*

*Еман І.* «Моделювання динамічних процесів взаємодії КА із штучною магнітосферою та електродинамічної космічної тросової системи з плазмою іоносфери та сонячного вітру».

Визначено вплив кута між вектором індукції власного магнітного поля тіла і вектором швидкості потоку розрідженої плазми на зміну сил і коефіцієнтів опору при взаємодії «намагніченого» твердого тіла з надзвуковим потоком розрідженої плазми.

Експериментально досліджено структуру та просторовий розподіл струмів та часток у штучній магнітосфері біля твердого тіла у надзвуковому потоці розрідженої плазми. Показано, що структури просторового розподілу заряджених часток і електричних струмів, близьких до моделі Чепмена — Ферраро, характерні для «порожньої» магнітосфери. Коректність вимірювань

розподілу токів та заряджених часток плазми у модельному експерименті підтверджено відповідністю двопікових структур штучної магнітосфери просторовому розподілу електронів у авроральних піках високоширокої іоносфери на орбіті КА «Січ-2».

Експериментально обґрунтовано можливість керування рухом «намагніченого» твердого тіла за допомогою «магнітного паруса». Показано, що в гіперзвуковому потоці розрідженої плазми може бути реалізовано режими взаємодії «намагніченого» твердого тіла при ненульовій аеродинамічній якості — режим гальмування та режим прискорення при наявності штучної магнітосфери біля поверхні тіла.

Розроблено базові математичні моделі та розрахункові програми для дослідження динаміки електродинамічної космічної тросової системи (ЕДКТС).

Проаналізовано методи розгортання космічної тросової системи (КТС), які вже апробовані у космосі, та розроблено математичну модель з урахуванням ваги троса. Розроблено комп'ютерну програму, яка дозволяє візуалізувати рух троса, що розгортається.

Проаналізовано існуючу модель взаємодії ЕДКТС з іоносферою та магнітосферою Землі і показано її суттєві недоліки, які, на наш погляд, не дозволяють застосовувати ЕДКТС як пасивну систему відведення. Показано необхідність проведення натурних експериментів для визначення взаємодії ЕДКТС з середовищем. На основі відомих зондових моделей взаємодії тіл с кос-

мічним середовищем запропоновано модель для малої експериментальної ЕДКТС та проведено її аналіз.

Запропоновано модель динаміки ЕДКТС, що включає в себе моделі гравітаційних, електродинамічних та аеродинамічних сил та моментів, з урахуванням орбітального та відносного рухів.

Розроблено математичні моделі ймовірності руйнування троса космічним сміттям та розроблено методику оцінки часу виживання троса з урахуванням його механічних властивостей, що дозволяють провадити розрахунки і отримувати оцінки часу неруйнування КТЗ з моноволоконним і двоволоконним тросом.

## ПРОЕКТ 2

**Методи і алгоритми прецизійного робастного управління малими космічними апаратами і їхня реалізація на проблемно-орієнтованих процесорах**

*Інститут космічних досліджень  
НАН України та ДКА України*

Науковий керівник:  
академік НАН України *В. М. Кунцевич*

Одержано математичні моделі керованого кутового руху МКА у вигляді дискретних та неперервно-дискретних ДС з теоретико-множинними моделями завад вимірювання та зовнішніх збурень. Наведено математичні моделі важливих випадків цих ДС — рівнянь керованого кутового руху МКА в фазовому просторі кутів Крилова та компонентів кватерніонів. Запропоновано загальну форму рівнянь вимірювань (спостережень) позиційних координат МКА за допомогою сучасних бортових сенсорів — планетоцентричних та сонячних давачів, давачів напрямків на окремі зірки та магнітометрів. На єдиному методологічному підході, що базується на використанні апарату псевдообернених матриць, запропоновано алгоритми визначення керівних сигналів при керуванні орієнтацією МКА довільно надлишковою системою силових гіроскопів (електродвигунів-маховиків) та електромагнітами, що взаємодіють з магнітним полем Землі. Виконано певну адаптацію алгоритмів гарантованого (еліпсоїдального) оцінювання для використання в системах управління орієнтацією МКА.

Запропоновано також підхід до побудови бортових цифрових обчислювальних комплексів (БЦОК) на ПЛІС фірми АСТЕЛ і власної розробки процесора з редуційним паралелізмом, що дозволяє значно зменшити вартість виготовлення БЦОК та його програмного забезпечення за рахунок ускладнення внутрішньої мови процесора.

Розроблено експериментальне ядро проблемно-орієнтованого процесора на основі кристалів ПЛІС (серії Virtex-4 та Virtex-7 фірми Xilinx) для реалізації алгоритмів керування у форматах даних з плаваючою точкою (одинарної і подвійної точності) і виконано його моделювання. Отримані результати моделювання алгоритмів керування за допомогою розробленого ядра процесора в порівнянні з результатами, отриманими при комп'ютерному моделюванні, з метою дослідження їх працездатності та точності, вказують на їх розбіжність лише в 15 порядку (для формату Double) і в 7 порядку (для формату Single).

## ПРОЕКТ 3

**Розрахункова оцінка вібрацій елементів аерокосмічних систем при силових та аеродинамічних навантаженнях**

*Інститут проблем машинобудування  
ім. А. М. Підгорного НАН України*

Наукові керівники:  
доктор технічних наук *К. В. Аврамов*  
доктор технічних наук *М. Г. Шульженко*

**Етан 1.** «Розробка математичної моделі обтікання оболонки газовим потоком».

Розглянуто аеропружні коливання обтічників ракет-носіїв у надзвуковому газовому потоці.

Проведено аналіз геометрії конструкцій і створено розрахункову схему згідно з даними, представленими Конструкторським бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля. Проведений аналіз показав можливість опису геометрії обтічників ракет-носіїв у вигляді параболічних оболонок постійної товщини. Передбачається, що оболонка здійснює малі коливання біля положення рівноваги. Тому деформації і переміщення вважалися малими, а напруження і деформації є такими, що задовольняють закон Гука. Отримано вирази для кінетичної та потенціальної енергії конструкції з використанням вказаних допущень.

Проведено аналіз кінематики руху ракети-носія для визначення аеродинамічного тиску від потоку газу на пружну поверхню. Розраховано характеристики потоку газу на 30...50 секундах польоту для різних траєкторій. Аналіз характеристик потоку газу показав, що для моделювання поля тиску, що діє на обтічник на 30...50 с польоту, можна застосувати квазістатичну теорію надзвукової течії.

Переміщення обтічників ракетноносіїв при аеропружних коливаннях розклалися по формах власних коливань. Потенційна і кінетична енергії надаються у вигляді квадратичних форм відносно узагальнених координат і швидкостей відповідно. Для отримання рівнянь руху обтічника в газовому потоці застосовуються рівняння Лагранжа другого роду. Для дослідження динамічної стійкості розраховуються характеристичні показники.

**Еман 2.** «Розробка методики розрахунку динамічних процесів в конструктивних елементах КА під дією імпульсних навантажень при розділенні».

Запропоновано дві методики розрахунку динамічних реакцій в елементах конструкцій космічного апарата при короткоімпульсному навантаженні внаслідок спрацювання піропристроїв при розділенні.

Обидві методики розроблено на основі методу скінченних елементів (МСЕ) для тривимірних моделей конструкцій, що дозволяє досліджувати їхні хвильові процеси. Вони мають різні ступені універсальності та швидкодії.

Першу методику побудовано на класичному МСЕ з дискретизацією на восьмивузлові скінченні елементи з полілінійною апроксимацією переміщень. Розроблено алгоритми формування матричних рівнянь руху довільної конструкції адаптера космічного апарата, які розв'язуються за часом згідно з неявною скінченнорізницевою схемою Ньюмарка. Методика є універсальною відносно форми досліджуваних конструктивних елементів, їхньої структури та матеріалів, що використовуються.

Другу методику побудовано на напіваналітичному МСЕ для конструкцій у вигляді тіл обертання, які є типовими для деяких конструктивних елементів ракет-носіїв. Меридіональний пере-

різ дискретизується чотирикутними елементами. Переміщення вузлів в окружному напрямку представляються тригонометричними рядами Фур'є. Це дозволяє привести розв'язання всієї задачі до рішення низки задач, які відповідають окремим гармонікам, що значно скорочує обчислювальні витрати. У порівнянні з першою (більш універсальною) методикою друга має значно кращі показники за швидкістю (на порядок і вище). Розв'язання задачі за часом здійснюється інтегруванням за схемою Ньюмарка.

**Еман 3.** «Математична модель власних коливань обтічника ракети-носія».

Власні частоти і форми коливань визначалися за допомогою методу Релея — Рітца. Для розрахунку частот і форм вирішувалася проблема власних значень. Порівняння результатів для низьких обтічників, отриманих за вказаним та методом скінченних елементів, засвідчують їх близькість.

В області з'єднання обтічника з основною конструкцією спостерігається хвилеутворення в окружному напрямі з великим числом вузлів, а у верхній частині параболоїда вузлів коливань в окружному напрямі немає. Характерною особливістю є те, що інтенсивність коливань вершини параболоїда значно менша, ніж інтенсивність коливань її нижньої частини. Установлено, що при послідовному збільшенні висот параболоїдів їхні власні частоти коливань зменшуються.

Запропоновано постановку задачі аналізу аеропружних коливань обтічників довільної форми на основі скінченноелементної моделі. Для вирішення цієї задачі розробляється скінченноелементна модель, яка буде реалізована у вигляді програми на мові Delphi.

**Еман 4.** «Побудова принципової схеми програмного забезпечення. Розробка основних програмних модулів та графічних інтерфейсів».

Розроблено основи програмного забезпечення за обома методиками, де використано модульний принцип формування програм. Принципова схема програмного забезпечення передбачає взаємозв'язок програмних модулів та відображення загальної логіки обчислень. Розроблено основні програмні модулі обчислення та вхідні і вихідні графічні інтерфейси, в яких передбачається графічне представлення геометрії моделі

та результатів розрахунку переміщень, швидкостей, прискорень і напружень за часом в окремих точках конструкції. Розробку програмних засобів реалізовано за допомогою мови C++.

Вимоги до програмного забезпечення були визначені у взаємодії з фахівцями Конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля і враховані при його створенні. На основі даних, представлених КБ «Південне» щодо конструкції, параметрів і умов навантаження при спрацюванні піропристроїв адаптера ракети-носія виконано комплекс тестових випробувань програмних модулів за обома методиками. Отримано попередні результати для динамічних реакцій адаптера на імпульсне навантаження.

За другою методикою визначено також реакцію оболонкових елементів космічного апарата на імпульсне навантаження.

## Напря м Б

### Дослідження з актуальних проблем природничих наук з використанням космічних засобів і технологій

#### Б. 1. Науки про життя в космосі (біосфера)

##### ПРОЕКТ 4

#### Біоенергетика рослинних клітин в умовах мікрогравітації

*Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України*

Науковий керівник:  
кандидат біологічних наук *В. О. Бриков*

Встановлено, що в стаціонарному контролі зміни ультраструктури мітохондрій в клітинах кори відбуваються у поздовжньому напрямку по ростових зонах кореня, від меристеми до зони диференціювання, та в радіальному напрямку, від епідермісу до ендодерми, яка є внутрішнім шаром кори, прилеглим до центрального циліндра, тобто мітохондрію кореня властива динаміка, обумовлена ростовими процесами та різницею у кількості кисню як субстрату для дихання в різних шарах кори. Одержані детальні дані щодо ультраструктури мітохондрій кореня в контролі дозволили чітко встановити її зміни в умовах модельо-

ваної мікрогравітації, діапазон яких був неоднаковим у різних ростових зонах. Найсуттєвіші зміни ультраструктури органел відбувалися в дистальній зоні розтягу, що підтверджує специфічні фізіологічні властивості цієї ростової зони кореня та, як наслідок, її підвищену чутливість до дії зовнішніх чинників. Мітохондрії в клітинах дистальної зони розтягу зменшувалися в розмірі майже у два рази порівняно з контролем, співвідношення площі крист до площі матриксу значно збільшувалося. Такі зміни свідчать про зміну енергетичного стану клітин і про збільшення енерговитрат саме в дистальній зоні розтягу.

Для молекулярних досліджень було відібрано гени, що кодують елементи електронно-транспортного ланцюга, а саме: *COX2* та *AOX1* гени, що кодують субодиницю II цитохромоксидази та альтернативну оксидазу відповідно. Було показано, що відносний рівень транскриптів *COX2* та *AOX1* суттєво не відрізнявся, що свідчить про відсутність залучення активації експресії генів альтернативної оксидази в адаптивну відповідь мітохондрій рослин на ранніх фазах росту в умовах модельованої мікрогравітації. Таким чином, ми вважаємо, що регуляція функціонального стану мітохондрій у корнях проростків за умов модельованої мікрогравітації здійснюється метаболітами, що безпосередньо регулюють дихання.

За звітний період також було виготовлено та апробовано полярографічну комірку конструкції Шольца та Островського (1975), що повністю задовольняє дослідженні тканинного дихання рослин в стаціонарному контролі та за умов клиностатування.

##### ПРОЕКТ 5

#### Вплив неорганічних наночастинок аналогів місячного та марсіанського ґрунту на нервові закінчення головного мозку та клітини крові: оцінка біомодуючих властивостей та токсичної дії

*Інститут біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України*

Науковий керівник:  
доктор біологічних наук *Т. О. Борисова*

В експериментах з використанням потенціалчутливого флуоресцентного зонду родаміну 6G було показано, що при наявності симулянтів



місячного та марсіанського пилу нервові терміналі, отримані з головного мозку шурів, що зазнали гравітаційного навантаження, зберігають здатність підтримувати мембранний потенціал. З використанням міченого L-[<sup>14</sup>C]глутамату показано, що в при наявності симулянта місячного пилу в середовищі з низькою концентрацією Na<sup>+</sup> зростає зв'язування L-[<sup>14</sup>C]глутамату з нервовими закінченнями, ізольованими з головного мозку шурів, що зазнали гравітаційного навантаження. Ефект симулянта місячного ґрунту є унікальним у порівнянні з симулянтм марсіанського пилу та наночастинками магнетиту. Методом електронного парамагнітного резонансу показано, що фракції симулянтів місячного та марсіанського пилу з магнітними властивостями не зв'язуються з синапсосомами, тобто підвищення зв'язування глутамату з синапсосомами у при наявності симулянтів не пов'язано з компонентами пилу, які мають магнітні властивості.

Таким чином, за умов гіпергравітації місячний пил порушує гомеостаз глутамату, підтримання якого є вкрай важливим для правильної синаптичної передачі. У довгострокових місіях поєднання умов зміненої гравітації з постійним контактом з частинками пилу можуть посилити його токсичну дію.

## ПРОЕКТ 6

### Дослідження впливу мікрогравітації на фізико-хімічні властивості цитоплазматичної мембрани рослинних клітин («МЕМБРАНА»)

*Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України*

Науковий керівник:

член-кореспондент НАН України *Є. Л. Кордюм*

Відповідно до завдань першого етапу роботи відпрацьовано методи одержання фракцій цитоплазматичної мембрани з коренів та епікотилів проростків гороху та аналізу її чистоти. Для визначення складу ліпідів, насичених і ненасичених жирних кислот (індекс ненасиченості), текучості (мікрров'язкості) цитоплазматичної мембрани проростків гороху та інтенсивності перекисного окислення ліпідів в стаціонарних умовах росту та під впливом модельованої мікрогравітації (клиностакування) проведено

9 експериментів (9 біологічних повторів) на горизонтальних клинотатах (2 об/хв). Фракцію цитоплазматичної мембрани виділяли з коренів та епікотилів 6-добових етіолованих проростків гороху сорту Берсек методом двофазної водно-полімерної системи, що був оптимізований саме для гороху, із використанням центрифуги Optima L-90K. Визначення складу ліпідів (гліколіпіди, фосфоліпіди, тригліцериди, стерини), насичених і ненасичених жирних кислот у фракції цитоплазматичної мембрани проводили за допомогою високоефективної рідинної хроматографії на системі Angilent 1100 (Німеччина). Інтенсивність спонтанної хемілюмінесценції визначали за допомогою хемілюмінометра ХЛМ1Ц-01.

Встановлено, що фракції цитоплазматичної мембрани, виділені з епікотилів та коренів проростків гороху стаціонарного контролю відрізнялися за вмістом різних класів ліпідів, серед яких переважали фосфо- та гліколіпіди, та за вмістом визначених ненасичених і насичених жирних кислот таким чином, що індекс ненасиченості (відношення ненасичених жирних кислот до насичених) був вищим у фракції, виділеної з епікотилів.

Виявлено чутливість до модельованої мікрогравітації досліджуваних показників біліпідного шару цитоплазматичної мембрани, що проявлялося у зниженні або збільшенні загального вмісту різних класів ліпідів, а також вмісту окремих фосфоліпідів та жирних кислот, стеринів тощо, причому ступінь чутливості був вищим для цитоплазматичної мембрани клітин коренів порівняно з такою цитоплазматичної мембрани клітин епікотилія. Наявна різниця закономірно пояснюється відмінностями у структурі, типах клітин, рості та специфічних функціях кореня та епікотилія, які у кореня є набагато складнішими. Внаслідок певного балансу між збільшенням або зменшенням ненасичених і насичених жирних кислот в умовах клиностакування індекс ненасиченості був подібним до такого в контролі, що підтримує текучість цитоплазматичної мембрани в стаціонарних межах і розглядається як ознака адаптації. Вперше встановлено суттєве збільшення в цитоплазматичній мембрані вмісту стеринів: удвічі в мембрані епікотилія та

майже у чотири рази в мембрані кореня порівняно з контролем. Стерини, як відомо, разом з глікофінголіпідами та фосфоліпідами з переважно насиченими жирними кислотами входять до складу «рафтів» — певних доменів мембрани, де ліпідний бішар знаходиться у щільному високо упорядкованому стані. Оскільки рафти включають білкові комплекси, необхідні для сприйняття та передачі зовнішніх сигналів, захисту від стресів, патогенезу, везикулярного транспорту тощо, значне збільшення стеринів під впливом кліностатування може вказувати на зміни у проникності мембрани та активності відповідних білків.

Рівень спонтанної хемілюмінесценції (показник інтенсивності переокисного окислення ліпідів) збільшувався в умовах кліностатування на 17—24 % в зоні кореневого чохла, меристеми та розтягання порівняно з контролем, залишаючись в зоні диференціювання на одному рівні з контролем, що підтверджує наш висновок щодо найбільшої чутливості до мікрогравітації клітин, які знаходяться в активному фізіологічному стані.

Підготовлено зразки для визначення текучості цитоплазматичної мембрани за допомогою електронного парамагнітного резонансу. Дослідження буде проведено у грудні у зв'язку із затримкою поставки відповідних реактивів фірмою-постачальником.

## ПРОЕКТ 7

### Експеримент «BIOMEX» на міжнародній космічній станції

*Інститут молекулярної біології і генетики НАН України*

Науковий керівник:

кандидат біологічних наук *Н. О. Козировська*

У 2013 р. було заплановано виготовлення біомінеральних зразків для BIOMEX, запланованих для експонування на МКС у 2014 р. за новим протоколом, виробування та аналіз нових зразків у Кельні (DLR) у SVT (науковий перевірений тест). Модифікацію протоколу зроблено, враховуючи нове додаткове завдання у міжнародному експерименті BIOMEX, яке стосується дослідження бактерійної целюлози (БЦ) як ймовірного біомаркера живого у стресових умовах

відкритого космосу. Вивчення діагенезу полімеру БЦ у контакт з мінеральними зразками необхідне для підтвердження гіпотези літопанспермії (Arrhenius, 1908).

Бактерійна целюлоза є матрицею для формування біоплівки, яка має вирішальне значення для виживання і персистенції мікробів у жорстких умовах. БЦ може відігравати значну роль у формуванні мікробних біоплівок у незайнятих нішах в екосистемах на Землі, а також не виключене розповсюдження БЦ мікробного походження у Всесвіті. Основною метою даного дослідження є визначення того, якою мірою спектральні та інші характеристики БЦ зазнали зміни при взаємодії із земною гірською породою — анортозитом — за допомогою мікроорганізмів у нормальних та імітованих стресових умовах додаткових випробувань. *Спектральні аналізи* (ІЧ-фур'є-спектроскопія та атомно-абсорбційна спектроскопія) показали безпрецедентне накопичення хімічних елементів, які вивільнюються мікроорганізмами, у сформованій БЦ. Абсорбційна здатність БЦ на ІЧ-спектрах була частково екранована мінеральною кіркою, утвореною мінералами за допомогою мікроорганізмів на поверхні БЦ, що особливо помітно на ІЧ-спектрах в діапазоні 1200—900 см<sup>-1</sup>. *Конфокальна лазерна сканувальна мікроскопія* показала, що вилучені з анортозиту елементи утворюють покриття на поверхні наноплівки БЦ. У той же час коливальні спектральні смуги показали наявність характерної області аномерних атомів вуглецю (960... 730 см<sup>-1</sup>), де смуга при 897 см<sup>-1</sup> підтвердила присутність β(1,4)-зв'язків, які можуть бути маркерами целюлози. Результати показують, що БЦ може бути біомаркером для пошуку ознак живих організмів, оскільки є поширеним і стабільним біополімером, який хоча діагенетично змінюється, усе ж зберігає характерні фінгерпринти.

Зразки, отримані за новим протоколом, пройшли два етапи випробування у Німецькому аерокосмічному центрі (Кельн) в умовах, наближених до умов відкритого космосу або Марса. Попередні дані аналізу зразків свідчать про виживання мікроорганізмів (бактерій і дріжджів) в імітованих умовах; провадяться вимірювання ІЧ- та раманівських спектрів БЦ.



## ПРОЕКТ 8

### Особливості формотворчих процесів мохів в умовах гравітації та невагомості

Інститут екології Карпат НАН України

Науковий керівник:

кандидат біологічних наук О. В. Лобачевська

**Еман 1.** «Аналіз гравічутливості мохів на різних стадіях онтогенезу».

Проаналізовано вплив світла і гравітації на форму протонемної дернини *Tortula modica*, *Leptobryum pyriforme*, *Bruum pseudotriquetrum*: галузнення і кут нахилу бокових галузок відносно ортотропної осі росту материнської клітини. Встановлено, що одно- і протилежно направлена векторна дія світла і гравітації посилює галузнення, і навпаки, перпендикулярно орієнтовані вектори обох чинників послаблюють формування галузок. Кут нахилу бокових галузок гравітропної протонемі здійснюється у два етапи: індукція світлом робить клітини метаболічно активними, але нечутливими до гравітації, і стінка дочірньої клітини росте перпендикулярно до осі материнської клітини; лише після цього напрям росту набуває залежності від гравітації, фіксованої просторової орієнтації. На світлі протонема також галузиться під кутом 45—50° до осі головного столону, внаслідок чого фенотип протонемної дернини багатьох видів мохів стає подібним. Ріст бокових гілок і кут їхнього нахилу зрівноважується дією сили тяжіння та світла і контролюється ендогенно — автотропним ростом. Ці три чинники взаємодіють в індивідуальному розвитку рослин й визначають їхній габітус у природних умовах.

Проаналізовано гравічутливість гаметофіту декількох видів мохів і на прикладі двох форм *B. pseudotriquetrum* встановлено, що екологічні умови призводять до зміни гравічутливості на різних стадіях онтогенезу. Показано, що підвищення гравівідчуття на стадії гаметофорів у життєвій стратегії арктичної форми *B. pseudotriquetrum* є проявом механізму забезпечення ростових рухів та вегетативного розмноження (утворення виводкових бульбочок на пагонах, а не на протонемі) у стресових умовах короткого вегетаційного періоду Арктики.

Досліджено вплив теплового стресу на гравічутливість космополітного моху *Bryum argenteum* Hedw. і встановлено, що стійкість гравітропної реакції на різних стадіях онтогенезу моху підвищується від протонемі до гаметофорів. В умовах теплового стресу гравічутливість *B. argenteum* залежить від активації окиснювальних процесів, яка проявлялася в ефективнішому інгібуванні ліпопероксидації та окисної модифікації білків у гаметофорах, порівняно зі споровою протонемою, що, очевидно, сприяло швидшому післястресовому відновленню гравітропізму гаметофорів.

Визначено динаміку пероксидазної активності у пагонах *B. argenteum* в умовах клиностаткування. Встановлено кореляційну залежність між підвищенням активності гваяколпероксидази та збільшенням тривалості впливу зміненої гравітації, що може бути зумовлене як наростанням процесів вільнорадикального окислення, так і пристосуванням гаметофітної стадії до зміни вектора сили гравітації.

Встановлено стимулювальну дію гравітації на вегетативне розмноження та формування виводкових тілець *Leptobryum pyriforme* і активацію спірального росту, яку дотепер виявлено лише для декількох видів мохів. Як гравічутливий модельний вид-об'єкт з високою швидкістю росту та розвитку *L. pyriforme* можна рекомендувати для з'ясування ролі гравітації у розвитку мохоподібних.

## ПРОЕКТ 9

### Клітинні механізми гравітаційно-залежних процесів кісток скелета в умовах мікрогравітації

Інститут зоології ім. І. І. Шмальгаузена НАН України

Науковий керівник:

доктор біологічних наук Н. В. Родіонова

**Еман 1.** «Підготовка та постановка експериментів на тваринах, дослідження гравітаційно-залежних змін в клітинах, що диференціюються та в остеocyтах кісткової тканини».

*Гістоструктурні перебудови в кістках скелета піддослідних тварин в умовах гіпокінезії і мікрогравітації.*

Гістологічними дослідженнями встановлено, що в метафізах стегнових кісток щурів при довготривалій гіпокінезії (модельована мікрограві-

тація) має місце стоншення та зменшення кількості кісткових трабекул, їхнє часткове розсмоктування, виявлено зони резорбції та розширення міжтрабекулярних просторів в деяких зонах метафізу. Морфометричний аналіз показав зменшення питомого об'єму кісткових трабекул та збільшення питомого об'єму порожнин, особливо у проксимальних метафізах.

При мікрогравітації «Біон-11» в кістковій тканині гребня клубової кістки збільшується питома площа остеоцитарних лакун, достовірно зменшується кількість остеоцитів, що функціонують, збільшується кількість порожніх остеоцитарних лакун. В кістковій тканині виявлені зони розширення та порожнини.

Отримані дані свідчать про зниження кісткової маси в досліджених кістках в умовах гіпокінезії і мікрогравітації.

*Особливості ультраструктури остеоцитів в зонах адаптивних і деструктивних перебудов у кістках піддослідних тварин в умовах мікрогравітації.*

Встановлено, що в умовах мікрогравітації («Біон-11») в кістковій тканині клубової кістки мавп зростає кількість остеоцитів з ознаками апоптозу, що призводить до появи порожніх лакун, а також зростає кількість остеолізуючих остеоцитів. Скануюча електронна мікроскопія показала, що при мікрогравітації в кістковій тканині реєструються остецити з ознаками руйнування, має місце поява мікротріщин і щілин. В кістковій тканині виявлені зони фіброзу і демінералізації кісткового матриксу.

Отримані дані свідчать, що умови космічного польоту призводять до посилення в кістковій тканині процесів остеоцитарного остеолізу, що лежить в основі розвитку у ній деструктивних змін, появи зон «прозорості».

Таким чином, результати дослідження доводять, що остецити відіграють значну роль у втраті кісткової тканини в зонах адаптивного ремоделювання кісткових структур і в розвитку остеопоротичних змін в кістковому скелеті при гіпокінезії, і особливо при мікрогравітації.

Особливості ультраструктури стромальних і периваскулярних клітин, що диференціюються в зонах деструктивних перебудов в умовах моделюваної мікрогравітації.

З використанням методів електронної мікроскопії і цитохімії досліджувались зміни у популяції периваскулярних клітин у стромі кісткового мозку у метафізах стегнових кісток у статевозрілих щурів, що перебували в умовах досліду з моделюванням мікрогравітації протягом 28 діб.

Встановлено, що, як у контролі, та і в досліді, при зниженні опорного навантаження у зонах адаптивного ремоделювання популяція периваскулярних клітин неоднорідна. Вона включає малодиференційовані форми, що прилягають до ендотелію, та клітини, що відокремлюються з ознаками фібробластичного диференціювання (у цитоплазмі збільшується питомий об'єм гранулярної ендоплазматичної сітки). Більшість периваскулярних клітин в контролі виявляють реакцію на лужну фосфатазу (маркер остеогенного диференціювання). У малодиференційованих клітинах реакція реєструється в ядрах, ядрі, цитоплазмі. У клітинах, що диференціюються, активність лужної фосфатази виявляється не лише в ядрі і цитоплазмі, але і на зовнішній поверхні цитолемі. На відміну від контролю, у кістках тварин, що перебували в умовах гіпокінезії, реакція на лужну фосфатазу реєструється лише в частині клітин периваскулярної популяції. Простежується також тенденція до зменшення кількості периваскулярних клітин, що відокремлюються і містять лужну фосфатазу (тобто остеогенних клітин-попередників).

Виявлена нами тенденція до зменшення у популяції периваскулярно розташованих клітин стромі кількості остеогенних клітин-попередників, що диференціюються, є одним з механізмів зниження інтенсивності остеогенетичних процесів у кістках у зв'язку зі зменшенням опорного навантаження на кістковий скелет. Це зокрема підтверджується тим, що в зонах адаптивного ремоделювання на кісткових поверхнях з'являються фіброласти і зони фіброзу — ділянки, заповнені колагеновими фібрилами, які не мінералізуються. Слід вважати, що зниження опорного навантаження уповільнює (чи блокує) остеогенне диференціювання частини периваскулярних клітин і стимулює диференціювання фібробластичних клітин.

## **Б. 2. Космічні аспекти наук про Землю (геосфера)**

### **ПРОЕКТ 10**

#### **Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів**

*Інститут радіофізики і електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України*

Науковий керівник:  
доктор фізико-математичних наук *В. І. Луценко*

1. Запропоновано нові підходи для опису нестационарних негаусівських процесів. Експериментально показано, що щільність розподілу коефіцієнта заломлення впродовж сезону в більшості випадків задовільно описується локально гаусівською моделлю. Вперше показано можливість використання атомарних функцій Кравченко — Рвачова для опису щільності розподілу коефіцієнта заломлення впродовж сезону. З використанням напівмарківських вкладених процесів створено імітаційну модель коефіцієнта заломлення тропосфери, яка враховує його нестационарний характер впродовж року.

2. Запропоновано використовувати кути радіозаходів та радіосходів супутників ГНСС для діагностики тропосферної рефракції.

3. Встановлено залежність рівня флуктуацій обчисленої псевдодальності та висоти від наявності на трасі поширення ГНСС-сигналу зон дощу.

4. Розроблено модель функції відображення зенітної тропосферної затримки, яка враховує рівень тропосферної рефракції. Її використання дозволяє знизити похибки визначення псевдовідстаней до супутників при малих кутах місця (до 2°) з 10 до 2 м. Модель може використовуватись для вирішення зворотної задачі — оцінки тропосферної рефракції на трасі поширення по вимірних значеннях поправки псевдовідстані.

### **ПРОЕКТ 11**

#### **Методика і апаратне забезпечення дослідження атмосферного аерозолі та валідації супутникових досліджень аерозолі та озону в атмосфері Землі — проект наземної підтримки космічного експерименту «Аерозоль-UA (NAS)»**

*Головна астрономічна обсерваторія НАН України*

Науковий керівник:  
доктор фізико-математичних наук *В. К. Розенбуш*

1. Підготовлено проект науково-технічного обґрунтування космічного експерименту (КЕ), зокрема обґрунтовано вибір в якості основного приладу КЕ сканувальний поляриметр СКАНПОЛ і в якості допоміжного — багатоканальну панорамну камеру ПАНКАМ.

Розглянуто запропоновану КП СПБ «Арсенал» альтернативну концепцію поляриметра без рухомих частин, показано неможливість її використання для досягнення цілей і завдань КЕ. Підготовлено проект технічного завдання на «Розробку комплексу наукової апаратури КЕ «Аерозоль-UA», в якому сформульовано основні вимоги до поляриметра СКАНПОЛ, що забезпечують оптимальне вирішення задач КЕ.

Розглянуто декілька альтернативних варіантів реалізації панорамної камери, запропонованих КП СПБ «Арсенал», ДНДП КОНЕКС і ГАО НАН України, і сформульовано уточнені вимоги до ПАНКАМ у двох варіантах: оптимальному і мінімальному.

Спільно з ДКБ «Південне» попередньо узгоджено ресурсні обмеження для елементів комплексу наукової апаратури (КНА), запланованого для розміщення на космічному апараті на основі платформи МС-2-8.

2. Удосконалено раніше розроблену (на попередньому етапі Договору) оптичну схему сканувального поляриметра СКАНПОЛ. Проведено розрахунок декількох варіантів оптичної системи при використанні світлоприймачів різних типів. Зроблено висновок про неможливість використання одиночних фотодіодів в металевих корпусах і необхідності застосування безкорпусних або двокомпонентних фотодіодів. Розраховано допустимі похибки виготовлення і юстирування оптичних елементів СКАНПОЛ, проведено

енергетичний розрахунок для СКАНПОЛ з урахуванням розрахованого пропускання оптичного тракту і характеристик попередньо обраних світлоприймачів.

3. Підготовлено конструкторську документацію макетного зразка дзеркальної сканувальної системи (ДСС), яка призначена для передачі сонячного випромінювання, розсіяного досліджуваними ділянками системи атмосфера — поверхня, на вхідні отвори всіх оптичних блоків одночасно. Система складається з пари дзеркал, що обертаються навколо осі вхідного отвору оптичних блоків. Дзеркала утворюють поляризаційно-нейтральну комбінацію, частота їхнього обертання від 30 до 60 об/хв в площині орбіти КА (точне значення частоти визначається висотою орбіти). Кутівий діапазон сканування  $\pm 60^\circ$  від надира.

Виготовлено макетні зразки оптичних елементів системи сканування поляриметра СКАНПОЛ (за Договором з НДІ КраО). Виготовлено механічні деталі й вузли макета ДСС.

Розроблено концепцію контрольно-вимірювального стенду для дослідження оптичних характеристик ДСС на базі динамічного мюллер-поляриметра на основі обертових фазових пластин видимого та ІЧ-діапазонів. Виготовлено оптичні та механічні деталі й вузли стенду, розпочато його встановлення та налагодження на базі лабораторії космічного приладобудування ГАО НАН України.

4. Розроблено концепцію і принципи побудови вимірювачів світлових потоків для поляриметра СКАНПОЛ. Розроблено принципові схеми та виготовлено макетні зразки електронно-оптичних вузлів СКАНПОЛ: фотодіоди видимого та ІЧ-діапазонів з високочутливими трансїмпедансними підсилювачами (за Договором з ЛЦ ІКД ДКАУ—НАНУ).

5. Аналіз даних спільних наземних і супутникових вимірювань дозволяє отримувати оцінки фізичних параметрів аерозолу і проводити валідацію (оцінку точності) та калібрування параметрів супутникової апаратури. Для цього було розроблено методику порівняння наземних і супутникових результатів синхронних (одночасних або квазіодночасних) вимірювань оптичних

характеристик аерозолу в атмосфері Землі супутниковим приладом СКАНПОЛ з наземним сонячним фотометром мережі AERONET. Розроблена методика визначає мету і порядок порівняння вибраних фізичних характеристик аерозолу та оцінювати точність супутникових даних, регламентує вимоги до основних процедур і засобів наземних дистанційних вимірювань, встановлює порядок виконання вимірювань, обробки та аналізу отриманих даних і форму представлення результатів.

6. Необхідною умовою успішності КЕ є максимальна інформативність отримуваних даних з борту КА. Для її досягнення необхідно розробити схему взаємодії передачі даних наукової інформації (канал X-діапазону) з даними телеметрії (канал S-діапазону), визначити віртуальне середовище, розробити концепцію зберігання даних та концепцію обробки даних. Проведено аналіз всіх цих складових і підготовлено відповідні рекомендації. Використання віртуального середовища дозволить прискорити процес інтеграції та зумовить економічну вигоду для проекту. Застосування документно-орієнтованої бази даних для зберігання результатів вимірювань КА дає додаткові можливості для слабкоструктурованого типу даних. Впровадження кластерного сховища шляхом перенесення виконавчого коду до даних, а не навпаки, дозволить обробляти великі обсяги даних. Можливість горизонтального масштабування надасть можливість поступового нарощування обсягів та потужностей. Проте невизначеність вибору схеми ПАНКАМ зумовлює невизначеність можливих обсягів отримуваних даних.

7. Проведено аналіз відомих методів отримання характеристик аерозолу на основі обробки дистанційних наземних і супутникових ширококутових і мультиспектральних поляриметричних вимірювань. Ці алгоритми використовують статистичну оптимізацію для знаходження максимального збігу між промодельованим полем випромінювання і спостережним з урахуванням похибок обох методик. Ефективне використання такого підходу вимагає певної надмірності даних, яке буде забезпечено вимірюваннями поляриметра СКАНПОЛ параметрів Стокса  $I$ ,  $Q$  і



$U$  з більш ніж 200 кутів розсіяння для кожного пікселя на поверхні і 6 спектральними каналами. Необхідно враховувати, що не всі вимірювання є незалежними. Багатоканальна панорамна камера з високою просторовою роздільною здатністю дає можливість отримувати незалежні оцінки хмарної складової та оцінки певного набору параметрів аерозолю поза смугою сканування поляриметра. Останні дослідження підтверджують можливість отримання аерозольних параметрів у присутності хмари при ширококутових і мульти-спектральних поляриметричних вимірюваннях.

8. Розроблено веб-сторінку KE «Аерозоль-UA», яка наразі поповнюється:

<http://aerosol-ua.mao.kiev.ua/index.php/ru/>

## ПРОЕКТ 12

### Дослідження впливу сонячної активності на гідрометеорологічні й гідрофізичні процеси в регіоні Чорного моря

Морський гідрофізичний інститут НАН України

Науковий керівник:  
академік НАН України В. О. Іванов

**Еман 1.** «Дослідження часової мінливості індексу Північноатлантичного коливання, полів приземного вітру, зимової поверхневої температури й холодного проміжного шару Чорного моря в роки парного й непарного циклів сонячної активності на масштабах від квазідвадцятирічного до сезонного».

1. Проведені дослідження по виявленню статистичних зв'язків показників сонячної активності з індексом великомасштабної циркуляції атмосфери в Атлантико-Європейському регіоні — Північноатлантичного коливання.

Відповідно до поставленої задачі були зроблені оцінки мінливості індексу циркуляції атмосфери — Північноатлантичного коливання (індексу ПАК) на масштабах від квазівікового до сезонного. Вихідним матеріалом для таких оцінок послужили ряди інструментальних спостережень за індексом ПАК з 1868 по 2005 рр., а також ряд чисел Вольфа ( $W$ ). Виявлено, що в роки вікового мінімуму  $W$  (1868—1933 рр.) індекс ПАК приблизно удвічі перевищує своє значення в роки вікового максимуму  $W$  (1934—2008 рр.). У роки

парного циклу сонячної активності значення  $W$  менше, ніж у роки непарного циклу сонячної активності. Індекс ПАК у роки парного циклу сонячної активності приймає більші значення, ніж у роки непарного циклу. У такий спосіб реалізується квазідвадцятирічний цикл мінливості індексу ПАК. Виявлено добре виражену міжрічну мінливість індексу ПАК, що суттєво відрізняється в роки парного й непарного циклів сонячної активності. У сезонній мінливості індексу ПАК спостерігаються його максимальні позитивні значення взимку парного циклу сонячної активності і максимальні негативні значення взимку непарного циклу. В інші сезони року як парного, так і непарного циклу індекс ПАК змінюється у межах кліматичної норми.

2. Досліджено реакцію полів приземного вітру в регіоні Чорного моря на коливання характеристик сонячної активності. Для цього було зроблено вибірку поля приземного вітру з результатів регіонального атмосферного реаналізу за 2000—2013 рр. Реаналіз виконувався з використанням мезомасштабної атмосферної моделі MM5 із горизонтальним просторовим розрізненням моделі  $18 \times 18$  км та 23 рівнями по вертикалі. Як граничні умови на границі Чорноморського регіону використовувалися результати оперативного прогнозу NCEP/NCAR із просторовим розрізненням  $1 \times 1^\circ$ , а також температура поверхні Чорного моря з архіву супутникових вимірів температури OISST за ці ж роки. Обрані дані по полю вітру були розділені на дві групи, що відповідають парному й непарному циклам сонячної активності. Для кожної групи були визначені характеристики просторової структури поля вітру в Чорноморському регіоні.

3. Досліджено особливості просторової структури поля температури води Чорного моря в зимовий сезон в залежності від парності циклів сонячної активності. На основі даних спостережень проведено аналіз статистичних зв'язків термічної структури вод Чорного моря в зимовий сезон із характеристиками сонячної активності. Основними матеріалами послужили дані океанографічних зйомок (для сучасного періоду — буї-профілевимірювачі й поверхневі дрефтери), також були використані супутникові дані



про температуру поверхні моря та дані берегових гідрометеостанцій. На основі цих матеріалів проведено реконструкцію термохалінної структури моря (реаналіз середньомісячних полів) із високим просторовим розрізненням за період 1923—2012 рр.

Загальний характер змін температури в Чорному морі за 100-річний період спостережень є циклічним процесом при загальній тенденції до потепління. Виявлено два холодних періоди: із середини 1920-х до кінця 1950-х років і з початку 1980-х до кінця 1990-х років; і два теплих періоди: 1960—1980-ті роки і сучасний етап, що розпочався наприкінці 1990-х років. Інтенсивність зимової конвекції відіграє провідну роль у низькочастотній мінливості теплозапасу моря, тому що аномалії холодного проміжного шару (ХПШ) простежуються майже у всьому шарі постійного пікноклину. Найбільш виражені мінімуми теплозапасу, такі як в 1980—1990-х роках і наприкінці 1920-х — початку 1930-х років, виникають після того як декілька холодних зим відбуваються підряд одна за однією.

Виявлено загальну тенденцію до більшого охолодження поверхні моря у парні цикли сонячної активності й до протилежного процесу у непарні цикли. Це також характерно й для екстремальних явищ: найбільш інтенсивне відновлення вод ХПШ в 1929, 1954, 1976, 1991—1993 роках відбувалося під час парних циклів сонячної активності. Виключенням із загальної тенденції є непарний цикл 1977—1986 років, у середині якого почався період значного охолодження діяльного шару Чорного моря. Ще однією особливістю даного непарного циклу є те, що його початок збігся з глобальним кліматичним зсувом 1976—1978 років.

4. Проведено дослідження зв'язків характеристик мінливості рівня Чорного моря в зимовий сезон із показниками сонячної активності. Рівень моря є важливим кліматичним сигналом, що відображує глобальні зміни в навколишній середовищі й, зокрема, зміни динамічних характеристик регіону. В останні роки у зв'язку з розвитком супутникової альтиметрії з'явилася можливість вивчати просторові зміни рівня моря не тільки у прибережній, але й у відкритій частині

Чорного моря, що дозволяє розраховувати геострофічні швидкості течій. Основним фактором, що впливає на формування структури поверхневих течій й інтенсивність Основної чорноморської течії, є вплив завихореності напруги тертя вітру. Однією з основних причин переваги вітрів циклонічної завихореності над Чорним морем є мусонний ефект. Інтенсивність мусонних вітрів пов'язана з контрастом температур земної й морської поверхні. Термічні контрасти формуються під дією, у першу чергу, сонячної короткохвильової радіації. Через велику теплоємність води й перерозподіл тепла за рахунок турбулентного й дифузійного перемішування море реагує набагато повільніше й м'якше, ніж суша, на підвищення або зниження потоку тепла від сонця. У зимові місяці земля остигає набагато швидше, ніж море. При подальшому зниженні потоків тепла нестійкий верхній шар моря через конвекцію перемішується з нижніми шарами й перерозподіляє тепло по великому шарі вод. Температура морської поверхні практично не зменшується. У той же час земна поверхня продовжує вихолоджуватися. Таким чином, у холодні зими позитивний контраст температури повинен збільшуватися й повинна збільшуватися циклонічна завихореність вітру. У теплі роки відбувається протилежна ситуація, і над басейном спостерігається збільшення антициклонічної завихореності. Аналіз міжрічної мінливості потоку сонячної радіації й завихореності вітру, розрахованих по регіональній моделі ММ5, показав, що ці явища перебувають у протифазі. Таким чином, потік короткохвильової радіації впливає на мінливість інтегральної по домену завихореності вітру. У холодні зими циклонічна завихореність вітру зростає, у теплі зими зменшується.

Для аналізу мінливості динамічних характеристик поверхневого шару моря по альтиметричних вимірах рівня моря була визначена мінливість середньої кінетичної енергії течій у басейні моря. Виявлено, що інтенсивність течій у басейні тісно пов'язана з кількістю короткохвильової сонячної радіації, що надходить до регіону, через механізм мусонного ефекту.

Цікаво дослідити також вплив сонячної активності (циклів) на динамічні характеристики

басейну. Однак, на жаль, у цей час період доступних альтиметричних вимірів аномалій рівня моря занадто короткий (~20 років, тобто менше двох 11-літніх сонячних циклів), що недостатньо для проведення цього аналізу.

### ПРОЕКТ 13

#### Комплексні дослідження геофективних проявів сонячної активності її впливу на екологічну стабільність біогеосистем природно-заповідних територій

Фізико-механічний інститут  
ім. Г. В. Карпенка НАН України

Науковий керівник:  
кандидат технічних наук В. В. Кошовий

**Еман 1.** «Радіоастрономічні спостереження сонячної активності і наземний моніторинг обумовлених нею геофізичних проявів та змін стану компонентів біогеосистеми природно-заповідних територій Західного Полісся».

Організовано і забезпечено проведення неперервного синхронного моніторингу ДКМ-радіовипромінювання Сонця, природного атмосферного АІ та ГЕП.

За 2013 р. зареєстровано і оброблено приблизно 3 Тб інформації, що відповідає ~3000 год записів динамічних спектрів ДКМ-радіосплесків, інтенсивності природного АІ та ГЕП.

Розширено мережу тестових ділянок (до 19) на експериментальних полігонах української частини (Шацький національний природний парк (НПП)) транскордонного біосферного резервату (ТБР) «Західне Полісся», за результатами наземних досліджень на яких отримані кількісні оцінки і виконано картування поширення видів і стану популяцій біоіндикаторів (руді лісові мурашки, сарана, птахи) стану природних екосистем за 2013 р. та за період останнього 11-річного циклу СА, а також отримано розподіли середнього та максимального індексів вегетації ( $NDVI_{avr}$  та  $NDVI_{max}$ ) для території Шацького НПП шляхом обробки даних космічних зйомок цієї території (супутник MODIS) за період 2000—2012 рр. для оцінки динаміки змін зеленої біомаси.

Вибрані основні інформативні ознаки, що характеризують СА та основні фізичні процеси,

що обумовлені сонячними спалахами і супроводжують їх у геліосфері, космічному просторі та геосфері, а також стан біотичних компонентів.

Розширено структуру розробленої авторами реляційної БД і проведено її наповнення експериментальними даними авторів за період 2010—2013 рр. та INTERNET-даними за період 21—24 сонячних циклів.

На основі розроблених методик неперервного синхронного моніторингу ДКМ-радіовипромінювання Сонця, природного АІ та ГЕП і критеріїв виявлення геліообумовлених збурень цих фізичних полів, та за результатами цього моніторингу на природно-заповідних територіях Західного Полісся впродовж 2013 р. радіотелескопом УРАН-3 та іншими розробленими технічними засобами і комплексного аналізу часової мінливості параметрів цих фізичних полів обґрунтовано доцільність уточнення гіпотези про геофективність сонячних подій у ланцюжку «сонячний спалах — КВМ-радіовипромінювання Сонця — сонячний вітер — геомагнітне збурення (ГМЗ)» шляхом доповнення цього ланцюжка такими компонентами як: ДКМ-радіосплески як можливі передвісники геофізичних збурень — атмосферний інфразвук — геоелектричне поле — екологічна стабільність компонентів біогеосистеми. На думку авторів проекту, саме у такому розширеному контексті необхідно розглядати і аналізувати термін «геофективність сонячних подій». ГМЗ, АІ та ГЕП — це основні чинники, що обумовлюють екологічно небезпечний вплив СА на біотичні компоненти біогеосистем. Причому, якщо ГМЗ вже давно визнані в літературі як фактор цього впливу, який інтенсивно вивчається, то вплив природного АІ та ГЕП, особливо його зв'язок з активними процесами на Сонці, поки що мало вивчені, як і вплив цих процесів на екологічну стабільність біотичних та абіотичних компонентів біогеосистеми.

Результати спостережень та їхній аналіз підтвердили, що сонячні хромосферні спалахи можуть мати різні механізми генерації збурень геофізичних полів та мають різну геофективність, яка визначається комплексом факторів, а саме: клас та локалізація спалаху, наявність КВМ і корональних дір, параметри сонячного вітру

та сонячних космічних променів (СКП), стан магнітосфери, іоносфери та атмосфери Землі, причому ймовірність появи ГМЗ значно підвищується у випадку, коли сонячний спалах супроводжується і КВМ-, і ДКМ-радіосплесками II типу, а геофективність процесу СА проявляється у послідовному зменшенні індекса ГМА  $D_{st}$ , у зміні параметрів природного АІ та ГЕП, зокрема у порушенні ритміки добового ходу інтенсивності та перерозподілі частотних компонентів динамічних спектрів цих полів, у збільшенні інтенсивності додаткових їхніх збурень, які слідуєть з різним часовим запізненням після спалаху (від годин до кількох діб) і які стимульовані взаємодією компонентів сонячного вітру і СКП із магнітосферою, іоносферою і верхніми шарами атмосфери, зокрема і у авроральній зоні.

### **Б. 3. Науки про навколоземний космічний простір (іоносфера, магнітосфера)**

#### **ПРОЕКТ 14**

#### **Багатопозиційні іоносферні дослідження для підсупутникового супроводу національних і міжнародних космічних проектів**

*Радіоастрономічний інститут НАН України*

Науковий керівник:  
академік НАН України *Л. М. Литвиненко*

1. Проведено аналіз національних та міжнародних засобів моніторингу навколоземного космічного простору, які можуть бути інтегровані в систему підсупутникового іоносферного моніторингу (СПІМ). Вдосконалено наукову концепцію створення СПІМ та сформульовано її цілі і основні задачі. Запропоновано структуру СПІМ, що складається з національного та міжнародного сегментів. На прикладі харківського кластеру іоносферних обсерваторій розроблено схему їхнього координованого функціонування. Розглянуто структури чотирьох обсерваторій, оцінено об'єми даних спостережень.

2. З метою контролю роботи приймального ННЧ-комплексу на НЧО обсерваторії РІ НАНУ та запобігання несанкціонованого доступу до його автономної частини розроблено та виготов-

лено модуль охоронної синхронізації. Слід відзначити, що згідно до Розпорядження Кабінету Міністрів України № 650-р від 28 серпня 2013 р., Комплекс електромагнітного зондування навколишнього середовища РІ НАН України в с. Мартове визнано таким, що становить об'єкт національного надбання.

3. Для забезпечення синхронної роботи просторово рознесених приймальних ВЧ-комплексів на базі цифрових приймачів WinRadio G-313i, узгодженою з циклограмою функціонування бортових наукових комплексів космічних місій «Іоносат-Мікро» і «Резонанс», створено систему прив'язки пунктів спостереження до світового часу. Слід відзначити, що така модернізація значно розширює можливості діагностичних ВЧ-комплексів, оскільки дозволяє вимірювати час групової затримки пробних сигналів, а відповідно оцінювати відстань до областей їх іоносферного відбиття чи розсіювання.

4. Розроблено методику та створено відповідне програмне забезпечення для попередньої підготовки даних багатопозиційних ГНСС-спостережень різних форматів та створення єдиних баз та методик обробки. Проведено аналіз даних кластеру ГНСС станцій у харківському регіоні за 2012, 2013 роки та визначено сезонні та добові закономірності варіацій повного електронного вмісту (ПЕВ).

5. На прикладі даних вимірювання ПЕВ харківським кластером перманентних ГНСС-станцій обґрунтовано можливість визначення просторово-часових параметрів дрібномасштабних (у кілька десятків кілометрів) неоднорідностей, що спостерігаються в просторових «вікнах»  $100 \times 100$  км. Визначено статистичні характеристики середньомасштабних неоднорідностей з характерними розмірами в кілька сотень кілометрів. Проведено аналіз просторово-часових характеристик квазіхвильових варіацій ПЕВ у регіональному масштабі.

6. Проведено пошук реакції у частоті першого максимуму Шуманівського резонансу (приблизно 8 Гц) на спалахи на Сонці у рентгенівському діапазоні з використанням даних моніторингових ННЧ-вимірювань, які проводились на українській антарктичній станції «Академік Вернад-

ський» за період з січня 2011 по грудень 2012 року. Виявлено, що в момент найбільшого спадажу, балу Х6.9, який відбувся 9 серпня 2011 року о 8:05 UT, спостерігалось різке збільшення частоти першого максимуму в обох каналах. В каналі «північ—південь» частота на протязі всього 10 хвилин зросла на 0.13 Гц, а у каналі «схід—захід» на 0.1 Гц. Другий за потужністю спалах у рентгєнівському діапазоні спостєрігався 7 березня 2012 року. В цьому випадку реакція частоти першого резонансного максимуму теж спостєрігалась, але була більш слабкою.

7. Виконано аналіз добових та сезонних варіацій амплітудних характеристик ВЧ-сигналу станції точного часу і частоти РВМ на частоті 9996 кГц за даними вимірювань, що були отримані на НЧО РІ НАНУ в с. Мартова з серпня 2012 р. по жовтень 2013 р. Для цього було розроблено спеціальний алгоритм, що дозволяє запобігти залежності результатів вимірювань від середньої потужності, що випромінюється передавачем у різних режимах. Виявлено, що з травня по вересень у функції розподілу густини ймовірності амплітуди пробного сигналу спостєрігаються три локальні піки, а з жовтня по квітень — два. Разом з аналізом поведінки доплєрівських зсувів частоти та ширини спектрів це дозволяє припустити, що перший з них (діапазон амплітуд від 30 до приблизно 53 дБ) відповідає розсіюванню на плазмових неоднорідностях, коли частота сигналу є вищою за максимально застосовну (МЗЧ). Другий максимум (діапазон амплітуд від приблизно 53 до 72 дБ) обумовлений дзеркальним відбиттям від Е-шару іоносфєри. І нарешті, третій (амплітуда понад 72 дБ) відповідає дзеркальному відбиттю від F-шару іоносфєри. Таке припущєння побічно підтверджується сезонною залежністю густини ймовірності амплітуди прийнятого сигналу. Взимку Е-шар досить слабкий, і дзеркальне відбиття від нього мало ймовірне. В той же час в літні місяці електронна концентрація в Е-шарі іоносфєри достатньо велика для реалізації механізму дзеркального відбиття від нього.

## ПРОЕКТ 15

### Дослідження електромагнітних резонансних процесів у геокосмосі із синхронним використанням високо- і низькоорбітальних супутникових угруповань

Радіоастрономічний інститут НАН України

Науковий керівник:

член-кореспондент НАН України Ю. М. Ямпольський

**Еман 1.** «Аналіз можливостей проведення синхронних електромагнітних вимірювань в рамках супутникових проектів «Резонанс» та «Іоносат-Мікро».

У розділі розроблення нових методик багатопозиційної реєстрації та синхронної обробки магнітометричних даних проведено аналіз варіацій магнітного поля, що вимірювались у трьох пунктах Харківської області fluxgate-магнітометрами (ЛЕМІ-017), виготовлєними у Львівському Центрі ІКД НАНУ—ДКАУ. Просторове рознесення пунктів складало 30—50 км. Реалізовано кореляційний алгоритм оцінки часового зсуву між пульсаціями у рознесєних пунктах. Показано, що варіації горизонтальних складових магнітного поля у діапазоні пульсацій класів Рс3-Рс4 у різних пунктах відбуваються не синхронно. Визначєння інтервалів затримки (випереджень) дозволяє оцінити напрямок приходу резонансних МГД-коливань.

У 2013 році продовжено вимірювання варіацій швидкостей дрейфу іоносферної плазми, пов'язаних з МГД-хвилями, які проявляються у доплєрівському зсуві частоти (ДЗЧ) ВЧ-сигналів. Пробні сигнали ракурсно розсіюються природними та штучними іоносферними неоднорідностями, що витягнуті уздовж ліній магнітного поля. Провєдено кореляційний ДЗЧ сигналів НС НААРР, що були прийняті в Європі та в Антарктиці на Українській антарктичній станції (УАС) «Академік Вернадський», з варіаціями магнітного поля Землі. За даними мережі станцій системи INTERMAGNET, що розташовані уздовж траси НААРР-УАС, показано, що варіації ДЗЧ сигналу в Антарктиці пов'язані з поширенням МГД-хвилі в іоносфері над нагрітєним стєндом. Аналогічний зв'язок МГД-хвиль з варіаціями швидкостей дрейфу іоносферної плазми



у звітному році досліджено за даними радарних спостережень в рамках спеціальних вимірювальних кампаній з використанням двох інших нагрівних стендів — EISCAT (Тромсо, Норвегія) та «Сура» (Васильсурск, Росія).

На звітному етапі виконання НДР розроблено алгоритм оцінки поляризаційних характеристик пульсацій, що базується на визначенні усереднених параметрів Стокса. Такий підхід дозволив оцінювати поляризаційні параметри різних типів пульсацій, що спостерігаються одночасно. Виявлено поворот площини поляризації пульсацій P<sub>3</sub>-P<sub>4</sub> в залежності від частоти. Масив даних було накопичено на УАС «Академік Вернадський» та на Низькочастотній обсерваторії (НЧО) РІ НАНУ, розташованій у с. Мартова (Харківська обл.).

Створено та програмно реалізовано алгоритм виявлення мікропульсацій класу P<sub>1</sub> за даними, отриманими індукційним магнітометром. Алгоритм апробовано на багаторічних базах даних ННЧ-вимірювань на поверхні Землі, що проводяться на УАС «Академік Вернадський» та НЧО РІ НАНУ. З використанням розробленого алгоритму оброблено 5-річний масив даних, отриманих на УАС за період з березня 2006 по лютий 2011 року. Отримано оцінки добових та сезонних варіацій частоти спостереження геомагнітних пульсацій P<sub>1</sub>. Встановлено значну міжрічну мінливість частоти виникнення пульсацій, яка добре корелює з сонячною активністю: із зростанням активності ймовірність збудження пульсацій P<sub>1</sub> зростає. Слід відмітити, що розроблений алгоритм поляризаційної обробки мікропульсацій магнітного поля Землі може бути застосований не тільки для наземних, а також для супутникових вимірювань.

#### ПРОЕКТ 16

##### Дослідження магнітосферно-іоносферної взаємодії в рамках проекту «Резонанс»

*Інститут космічних досліджень  
НАН України та ДКА України*

Науковий керівник:  
доктор фізико-математичних наук *О. К. Черемних*

Розглянуто і узгоджено з російською стороною програму наукових досліджень ультранизь-

кочастотних хвиль (УНЧ) в рамках космічного експерименту «Резонанс». Зміст цієї програми опубліковано в оглядовій статті в журналі «Космічна наука і технологія».

На основі даних вимірювань космічних місій Cluster і Themis проаналізовано властивості УНЧ-хвиль у магнітосфері Землі. Розглянуто умови локалізації резонансу цих хвиль і можливі джерела. На основі експериментальних даних проаналізовано процес збудження УНЧ-мод за рахунок транспорту енергії з сонячного вітру у магнітосферу. Отримано добре узгодження спостережуваних властивостей УНЧ-хвиль з попередньо розвинутими теоретичними моделями. Показано, що магнітосферне відбиття ДНЧ-хвиль може відбуватися за умови, якщо їхня власна частота нижча за нижню гібридну частоту, тобто на широтах близько 50°. Отримано результати моделювання поширення вістлерних магнітосферних емісій типу хорів. Результати добре узгоджуються з даними вимірювань на борту космічних апаратів Cluster.

Розроблено методики та програмне забезпечення для обробки даних супутникових вимірювань. За допомогою цих методик визначено частоти та переважні напрямки поширення хвильових збурень в іоносфері. Встановлено, що у полярних областях Землі на висотах 250—400 км систематично спостерігаються АГХ з відносними амплітудами варіацій температури і густини до 10 %. Ці хвилі систематично поширюються в напрямку проти вітру, а їхня амплітуда демонструє чітку залежність від швидкості вітру. Розроблено аналітичну модель поширення хвильових збурень в ізотермічній атмосфері при наявності обертання та сили тяжіння. Отримано узгодження моделі з експериментальними результатами, зокрема ефект підсилення амплітуди акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) в зустрічному вітрі.

За даними супутникових вимірювань виявлено узгоджені хвильові варіації в параметрах нейтральної атмосфери та УНЧ-коливань магнітного і електричних полів. Оскільки характер полярних АГХ є глобальним і систематичним, вони мають спричинювати глобальну модуляцію провідності іоносфери, що, в свою чергу, обумовлює варіації поздовжніх магнітосферно-



іоносферних струмів і може створити відповідний відгук в магнітосфері. Зроблено висновок, що частина спектру УНЧ-коливань в магнітосфері може мати іоносферне походження, зокрема це стосується буревих Pc-5-6 пульсацій, які за частотою близькі до полярних АГХ. Подальші дослідження у цьому напрямку дозволять встановити роль полярних АГХ у магнітосферно-іоносферній взаємодії.

#### Б. 4. Науки про Сонце та сонячно-земні зв'язки (геліосфера)

##### ПРОЕКТ 17

##### Дослідження турбулентних процесів у космічній плазмі в рамках проектів «Резонанс», «Странник», «Рой»

Головна астрономічна обсерваторія НАН України

Науковий керівник:

член-кореспондент НАН України Р. І. Костик

1. За результатами спостережень спокійної ділянки біля центра сонячного диску, які були проведені на 70-см германському вакуумному баштовому телескопі ВТТ в Ізаньї (о. Тенериф, Іспанія) в спектральній лінії іонізованого барію  $\text{Ba II } \lambda 455.4 \text{ нм}$ , знайдені швидкості та розміри конвективних елементів на двох висотах в атмосфері Сонця: 0 км та 650 км з просторовою роздільною здатністю, рівною 0.087 сд (секунд дуги).

Для дослідження характеру турбулентності був використаний метод, який ґрунтується на аналізі функції розподілу флуктуацій швидкості та її моментів, а також проведений спектральний аналіз.

При дослідженні особливостей функції густини ймовірності флуктуацій швидкості вибирався зсув у просторі, кратний 0.087 сд. Аналізувалися статистичні властивості абсолютного значення варіацій швидкості  $dV = V(x+l) - V(x)$  в спокійній області сонячної фотосфери на різних просторових масштабах. Висота максимуму функції густини ймовірності в залежності від кроку по простору змінювалася із показником степеня  $s \sim 0.49$  на висоті  $h = 0$  км та з показником  $s \sim 0.53$  на

$h = 650$  км. Обидва значення дуже близькі до показника степеня для нормального гауссового розподілу. Цей факт дозволяє стверджувати про наявність однорідності турбулентних процесів. Подальший аналіз показав, що в спокійній області сонячної фотосфери турбулентні процеси можна описати в рамках моделі Колмогорова.

Отриманий результат вказує на нульове середнє магнітне поле для спокійних областей фотосфери Сонця.

2. Статистичний режим маломасштабної турбулентності є універсальним і визначається лише двома розмірними параметрами — середньою швидкістю дисипації енергії  $\varepsilon$  і коефіцієнтом в'язкості  $\nu$ . Класичний підхід дослідження статистичних властивостей поля швидкостей  $v(x)$  на локальному масштабі  $l$  в турбулентному потоці полягає в дослідженні структурних функцій (статистичних моментів функції розподілу) різних порядків  $q$ :  $S_q(l) = \langle |v(x+l) - v(x)|^q \rangle$ , де  $\langle \dots \rangle$  — усереднення по ансамблю. При великих числах Рейнольдса теорія Колмогорова припускає статистику Гауса пульсацій швидкостей і передбачає степеневий закон для структурної функції  $S_q(l)$  з лінійною функціональною залежністю показника  $\zeta(q) = q/3$ . Припускаючи залежність структурних функцій тільки від масштабу і швидкості дисипації енергії  $\varepsilon$ ,  $S_q(l) = f(\varepsilon, l)$ , і використовуючи міркування розмірності, А. Н. Колмогоров вивів знаменитий закон (скейлінг) для спектру потоку енергії  $E_k \sim k^{-5/3}$  (закон «п'яти третіх») для розвиненої ізотропної турбулентності в інерційному діапазоні.

Згідно з колмогорівською теорією локальної ізотропної турбулентності спектральна густина  $E_1(k) = C\varepsilon^{2/3}k^{-5/3}$ . Експериментальні дослідження показали відхилення від колмогорівської теорії, що викликане переміжністю турбулентності (локальне порушення однорідності турбулентності, в якій активні області співіснують з пасивними). Випадкові пульсації в середовищі з переміжністю мають функцію розподілу, що відрізняється від розподілу Гауса. Дослідження статистичних симетрій турбулентності, автотельних і фрактальних властивостей дозволяє отримати інформацію про скейлінги турбулентності, не вдаючись до детального розгляду конкретних

умов її збудження. Розгляд самоподібних (авто-модельних) властивостей турбулентності призвів до створення моделей розвиненої турбулентності гідродинамічних систем:  $\beta$ -модель,  $p$ -модель, лог-пуассонівська модель та інших.

В лог-пуассонівській моделі розглядається стохастичний мультиплікативний каскад, а логарифм енергії дисипації описується пуассонівським розподілом. Перевагою лог-пуассонівської моделі є врахування впливу дисипативного діапазону, коли крайові ефекти відіграють істотну роль в системі з відносно невеликим числом Рейнольдса і обмеженим інерційним діапазоном. Логарифм дисипації енергії  $\epsilon_l$  підкоряється розподілу Пуассона :

$$P(x) = \frac{\mu^y e^{-\mu y}}{\Gamma(y+1)} \text{ при } y = \ln \epsilon_l / \ln \beta,$$

де  $\beta$  — параметр, який характеризує ступінь переміжного процесу.

$\beta$ -модель турбулентності застосовують, коли в турбулентності відбуваються стрибкоподібні зміни на малих проміжках часу і переривисті у просторі. Вважається, що в кожному кроці каскаду втрати енергії від розпаду вихору отримуються за рахунок випадково поширюваного початкового вихору. У  $\beta$ -моделі втрати передбачаються меншими у даному просторі і такими, що в окремому кроці можна знайти  $\beta$  з відповідного об'єму попереднього вихору. Це відбувається, коли  $\beta = N/2^3 \leq 1$ , де  $N = 2^{D_F}$  — номер втрати. У  $n$ -му кроці такого ланцюга розпаду вихору

$$\beta_n = \beta^n = (2^{D_F-3})^n = (2^n)^{D_F-3} = (L/l_n)^{D_F-3},$$

де великий масштаб описується  $L$ , масштаб  $n$ -ї втрати задається як  $l_n = L/2^n$ , а величина  $D_F$  характеризує рекурсивне вимірювання.

Згідно з  $\beta$ -моделлю

$$\zeta(q) = \frac{q}{3} + (3 - D_F) \left(1 - \frac{q}{3}\right).$$

У  $p$ -моделі турбулентності, з одного боку, каскадний процес представлений двомасштабним набором з рівними інтервалами розділення, а з іншого — усереднена каскадна форма є просторово-незалежною. Найбільш збурений вихор може мати масштаб  $L$  та об'ємну енергію  $\epsilon_L$  каскадного потоку, тобто найменший потік через одиницю довжини. Розглядається розпад

потoku на два  $l_1 = L/2$ , але з різними частинами потоку, тобто  $2P_1 \epsilon_L$  та  $2P_2 \epsilon_L$  і  $P_1 + P_2 = 1$ . Цей процес буде так само описуватися для  $n$  обраних сегментів. У  $p$ -моделі параметри фрагментації відповідають співвідношенню

$$\sum_{i=1}^{N_n} f_i = (P_1 + P_2)^n = 1.$$

Значення параметру структурної функції задається виразом

$$\zeta(q) = 1 - \log_2(P_1^{q/3} + (1 - P_1)^{q/3}).$$

Для випадку, де немає ніяких стрибкоподібних змін,  $P_1 = 0.5$  і  $\zeta(q) = q/3$ , що збігається з моделлю Колмогорова.

3. Турбулентні процеси в навколосезному середовищі досліджувались за даними спостережень на супутнику «Самба». Було розглянуто 14 подій перетину магнітошару супутником у 2004—2009 рр. Для аналізу часових параметрів турбулентних процесів було використано флуктуації магнітного поля з частотою опитування — 22.5 Гц. Під час досліджень було відібрано фізично однорідні ряди даних для коректного аналізу структурних функцій високих порядків (до 9-го включно).

Показано, що відносні варіації магнітного поля в магнітошарі перевищують значення в сонячному вітрі приблизно в 2-3 рази. При цьому всі істотні зміни в плазмі сонячного вітру і в міжпланетному магнітному полі відображаються у збуреннях аналогічних параметрів у магнітошарі. Не всі варіації параметрів у магнітошарі виникають в результаті флуктуації сонячного вітру або міжпланетного магнітного поля, значна частина з них генерується в самому магнітошарі або на його межах. Характер турбулентного потоку плазми в магнітошарі не пов'язаний безпосередньо з турбулентністю в сонячному вітрі, і значною мірою є проявом власних процесів у даній області. При цьому джерелами варіацій у магнітошарі є процеси на фронті ударної хвилі.

Статистичний аналіз турбулентних процесів показав, що на високих частотах (малих масштабах) структура турбулентності відмінна від низькочастотної області. При проходженні супутника через плазму сонячного вітру переміжність в турбулентних процесах не спостерігається

ся. Максимум функції густини ймовірності відповідає гауссовому розподілу. При аналізі даних для форшоку, постшоку і магнітошару ми маємо два асимптотичні режими зміни максимуму функції густини: на великих часових масштабах зміна максимуму функції густини подібна до типового гауссового розподілу, для малих часових масштабів спостережувані особливості краще описуються розподілом Леві. Перетин двох асимптот відповідає значенню близько 1 с, що добре узгоджується із значенням іонно-циклотронної частоти.

Нааявність двох різних режимів вказує на два різні процеси: для опису процесів із характерним масштабом, більшим ніж іонно-циклотронний радіус, ми можемо використовувати рівняння магнітогідродинаміки, а для опису процесів з меншим характерним масштабом — електронною МГД або кінетичними рівняннями.

## ПРОЕКТ 18

### **Одночасні дослідження радіовипромінювання Сонця, збурень сонячного вітру та іоносфери Землі з допомогою української системи декаметрових радіотелескопів УРАН та космічних апаратів**

*Радіоастрономічний інститут НАН України*

Науковий керівник:  
кандидат фізико-математичних наук  
*Н. Н. Калиниченко*

*1. Одновременные наблюдения спорадического радиоизлучения Солнца, межпланетных и ионосферных мерцаний на радиотелескопах системы УРАН.*

Для того чтобы установить, в какой мере факт регистрации спорадического декаметрового радиоизлучения определенных типов и параметров может быть индикатором появления крупномасштабных возмущений солнечного ветра, которые направлены к Земле, и появления возмущений ионосферы Земли, проводились одновременные наблюдения на радиотелескопах системы УРАН. План наблюдений был такой. Если регистрировался солнечный всплеск II или IV типа, то затем в течение 5-6 дней, включая день регистрации, наблюдались мерцания груп-

пы радиоисточников. В таком режиме проведены 4 сессии наблюдений: 31 мая — 2 июня 2013, 22—26 июня 2013, 10—13 июля 2013, 12—19 августа 2013 г.

Наиболее удачной оказалась первая сессия, когда 31 мая 2013 г. с 11:23 до 11:40 UT на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 был зарегистрирован всплеск II типа с ёлочной структурой, который связан с выбросом корональных масс (СМЕ в результате вспышки в активной области NOAA 11761).

Анализ параметров этого всплеска, а также данных мерцаний которые проводились 31 мая, 1—3 июня 2013 года позволили сделать следующие выводы.

#### *Выводы по разделу 1.*

Подтверждено, что всплески 2-го типа с ёлочной структурой генерируются в областях на краях ударной волны и могут быть зарегистрированы на Земле в тех случаях, когда соответствующий СМЕ распространяется под значительным углом к направлению на Землю. При фронтально распространяющихся СМЕ ёлочной структуры во всплесках 2-го типа не наблюдается. Вследствие сказанного выше регистрация всплеска 2 типа с ёлочной структурой говорит о том, что соответствующий СМЕ вероятно направлен в сторону от Земли, и вероятность возникновения геомагнитных возмущений низка, что подтверждается данными мониторинга солнечного ветра и ионосферы Земли методом мерцаний.

*2. Разделение межпланетных и ионосферных мерцаний космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн.*

В процессе выполнения темы «Ветер» были продолжены исследования межпланетной плазмы как среды, передающей возмущения от Солнца к Земле, методом межпланетных мерцаний, совершенствование методик восстановления параметров солнечного ветра. На данном этапе сделано экспериментальную оценку влияния ионосферы Земли на статистические характеристики мерцаний компактных космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн, а также разработана новая методика выделения межпланетных мерцаний из данных наблюдений с учетом влияния ионосферы.

### *Выводы по разделу 2.*

Установлено, что статистические характеристики мерцаний (энергетический спектр, кросскорреляционная функция мерцаний на двух частотах, плотность распределения вероятностей, кросскорреляционная функция мерцаний на двух радиотелескопах и индекс мерцаний) представляют собой сумму соответствующих характеристик от каждой из сред (например, узкой кросскорреляционной функции от межпланетных мерцаний и широкой со смещением — от ионосферных, узкого ионосферного и широкого межпланетного энергетического спектров и т. д.). Вклад каждой из сред определяется степенью ее влияния. В случае подавляющего вклада одной из сред мы фактически имеем только ее характеристики, а в случае более или менее равного вклада — сумму характеристик. Важно подчеркнуть, что в последнем случае, в сумме характеристик, вклад каждой среды остается заметным, кросскорреляционные функции мерцаний на двух частотах и энергетические спектры межпланетных и ионосферных мерцаний разделяются. Это значит, что при правильном выборе методики обработки данных ионосферная и межпланетная плазма вероятно даже могут изучаться одновременно.

### *3. Исследования влияния межпланетных коронарных выбросов масс (ICME) на турбулентность ионосферной плазмы.*

В рамках выполнения рабочих планов темы «Ветер», на радиотелескопе УРАН-4 (Одесса) были продолжены работы по изучению влияния активных процессов на Солнце и в межпланетной среде на турбулентность ионосферы Земли. В качестве индикатора использовался индекс ионосферных мерцаний космических радиосточников 3С144, 3С274, 3С405, 3С461. Наблюдения проводились на частотах 20 и 25 МГц, в двух линейных поляризациях. Для анализа были выбраны моменты прохождения вблизи Земли двух межпланетных корональных выбросов масс (ICME): № 1 начало 17.03.2013 (05<sup>h</sup>34<sup>m</sup>); № 2 начало 13.04.2013 (22<sup>h</sup>24<sup>m</sup>).

### *Вывод по разделу 3.*

Наблюдавшиеся вариации индекса ионосферных мерцаний, во время прохождения

ICME и после, не могут быть отнесены исключительно к эффектам ICME. Они в большей мере могут быть связаны с другими факторами, определяющимися, например, литосферно-ионосферными и тропосферно-ионосферными связями. Эти факторы играют доминирующую роль в поведении среднеширотных ионосферных неоднородностей в период наблюдений.

### *4. Флуктуации фардеевского вращения и поляризация низкочастотного радиоизлучения Солнца.*

В процессе выполнения темы «Ветер» были продолжены исследования влияния магнитного поля солнечной короны на поляризацию низкочастотного радиоизлучения. На этом этапе был проведен анализ наиболее часто используемых в настоящее время эмпирических моделей радиального и гелиоширотного распределения электронной концентрации в солнечной короне, коронального магнитного поля и его флуктуаций. Для рассмотренных моделей сделаны оценки фардеевского вращения и флуктуаций фардеевского вращения в частотном диапазоне 20—95 МГц. Также была оценена величина линейной поляризации, которая может возникать в результате трансформации поляризуемого по кругу компонента радиоизлучения Солнца в присутствии анизотропных флуктуаций коронального магнитного поля.

### *Вывод по разделу 4.*

Выявлено, что в присутствии анизотропных флуктуаций магнитного поля в результате трансформации поляризованного по кругу компонента радиоизлучения в линейно поляризованный компонент могут возникать флуктуации линейно поляризованного компонента. Слабые флуктуации линейно поляризованного компонента могут возникать при наличии анизотропных флуктуаций магнитного поля даже в том случае, когда радиоизлучение Солнца от начала было неполяризованным.

В целом наличие анизотропных флуктуаций магнитного поля вносит заметные искажения в поляризацию солнечного радиоизлучения, что необходимо учитывать при интерпретации данных наблюдений.



## Б. 5 . Науки про Всесвіт (позаатмосферна астрономія)

### ПРОЕКТ 19

#### Великомасштабна структура і високоенергетичні процеси у Всесвіті: теоретичні моделі та науково-технічне обґрунтування програми спостережень наземними та космічними обсерваторіями

*Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України*

Науковий керівник:  
доктор фізико-математичних наук *О. Л. Петрук*

На основі останніх спостережних даних щодо анізотропії температури реліктового випромінювання (WMAP9, Planck2013), баріонних акустичних осциляцій (6dF, SDSS DR7 і DR9) та модулів відстані до наднових типу Ia (SNLS3, Union2.1) визначено параметри космологічної моделі Всесвіту з динамічною темною енергією, якою є скалярне поле з баротропним рівнянням стану. Встановлено, що дані спостережень вказують на фантомний характер темної енергії в сучасну епоху. Показано, що за даними, що включають результати Космічної обсерваторії «Планк»,  $\Lambda$ CDM-модель може бути виключена на рівні достовірності не меншому, ніж  $2\sigma$ . Довірчі інтервали значень параметрів густини прихованих складових Всесвіту є наступними: холодної темної матерії  $\Omega_{cdm} = 0.238 \pm 0.004$ , темної енергії  $\Omega_{de} = 0.717 \pm 0.012$  ( $1\sigma$ ). Значення густини нейтринного компонента та параметра кривини 3-простору знаходяться в межах похибки їхнього визначення та значно меншими за значення параметра густини баріонного компонента, довірчий  $1\sigma$ -інтервал якого є  $\Omega_b = 0.0438 \pm 0.0006$ .

Розроблено модифікацію моделі гало формування галактик для розрахунку спектрів потужності холодної і теплої темної матерії та баріонної речовини на малих просторових масштабах, яка порівнювалася та уточнювалася з результатами числових N-частинкових моделювань формування великомасштабної структури. Показано, що розрахований в рамках такої моделі спектр потужності просторового розподілу галактик на малих масштабах для космологічної моделі з найбільш оптимальними параметрами добре узгоджується із спостережуваними, отриманими

за допомогою інфрачервоного астрономічного супутника IRAS (каталог галактик PSCz) та Слоанівського цифрового огляду неба (каталог галактик SDSS LRG DR7).

Доведено, що система рівнянь Дірака на тривимірній просторовоподібній гіперповерхні просторово-постійної зовнішньої кривини, вкладеній у псевдоріманів чотиривимірний простір типу N за класифікацією Петрова, є відокремлюваною. Вказано, за яких умов розв'язки системи рівнянь не обертаються в нуль в жодній точці таких гіперповерхонь.

Виходячи з рівнянь Матісона — Папапетру досліджено просторову область існування екваторіальних колових орбіт ультрарелятивістської спінової частки у полі Керра і залежність відповідного значення релятивістського фактора Лоренца, обчисленого за швидкістю, необхідною для реалізації орбіт, від радіальної координати орбіти. Показано, що на відміну від ультрарелятивістських колових орбіт безспінової частки, відповідні орбіти частки зі спіном існують у значно ширшій області простору. Серед цих орбіт є як такі, що зумовлені значною додатковою притягальною дією спінгравітаційної взаємодії порівняно із звичайним («геодезійним») притяганням, так і ті, існування яких демонструє значну відштовхувальну дію на частку цієї взаємодії, залежної від орієнтації спіну та орбітальної швидкості частки. Оскільки рівняння Матісона — Папапетру в певному сенсі є класичним наближенням загальноковаріантного рівняння Дірака, проведено числові оцінки необхідних значень фактора Лоренца для електрона, протона та нейтрино у гравітаційних полях керрівських чорних дір. Для заряджених спінових часток ультрарелятивістські колові орбіти цікаві з точки зору вивчення генерування ними синхротронного випромінювання.

Проведено одновимірне магнітогідродинамічне моделювання течій з ударними хвилями в залишках наднових зір з врахуванням радіаційних втрат плазми, нагрітої ударною хвилею. Вперше виявлено роль магнітного поля у модифікації потоків плазми, яка стає суттєвою лише після порушення умов адіабатичності.

Побудовано модель прискорення космічних променів ударними хвилями від молодих залиш-



ків Гіпернових протягом їхньої еволюції. Описано механізми формування сумарного спектру та спектрів кожного типу прискорених частинок. Отримано оцінку внеску космічних променів від залишків Гіпернових у спостережуваний спектр космічних променів, що покращує розуміння можливих джерел космічних променів з енергіями між  $10^{17}$  еВ та  $10^{19}$  еВ. Максимальні енергії космічних променів, прискорених у залишках Гіпернових, що розширюються у вітрових бульбашках зір Вольфа — Райє, досягають  $10^{18}$  еВ. Внесок цих космічних променів у спостережуваний потік космічних променів з енергіями  $10^{16}$  —  $10^{18}$  еВ становить десятки відсотків при частоті вибухів Гіпернових  $\sim 10^{-4}$  рік $^{-1}$ . Середнє значення нуклонного числа цих космічних променів складає 7—10 на енергіях, менших за  $10^{15}$  еВ, і плавно зростає на вищих енергіях, досягаючи 13 на енергіях порядку  $10^{18}$  еВ.

Колімовані струмені в активних ядрах галактик ефективно прискорюють заряджені частинки відповідно до механізму Фермі першого роду. Однак галактики FR II з ознаками потужних ударних хвиль перебувають надто далеко, щоб забезпечити спостережуваний потік космічних променів надвисоких енергій. Тому увага приділяється дослідженню прискорення космічних променів в галактиках типу FR I, які лежать достатньо близько, хоча їхні струмені менш потужні та гальмуються поступово. Область гальмування повинна бути сильно турбулентною, щоб забезпечувались умови, сприятливі для прискорення космічних променів відповідно до механізму Фермі другого роду. Оцінено відстані від ядра, з яких можна очікувати частинки КП різного хімічного складу. Наші результати підтверджують кореляцію локалізації подій космічних променів надвисоких енергій з розташуванням радіогалактики Cen A.

Важливим методом дослідження природи та властивостей темної матерії є аналіз впливу кластеризації частинок темної матерії на формування спостережуваних структур баріонної матерії — галактик та їхніх скупчень. Інформацію про просторову кластеризацію баріонної матерії дають кореляційні функції. Розроблені нові ефективні методи врахування впливу гра-

вітаційного поля темної матерії на формування великомасштабної структури, тобто, на кореляційні функції галактик. Для отримання спостережних даних щодо кореляційних функцій в роботі сформовано вибірки галактик в оптичному, інфрачервоному та радіодіапазонах та на їхній основі оцінено глобальні характеристики галактик. Окремо досліджено вибірку нового класу компактних галактик великої світності, які характеризують процеси формування галактик на великих червоних зміщеннях.

Запропоновано пропозиції для місії «Ломоносов», які вирішують комплекс наукових проблем, пов'язаних із дослідженням високоенергетичних процесів в астрофізичних об'єктах, а також обґрунтування програми участі української сторони у спостереженнях, що відображають напрямки досліджень наукового колективу проекту. Пропозиції стосуються визначення хімічного вмісту космічних променів надвисоких енергій (детектор ТУС), першочерговості спостережень близьких активних галактик NGC1952 (Cen A) і Діва А (M87), пошуку космогенних нейтрино та спостереження гама-променів найвищих енергій.

## ПРОЕКТ 20

### Створення Українського Астрокосмічного центру обробки даних для вирішення задач багатохвильової астрофізики

*Інститут теоретичної фізики  
ім. М. М. Боголюбова НАН України*

Науковий керівник:  
доктор фізико-математичних наук *Ю. В. Штанов*

**Еман 1.** «Розширення баз даних центру ВІРГО даними оптичного і гамма-діапазонів; побудова карт розподілу оптичного, жорського рентгенівського та гамма-випромінювання та карти розподілу темної матерії; дослідження розподілу матерії на близьких і космологічних масштабах Всесвіту та створення інтерактивних інструментів його візуалізації».

З аналізу великої кількості подібних веб-інтерфейсів можна відзначити, що основний прогрес в їхньому розвитку пов'язаний із спрощенням доступу до даних та покращенням їхньої візуалізації. Цим двом аспектам приділено на-

лежну увагу і в нашому проекті, проте його ключова ідея полягає у новому підході до якості даних, що надаються користувачу. На нашу думку, однією з основних причин, що стоїть на заваді використання даних в наукових роботах, є невизначеність величини систематичної похибки, яка зазвичай не враховується наявним стандартизованим програмним забезпеченням.

Основною метою цього наукового проекту було використання наявного досвіду обробки даних супутників XMM-Newton та Fermi для побудови спеціалізованих карт неба в жорсткому рентгенівському (2–5 кеВ) та гамма- (30 МеВ–300 ГеВ) діапазонах з детальним урахуванням систематичної похибки. Ці результати, отримані науковою групою Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, розміщено на веб-сторінці <http://skyview.virgo.ua.org>.

Крім того, в рамках даного проекту отримано ряд нових наукових результатів. Зокрема, було визначено наукові цілі, оптимальні для участі українських наукових команд у міжнародному проекті Гамма-400 (наступника гамма-обсерваторії Fermi). Також, в Головній астрономічній обсерваторії НАН України було проведено детальне дослідження скупчень галактик за допомогою космічних рентгенівських обсерваторій Chandra та Suzaku, яке, зокрема, дає можливість визначення вмісту баріонного компонента у Всесвіті в цілому. Зокрема, було побудовано нові кореляційні залежності між рентгенівськими світностями, температурою та масами міжгалактичного газу для вибірки з 21 скупчення галактик в діапазоні червоних зміщень 0.4–1.4, які спостерігалися космічною рентгенівською обсерваторією Chandra. Таке дослідження є корисним для астрофізики і космології через те, що це дасть нам картину розподілу маси у Всесвіті на масштабах Мпк. Оскільки час спостережень для кожного об'єкта є обмеженим (максимум до декількох десятків кілосекунд, а зазвичай 5–10 кс), використання всіх доступних рентгенівських оглядів дасть нам можливість розширити вибірку об'єктів (скупчень галактик) до декількох тисяч.

Важливі результати було отримано в Головній астрономічній обсерваторії НАН України

шляхом аналізу великих масивів даних в оптичному діапазоні. Зокрема, цей аналіз використовує Слоанівський цифровий огляд неба (SDSS), який наразі є найбільшим спектроскопічним оглядом неба, що покриває четверту частину небесної сфери в північній півкулі і містить зображення більше 900 млн унікальних об'єктів, для значної частини з яких є фотометричні та спектроскопічні дані. Більшість об'єктів цього огляду зі спектроскопічними даними — це галактики і квазари, які дозволяють побудувати тривимірну карту розподілу матерії на червоних зміщеннях до  $z = 5$ . У першому випадку трейсерами всієї матерії (включаючи темну) є самі активні ядра галактик, в другому — міжгалактичний нейтральний водень, що дає лінії поглинання Лайман-альфа в спектрах квазарів. Тому учасниками проекту було підготовлено вибірку 360 000 галактик з  $0.003 < z < 0.1$  на основі останнього релізу SDSS DR9. На даний час отримана вибірка використовується для аналізу фізичних властивостей (світність, маса, показник кольору, радіальна швидкості, зворотний індекс концентрації, абсолютна зоряна величина, радіус де Ваккульора та ін.) галактик у близьких групах. Крім того, було розраховано маси надмасивних чорних дір для 30 ізольованих ядер галактик у північній півкулі. Виявлено, що ізольовані ядра галактик з каталогу 2MIG мають меншу масу чорної діри у порівнянні з іншими сейфертівськими галактиками. Показано, що ізольовані ядра галактик з каталогу 2MIG з чорними дірами малої маси мають вищий темп акреції, ніж галактики з більш масивними чорними дірами.

## ПРОЕКТ 21

### Дослідження кінематики Галактики з використанням власних рухів зір сучасних каталогів, створених з використанням наземних та космічних даних

Радіоастрономічний інститут НАН України

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук П. М. Федоров

Створено опорний каталог позагалактичних джерел. На відміну від каталогу XPM, схема побудови каталогу XPM2 передбачає виведення

положень об'єктів в кожному з вищевказаних оглядів на епоху спостережень кожної конкретної шмідтовської платівки. Для принципового вирішення цього завдання, крім вимірних машиною SuperCOSMOS прямокутних координат галактик, необхідно мати незалежні від SSA сферичні координати галактик, що містяться на конкретній шмідтівській платівці. В якості нульового наближення ми скористалися сферичними координатами галактик з каталогу GSC2.3.

Вибір каталогу GSC2.3 для приведення положень його галактик до системи PSC обумовлений декількома обставинами. По-перше, хоча сферичні координати об'єктів GSC2.3 були виведені з тих же самих шмідтівських пластинок, які використовувалися для SuperCOSMOS, вимірні координати GSC2.3 були отримані за допомогою іншої вимірювальної машини. У цьому сенсі дані GSC2.3 і SuperCOSMOS є незалежними. По-друге, сферичні координати GSC2.3 є результатом об'єднання оглядів в різних фільтрах і мають відносно високу випадкову точність координат галактик, яка складає приблизно 300 мсд і є порівнянною з точністю галактик в XSC (2MASS).

Очевидно, що традиційне використання математичних функцій, наприклад поліномів, для усунення спотворень зображень на пластинках Шмідта є неефективним, оскільки явні розриви на стиках полів згладжуються, а не усуваються. Тому для усунення координатних спотворень і отримання корекцій положень галактик в каталозі GSC2.3 був застосований медіанний фільтр, побудований на базі різниць положень (GSC2.3 — PSC). Ми вважаємо, що положення галактик PSC є в даному випадку еталонними, а всі особливості поведінки різниць обумовлені помилками в каталозі GSC2.3. Оскільки кількість спільних об'єктів в (GSC2.3 — PSC) виявилася досить великою (десятки тисяч), корекції були отримані для кожної індивідуальної платівки.

На останньому кроці ми застосували отримані для кожного конкретного поля корекції для усунення систематичних спотворень всіх координат галактик, які містяться на перетині (SSA — GSC2.3) і отримали їхні сферичні координати, приведені до системи, що задається положеннями позагалактичних об'єктів PSC.

Виведений каталог містить сферичні координати приблизно 70 мільйонів галактик до 22 зоряної величини, що покривають все небо, за винятком невеликого регіону поблизу галактичної площини. Виключення локальних і зональних помилок координат галактик GSC2.3 було зроблено за допомогою каталогу 2MASS. Для визначення глобальної орієнтації в якості еталонної системи, до якої остаточно будуть приведені положення і власні рухи об'єктів XPM2, ми використовували систему каталогу LQRF2. Таким чином, осі цього високощільного опорного фрейму практично не мають обертання по відношенню до позагалактичних об'єктів та узгоджені з ISRF2. Однак слід зауважити, що на даний час положення GSC2.3 приведені в систему PSC, а не LQRF2, яка є оптичної реалізацією системи ICRS. Остаточна прив'язка положень галактик до LQRF2-системи буде виконана на етапі створення каталогу положень зірок. Це викликано тим, що коректне ототожнення LQRF2-кварзарів, які є практично точковими об'єктами, з кварзарами можливо тільки в тому випадку, коли будуть отримані положення точкових об'єктів, тобто зірок.

Після виключення систематичних помилок середні квадратичні відхилення координатних різниць GSC2.3 мінус PSC склали приблизно 200—300 мсд залежно від конкретного поля. Ці дані були отримані за внутрішнім узгодженням і не суперечать оцінками зовнішньої точності положень галактик. Також слід зауважити, що дані отриманого каталогу можуть бути використані не тільки для вище зазначених цілей, а й у багатьох інших астрономічних додатках.

Також виведено першу версію каталогу XPM2. На даний час цей каталог містить близько 1 мільярда об'єктів, що покривають північну та південну півкулі. Їхні положення були отримані на епоху спостережень конкретної платівки у фільтрах *J*, *R* і *I* відносно системи відліку, що задається положеннями галактик із створеного нами опорного каталогу. Виконано попереднє порівняння і аналіз даних спільних об'єктів каталогів XPM2 та XPM.

## ПРОЕКТ 22

### Супутникові та лабораторні експерименти для досліджень космічних променів, верхніх шарів атмосфери, Сонця, пошуку ефектів за рамками стандартної моделі частинок ядерно-фізичними методами

*Інститут ядерних досліджень НАН України*

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук *Ф. А. Даневич*

1. Запропоновано супутникові експерименти, які можуть бути здійснені на космічній платформі невеликої маси на низькій орбіті для дослідження часової структури гамма-сплесків, хімічного складу космічних променів (зокрема, потоків античастинок з енергіями 10—1000 GeV) та пошук надважких елементів у космічних променях, пошук гіпотетичних варіацій констант  $\alpha$ - та  $\beta$ -розпаду, вимірювання радіоактивності верхніх шарів атмосфери та гамма- і нейтронного випромінювання від висотних блискавок. Крім того, оцінено можливості експериментів, спрямованих на пошук аксіонів (одні з найбільш вірогідних складових темної матерії), ефективної маси і аномальних електромагнітних моментів фотонів та ряду гіпотетичних ефектів шляхом аналізу даних проекту «Радіоастрон» (супутник «Спектр-Р»).

Запропоновані експерименти базуються на тому, що вимірювання потоків, енергії, складу, напрямку космічних променів дозволяють досліджувати не тільки космічні об'єкти, якими вони генеруються, а й властивості частинок. Інформація, що отримується від космічних джерел електромагнітних хвиль, космічних променів і нейтрино, може бути використана, зокрема, для дослідження властивостей елементарних частинок і ядер, перевірки низки фундаментальних фізичних теорій. Нами виконані попередні оцінки чутливості експериментів з використанням даних вже існуючих інструментів (проект «Радіоастрон»). Ідея полягає у наступному. Якщо поширення світла у вакуумі відрізняється від стандартного (що передбачається Стандартною моделлю і загальною теорією відносності), може спостерігатися відхилення хвильового фронту від плоского, частотна дисперсія і розпливання точ-

кових джерел при їхньому спостереженні з високою кутовою роздільною здатністю, яка досягається методом радіоінтерферометрії з наддовгою базою (РНДБ). Більшість таких ефектів можна розглядати як поширення світла крізь випадково неоднорідне середовище, у якому показник заломлення хаотично змінюється у просторі і/або в часі (фазовий екран). У результаті спочатку плоский хвильовий фронт стає спотвореним, що призводить до видимого розпливання точкового джерела. Вакуумна дисперсія (ВД) призводить до зміщення напрямку на джерело всередині смуги частот інтерферометра. Із значення мінімального спостережуваного кутового діаметра джерела, що перевищує інструментальну кутову роздільну здатність, можна обмежити параметри ефекту, що призводить до розпливання.

У Стандартній моделі частинок електричний заряд фотона і його дипольний момент дорівнюють нулю. Вперше обмеження на заряд фотона методом РСДБ були отримані в 1992 році і потім поліпшені до  $3 \cdot 10^{-33} e$  ( $e$  — заряд електрона) за допомогою аналізу РНДБ-спостережень джерела крізь відоме магнітне поле скупчення галактик. Всі ці результати були отримані для спостережень з кутовою роздільною здатністю у кілька мілісекунд дуги. Значне збільшення бази інтерферометра в проекті «Радіоастрон» дозволить виконати аналіз спостережень з кутовим розділенням до 7 мксд і уточнити отримані обмеження.

Дані «Радіоастрона» можуть бути також використані для пошуку аксіонів, гіпотетичних масивних псевдоскалярних частинок, введених для вирішення так званої «сильної CP-проблеми» у квантовій хромодинаміці. Аксіони розглядаються як один з можливих кандидатів на роль частинок темної матерії, у зв'язку з чим їхній пошук виконується багатьма групами експериментаторів як на прискорювачах, так і методами неприскорювальної фізики. Параметри змішування аксіонів з фотоном у магнітному полі залежать від взаємної орієнтації поля, хвильового вектора і вектора поляризації. Це призводить до специфічних ефектів: вакуумного дихроїзму і вакуумного двопронезаломлення. У першому випадку уявна частина вакуумного коефіцієнта



заломлення залежить від поляризації світла; частина поперечно (стосовно поля) поляризованого світла конвертується в реальні аксіони і стає неспостережуваною, тоді як поздовжньо (вздовж поля) поляризоване світло з полем не взаємодіє. В результаті світлова хвиля з круговою поляризацією, пройшовши крізь область магнітного поля, стає еліптично поляризованою, а площа поляризації лінійно поляризованого світла повертається, якщо її початковий нахил до напрямку поля різниться від 0 і 90°.

Запропоновано також програму для низькоорбітального супутника, спеціально сконструйованого для здійснення експериментів і спостережень космічних променів та Землі. Незважаючи на малу масу і невисоку орбіту такого супутника, за допомогою ядерного фізичного обладнання можна вести дослідження гамма-сплесків (зокрема, маловивчених коротких сплесків), вимірювання складу античастинок (антиядер) в космічних променях. При цьому це обладнання може одночасно бути використане для дослідження радіоактивності верхніх шарів атмосфери і реєстрації гамма- і нейтронного випромінювання від висотних атмосферних розрядів, спрямованих вгору (висотних блискавок), вивчення гіпотетичних процесів варіацій радіоактивного розпаду.

2. Вимірний потік геонейтрино (нейтрино з глибин Землі) у нейтринному експерименті BOREXINO (у якому ІЯД НАНУ бере участь вже понад десять років). Детектор BOREXINO являє собою великий рідкосцинтиляційний спектрометр з активною масою мішені 278 тонн, який розміщено у підземній лабораторії Гран-Сассо (Італія). Головною задачею експерименту є вимірювання потоку нейтрино від розпадів берилію-7 в Сонці, проте унікальний детектор успішно використовується для цілого ряду цікавих досліджень. У 2013 році представлено результати вимірювань нейтрино з глибин Землі, основані на аналізі даних вимірювань впродовж 1353 діб. За цей час зареєстровано  $14.3 \pm 4.4$  гео-нейтрино що дає співвідношення торію до урану в хондритах Землі 3.9. Це відповідає геонейтринному сигналу  $S_{geo} = (39 \pm 12)$  TNU (де 1 TNU = 1 Terrestrial Neutrino Unit = 1 подія / рік / на  $10^{32}$  протонів)

з дуже малою вірогідністю ( $6 \cdot 10^{-6}$ ) того, що геонейтрино не випромінюються. Ці дані узгоджуються з результатами іншого подібного експерименту KamLAND (Японія). Ще одним важливим результатом експерименту є підтвердження нейтринних осциляцій антинейтрино від реакторів. Результат вимірювань:  $31.2^{+7.0}_{-6.1}$  реакторних антинейтринних подій (від реакторів головним чином у Франції і Німеччині) знаходиться у згоді з очікуваннями за умови існування нейтронних осциляцій.

3. Отримані нові обмеження на змішування важких стерильних нейтрино у розпаді ядра  ${}^8\text{B}$  за допомогою детектора BOREXINO. Масивні стерильні нейтрино зараз розглядаються як дуже привабливе пояснення темної матерії, вони фігурують у багатьох моделях, розширеннях стандартної моделі частинок. Якщо важкі нейтрино з масою  $m_{\nu_H} \geq 2 m_e$  (де  $m_e$  – маса електрона) виробляються на Сонці в розпадах  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e + \nu_H$ , вони можуть потім розпадатися на електрон, позитрон і електронне нейтрино:  $\nu_H \rightarrow \nu_L + e^+ + e^-$ . З аналізу даних експерименту Borexino було встановлене обмеження на існування таких розпадів. Вірогідність змішування важких стерильних нейтрино з масою  $1.5 \text{ MeV} \leq m_{\nu_H} \leq 14 \text{ MeV}$  становить  $|U_{eH}|^2 \leq (10^{-3} - 4 \cdot 10^{-6})$  відповідно. Це нові обмеження на параметри змішування важких нейтрино у порівнянні з отриманими раніше в експериментах на реакторах.

4. Запропоновано проект SOX для досліджень осциляцій нейтрино на відстанях від кількох до кількох десятків метрів. Як відомо, нейтринні осциляції найбільш складно спостерігати саме на таких малих відстанях у кілька метрів — кілька десятків метрів, оскільки ефект за таких умов є надзвичайно слабким. Дуже низький радіаційний фон детектора Borexino, у поєднання з його великими розмірами (а отже значною ефективністю реєстрації нейтрино) дає змогу вивчення нейтринних осциляцій на коротких відстанях з використанням штучних радіоактивних джерел нейтрино і антинейтрино, таких як  ${}^{51}\text{Cr}$  (джерело нейтрино) і  ${}^{144}\text{Ce} - {}^{144}\text{Pr}$  (джерело антинейтрино). Крім того, показано, що в експерименті можна буде вивчати стерильні нейтрино з масою близько електрон вольта, а також здійснити по-



шуки магнітного моменту нейтрино, точних вимірювань кутів змішування в теорії електрослабкої взаємодії.

5. Вивчений фон детектора *BogeXino* спричинений мюонами в органічному рідкому сцинтиляторі. Це стало можливим завдяки точній ідентифікації подій від космічних мюонів у детекторі (мюони проходять по прямій через увесь об'єм детектора). Вихід нейтронів індукованих мюонами виміряний як  $Y_n = (3.10 \pm 0.11) \cdot 10^{-4}$  нейтронів на мюон на грам на см<sup>2</sup>. Виміряна відстань між треком мюона і точкою захвату нейтрона  $81.5 \pm 2.7$  см. Крім того, виміряні виходи ряду космогенних радіоізотопів, а саме <sup>12</sup>N, <sup>12</sup>B, <sup>8</sup>He, <sup>9</sup>C, <sup>9</sup>Li, <sup>8</sup>B, <sup>6</sup>He, <sup>8</sup>Li, <sup>11</sup>Be, <sup>10</sup>C та <sup>11</sup>C. Всі результати порівнюються з розрахунками методом Монте-Карло з використанням пакетів програм *FLUKA* і *Geant4*. У цілому дані експерименту узгоджуються з розрахунками. Це є важливим методичним результатом і показує можливість описувати такі складні компоненти фону, що необхідно для усіх низькофонових експериментів не лише на детекторі *BogeXino*, а й у подібних установках для дослідження нейтрино.

6. Запропоновано експеримент *DarkSide* для пошуку темної матерії за допомогою двофазної часово-проекційної камери з рідким аргоном. Як перший крок, під землею в Національній лабораторії Гран Сассо в Італії, був побудований прототип детектора з активним об'ємом, що містить 10 кг рідкого аргону *DarkSide-10* (подальшим кроком має стати будівництво детектора з 50 кг аргону). Критично важливим параметром для таких пристроїв є вихід і збір сцинтиляційного світла для забезпечення якомога нижчого порогу розділення сигналів від частинок темної матерії і фонових подій. Для калібрування енергетичної шкали детектора (що є однією з головних проблем детекторів темної матерії) світловихід був виміряний у прототипі детектора *DarkSide-10* з використанням піків повного поглинання від джерел гамма-випромінювання у поєднанні з калібруванням за допомогою лазера. Для гамма-ліній з енергією в діапазоні 122–1275 кеВ був отриманий світловихід у середньому  $8.887 \pm 0.003$  (стат)  $\pm 0.444$  (сист) фотоелектронів на кеВ поглинутої енергії. Завдяки додатковому очи-

щенню, світловий вихід на енергії гамма-квантів 511 кеВ збільшився до  $9.142 \pm 0.006$  (стат) фотоелектронів на кеВ.

7. Вперше запропоновано експеримент чутливий до напрямку частинок темної матерії (проект *ADAMO*, *Anisotropic Detectors for dArk Matter Observation*) на основі анізотропних сцинтиляційних детекторів вольфрамату цинку (*ZnWO<sub>4</sub>*). Проект оснований на суттєвій анізотропії сцинтиляційного відгуку кристалів *ZnWO<sub>4</sub>*. У цих сцинтиляторів світловий вихід і форма імпульсу для важких частинок ( $p$ ,  $\alpha$ , ядер віддачі) залежить від напрямку руху по відношенню до осей кристала; у той час як відгук до  $\gamma/\beta$  випромінювання є ізотропним. Ця властивість дає можливість побудувати детектор темної матерії, чутливий до напрямку, а отже до добових модуляцій темної матерії. Серед анізотропних сцинтиляторів *ZnWO<sub>4</sub>* має унікальні особливості (зокрема дуже низький рівень радіоактивної забрудненості, можливість росту кристалів масою у кілька кг), які роблять його відмінним кандидатом для такого роду досліджень.

8. Вивчено залежність відгуку сцинтиляційного детектора темної матерії з кристалами *ZnWO<sub>4</sub>* різної форми (гексагональна чи циліндрична), з рефлекторами різної форми і виготовленими з різного матеріалу, в залежності від наявності оптичного контакту, якості поверхні кристалів (полірована чи дифузна). Результати експериментальних вимірювань були промодельовані за допомогою пакетів програм *Geant4* та *Zemax* з метою розробки методів оптимізації криогенних сцинтиляційних детекторів темної матерії. Показано, що спеціалізований пакет *Zemax* (розроблений для моделювання оптичних пристроїв), на відміну від *Geant4* (основним призначенням якого є моделювання процесів у фізиці високих енергій), точніше описує процеси збору сцинтиляційних фотонів.

9. Отримано нові обмеження на процеси подвійного бета-розпаду в ядрах <sup>96</sup>Ru та <sup>104</sup>Ru. Дослідження подвійного бета-розпаду є одним з пріоритетних напрямків фізики елементарних частинок завдяки унікальним можливостям визначити природу нейтрино (частинка Майорани чи Дірака), схему мас нейтрино та її абсолютне

значення, перевірити закон збереження лептонного заряду, існування правих токів у слабкій взаємодії та бозонів Намбу — Голдстоуна (так званих майоронів), ряд інших ефектів за межами стандартної моделі частинок. Властивості нейтрино відіграють також ключову роль у космології. Зокрема, майоранівська природа нейтрино може пояснити порушення CP-інваріантності і, як наслідок, баріонну асиметрію Всесвіту. Пошуки процесів подвійного бета-розпаду в ізотопах рутенію були здійснені на новому рівні чутливості за допомогою наднизькофонові HPGE  $\gamma$ -спектрометрії. Встановлено нові обмеження до періоди напіврозпаду на рівні  $10^{19}$ — $10^{20}$  років. Особливий інтерес до рутенію пов'язаний з можливістю резонансного безнейтринного подвійного бета-розпаду ядра  $^{96}\text{Ru}$  на збуджені рівні дочірнього ядра, для яких виконується умова виродженості збуджених рівнів (енергія переходу близька до енергії збудженого рівня мінус енергія електронів на оболонках дочірнього ядра). В наших експериментах вперше встановлено обмеження на періоди напіврозпаду ядра  $^{96}\text{Ru}$  відносно безнейтринного подвійного бета-розпаду на збуджені рівні 2700.2 і 2712.7 кеВ дочірнього ядра  $^{96}\text{Mo}$ .

10. Вперше досліджено подвійний бета-розпад  $^{184}\text{Os}$  та  $^{192}\text{Os}$  та встановлено обмеження на періоди напіврозпаду на рівні  $10^{15}$ — $10^{19}$  років. Подібно до рутенію, у ядрі  $^{184}\text{Os}$  також можливий резонансний процес. Це ядро особливо цікаве тим, що теоретично резонансні процеси мають йти з високою вірогідністю саме у важких ядрах (ядро  $^{184}\text{Os}$  є одним з найважчих ядер, в яких можливі резонансні процеси).

11. Вперше розроблені і досліджені кристали молібдату цинку і літію високої оптичної якості для застосування як низькотемпературних болометрів з високими енергетичною здатністю та розділенням подвій від бета- і альфа-частинок (що дозволяє ефективно знизити фон детектора) для дослідження властивостей нейтрино в експерименті з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядра молібдену 100. Показано, що з кристалами  $\text{ZnMoO}_4$  і  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  можна побудувати експеримент, здатний визначити схему масових станів нейтрино.

12. Досліджено радіоактивну забрудненість кристалів  $^7\text{Li}(\text{Eu})$  і показано можливість використання цього матеріалу як детектора для пошуку аксіонів (частинки кандидати на роль темної матерії), що можуть виникати в ядрі Сонця у процесі розпаду ядер  $^7\text{Li}$  (у протон протонному ланцюжку) і потім резонансно поглинатися ядрами  $^7\text{Li}$  на Землі з випромінюванням гамма-квантів певної енергії.

## Напря м В

### Нові матеріали, конструкції та технології космічної галузі

#### ПРОЕКТ 23

#### Нові наноконпозиційні матеріали для космічних сенсорів (акселерометрів, гравіметрів, датчиків тиску тощо)

*Інститут космічних досліджень  
НАН України та ДКА України*

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук *Ю. О. Клименко*

**Еман 1.** «Розроблення засобів синтезу полімерної матриці та виявлення умов формування електропровідної фази в наноконPOSITI».

Розроблено засоби синтезу пружної полімерної матриці з високою адгезією до вуглецевих наповнювачів. Продемонстровано, що наноконPOSITI на основі натурального каучуку із електропровідними вуглецевими наповнювачами демонструють високі пружні властивості, проте недостатній рівень електричного відгуку. Показано, що наноконPOSITI на основі еластичного полімеру та суміші дисперсного нікелю із вуглецевими волокнами демонструють найбільш прийнятні характеристики електричного відгуку та є перспективними для подальших досліджень.

Показано, що поблизу точки перколяції (тобто, точки переходу діелектрик — метал) питома електропровідність композиту змінюється на шість порядків за рахунок ефективної зміни густини вуглецевих наповнювачів у циклах навантаження/розвантаження матеріалу. Виявлено гістерезис в циклах навантаження/розванта-

ження, який існує завдяки непружним процесам пакування вуглецевих наповнювачів.

Проведено експерименти з вивчення впливу радіаційного опромінення на нанокompозити. Показано, що опромінення нанокompозитів проникною радіацією підвищує його адгезійні та еластичні властивості. При цьому електричний відгук у циклах навантаження/розвантаження залишається майже незмінним. Також встановлено, що лише перші дози опромінення призводять до зміни положення перколяційного переходу.

Проведено огляд літератури щодо застосування нанокompозитів у космічних сенсорах та дано оцінку максимальних поглинених доз іонізаційного випромінювання в залежності від типу матеріалу та орбіти, на якій розташований супутник.

#### ПРОЕКТ 24

##### **Розробка комплексу експериментальних засобів для дослідження впливу факторів навколоземного космічного простору на міцність конструкційних матеріалів**

*Інститут проблем міцності НАН України*

Науковий керівник:  
член-кореспондент НАН України *В. О. Стрижало*

Розроблено робочий проект (креслення) лабораторного аналога бортової багатозразкової установки для випробувань на циклічну втому з електромеханічним приводом.

Розроблено робочий проект (креслення) тарувального пристрою до цієї установки.

Розроблені нові теплообмінні вузли дослідного двигуна із зовнішнім джерелом енергії.

#### ПРОЕКТ 25

##### **Розробка нових технологій стенду для радіаційних випробувань матеріалів та приладів космічного призначення**

*Інститут електронної фізики НАН України*

Науковий керівник:  
доктор фізико-математичних наук *В. Т. Маслюк*

**Еман 1.** «Сучасні потреби та вимоги до радіаційних випробувань матеріалів та приладів космічної техніки».

Роботи даного етапу досліджень полягають у систематизації сучасних даних щодо параметрів космічного ядерного випромінювання, моделей радіаційних поясів Землі (РПЗ), сонячних космічних променів (СКП) і галактичних космічних променів (ГКП), взаємодії космічного випромінювання із речовиною та розрахунку поглинутих доз у матеріалах, а також спеціальних питань світової практики радіаційних випробувань: огляд стандартів досліджень впливу іонізаційних випромінювань на космічні апарати (КА), обладнання для проведення радіаційних випробувань, лабораторні експериментальні установки, включно із радіаційним стендом ІЕФ НАН України на основі мікротрона М-30 для випробувань матеріалів та приладів космічної техніки.

Зокрема, приведено огляд стандартів моделей космічного простору, що стали основою розробки променевих моделей та математичних пакетів для розрахунку радіаційних навантажень на КА, розподілу поглинутих доз в елементах КА. Вперше у вітчизняній практиці систематизовано та проведено порівняльний аналіз стандартів Росії, Євросоюзу та США радіаційних випробувань на конструкційні матеріали, матеріали покриття та електронну компонентну базу апаратури КА.

Інша група представлених даних стосується світових апаратних можливостей проведення радіаційних випробувань матеріалів та приладів космічного призначення. Це стосується обладнання: прискорювачі заряджених частинок, способів модифікації їхнього енергетичного спектру, ізотопні джерела випромінювань імітаторних установок, а також методик їхнього дозиметричного супроводу. В останньому випадку важливими є умови прискорених радіаційних випробувань, імітація натурних випробувань на моделювальних ядерно-фізичних установках.

І нарешті, зіставлено можливості радіаційного стенду на основі мікротрона М-30 ІЕФ НАН України і відомих лабораторних експериментальних установок Європи та США для проведення радіаційних випробувань.

Підготовлено програмне забезпечення для модернізації дозиметричного контролю на мікротроні М-30 у процесі набору дози.

Проведено серію натурних радіаційних досліджень впливу умов опромінення М-30 (енергія прискорених електронів, 5, 12 МеВ, щільність потоку, дозове навантаження) на прикладі дозиметричних матеріалів на основі легованого лейкосапфіру. Показана можливість контролю умов опромінювання *in situ* на мікротроні М-30 як апаратними засобами, так і за допомогою дозиметричних матеріалів. Такі дані важливі для обґрунтування прискорених радіаційних випробувань з використанням радіаційного стенду на основі мікротрона М-30.

## ПРОЕКТ 26

### Створення та дослідження конструкцій перетворюваного об'єму (КПО) космічного призначення

*Інститут електрозварювання  
ім. Є. О. Патона НАН України*

Науковий керівник:  
академік НАН України *Л. М. Лобанов*

**Еман 2.** «Математичне моделювання процесу ізометричного перетворення багатоконусної КПО, розробка режимів розкриття шляхом створення надлишкового тиску у внутрішній порожнині конструкції».

У відповідності до задачі проекту при виконанні другого етапу роботи (2013 р.) проведено теоретичні та експериментальні дослідження власне процесу перетворення тонкостінної КПО космічного призначення та його визначальних параметрів, обумовлених різноманітністю сполучень прийнятних властивостей конструкційних матеріалів оболонки та їхнім зв'язком із факторами зовнішнього впливу; сформульовано, доведено аналітично та внесено до наукових публікацій відповідні твердження, що обґрунтують теоретичну можливість здійснення досліджуваних деформацій оболонкових поверхонь та визначають їхній оптимальний характер. При математичному моделюванні процесу перетворення здійснено побудову динамічної скінченноелементної моделі багатоконусної КПО із врахуванням властивостей реального матеріалу оболонки та аналіз характеру розподілу в ній напружень на послідовних стадіях перетворення.

Враховуючи актуальність проблеми коректного відтворення на стадії проектування конструкції характерних зовнішніх факторів впливу космічного середовища, при виконанні роботи було розроблено комплекс лабораторного та експериментального устаткування для здійснення коригування розрахункових параметрів процесу трансформації та визначення характеру напружено-деформованого стану КПО при довготерміновій експозиції на навколореземній орбіті. Шляхом дослідження циклограм розкриття трансформованих оболонок в умовах існування зовнішніх стискних середовищ визначено алгоритми створення надлишкового тиску для групи конструкційних матеріалів із обраним розрахунковим шляхом діапазоном пружно-пластичних властивостей, а також визначено характерні особливості кінетики процесу перетворення, пов'язані з нелінійним перерозподілом радіальних та нормальних напружень у рухомих кільцевих елементах конічної поверхні. За допомогою розробленої термостатованої камери методами оптичної пірометрії визначені термооптичні характеристики реальних матеріалів оболонки у температурних діапазонах, що відповідають умовам експлуатації КПО на навколореземній орбіті; на підставі отриманих даних проведено коригування моделей ізополів напружень та деформацій довгомірної КПО в умовах дії факторів космічного простору.

## ПРОЕКТ 27

### Вивчення впливу мікрогравітації на змочування рідинами неорганічних матеріалів та паяння їх металевими розплавами

*Інститут проблем матеріалознавства  
ім. І. М. Францевича НАН України*

Науковий керівник:  
академік НАН України *Ю. В. Найдіч*

**Еман 2.** «Дослідження крайових кутів змочування в низько- та високотемпературних системах в земних умовах, що імітують різну гравітаційну дію».

Модифікована конструкція стенду для вимірювання крайових кутів змочування низькотемпературними рідинами твердих поверхонь шля-



хом додавання до стенду вузла з подачею рідини на тверду поверхню зразка знизу через отвір в ньому, здійснення мініатюризації основних вузлів та зменшення ваги апаратури до 2.5 кг з огляду можливості використання її на борту МКС.

Проведено додаткові дослідження крайового кута змочування водою, гліцерином, розчином гіпосульфиту та фосфорної кислоти поверхонь кварцового скла, сапфіру, тefлону, графіту та стеарата цинку з метою виявлення можливої залежності крайового кута змочування від розмірів крапель, що моделюють зменшення дії гравітації. Експерименти підтверджують, що гравітаційний вектор не впливає на значення крайового кута змочування.

Удосконалена конструкція кварцово-металевих касет та конструкція пристрою для дослідження крайового кута змочування розплавленими металами твердих тіл при дії на них різного значення відцентрової сили (до  $22 g_0$ ) шляхом крутіння касети з необхідною швидкістю.

Сконструйований та виготовлений стенд для дослідження крайових кутів змочування розплавленими металами твердих неметалевих поверхонь, живлення якого забезпечується струмом з низькою напругою 27 В, тобто з можливістю використання стенду на борту МКС.

Сформульовано принцип та змодельовано (в земних умовах) процес видалення газових включень (пухирців) з різних рідин (металеві розплави, паливні ракетні суміші).

В підсумку виконаних робіт у 2013 році виявлено, що для кожної конкретної системи тверда поверхня — рідина (включно з розплавленими металами) крайовий кут змочування залишається постійним незалежно від розмірів крапель (навіть для нанокрапель), а також від дії відцентрової сили. Отже, отримані на Землі результати досліджень свідчать про те, що рівняння Юнга є правильним в його теперішньому вигляді, в якому в рівняння не входить прискорення земного тяжіння  $g_0$ .

## Напря м Г Космічне приладобудування

### ПРОЕКТ 28

#### Визначення орієнтації, координат, взаємного положення та параметрів руху об'єктів у космосі з використанням ГНСС-технологій

*Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України*

Науковий керівник:  
доктор фізико-математичних наук В. І. Луценко

В ході виконання 1 етапу роботи розроблено методику визначення положення, орієнтації та відстані між об'єктами у космосі. Вирішено алгоритмічну задачу побудови супутникового навігаційного поля для різних висот об'єктів з використанням імітаторів, створено сценарій імітації ГНСС-сигналів, проведено моделювання з використанням імітатора режиму роботи приймача ГНСС на космічному об'єкті, розроблено макетні зразки вимірювальних комплексів, проведено попередні експериментальні дослідження та проаналізовано їхні результати. Для цього на базі вимірювального пункту в ІРЕ (м. Харків) розгорнуто вимірювальний комплекс з трьох одночастотних приймачів СН4719 (рознесення між приймачами за шириною на 2 м й довготою на 1 м). На ньому з липня 2013 р. до н/ч проводилися цілодобові фазові вимірювання. Одночасно з цим четвертий приймач типу СН4706 працював в режимі кодових вимірювань і використовувався для зіставлення результатів, кодових та фазових вимірювань. Для накопичених «сирих» даних вимірювань проведена попередня статистична обробка з використанням розробленого пакета програм «Saturn». Проведено декілька іспитів, коли приймач СН4706 розміщувався на рухомому об'єкті (автомобіль УАЗ-469) і імітувалася ситуація зближення та розходження об'єктів, оснащених приймачами ГНСС на відстань до 10 км. При цьому була можливість на приймачі, розташованому на рухомому об'єкті, проводити як кодові, так і фазові вимірювання. Крім того, на базі ХНУРЕ для проведення експериментальних досліджень (тестування) розроблено прототипу високоточної

GPS-системи визначення параметрів кутової орієнтації (ПКО) рухомих об'єктів був створений макет кутомірної системи, в якому був реалізований варіант кутомірної системи з використанням незалежних GPS-приймачів з несинхронізованими годинниками. До складу макету кутомірної системи визначення ПКО рухомих об'єктів входили: опорно-поворотний механізм, чотири приймачі (два двочастотні приймачі NovAtel і два одночастотні приймачі NovAtel OEM6 з приймальними антенами Tallysman TW3430), пристрій реєстрації GPS-спостережень. Було розроблене програмне забезпечення для роботи з приймачами NovAtel, а також пристосоване вітчизняне програмне забезпечення ОСТАВА післясеансної обробки та аналізу GPS-спостережень, розроблено прототип спеціального програмного забезпечення для визначення параметрів кутової орієнтації рухомих об'єктів. Крім задачі кутових визначень, в рамках проведених робіт було розв'язано задачу визначення відносного високоточного позиціонування/навігації (за фазовими ГНСС-спостереженнями) рухомих об'єктів, що зближуються/віддаляються до відстаней між об'єктами у декілька сотень метрів. Виконано дослідження розроблених алгоритмів та програмних модулів обробки спостережень, зокрема задач розрізнення фазової неоднозначності (РФН) для одно- та двочастотних GPS-спостережень на малих базових відстанях та оцінки ПКО. Досліджено вплив додаткової «обмежувальної» інформації про довжину базових ліній на надійність РФН та точність оцінок поточних відносних координат.

Для проведення експериментальних досліджень визначень ПКО рухомих об'єктів створено макет високоточної кутомірної системи й розроблені спеціальні програмні модулі визначення ПКО рухомих об'єктів для варіанта побудови кутомірної системи з використанням окремих ГНСС приймачів з несинхронізованими шкалами часу.

Розроблений прототип кутомірної системи дозволяє визначати кути з точністю (СКП): курсу —  $0.06^\circ$ , крену —  $0.3^\circ$ , тангажу —  $0.28^\circ$ , що відповідає точності аналогічних систем відомих

світових виробників (TRIMBLE SPS461 GPS, NovAtel FlexG2 Heading, NovAtel SE-D-L1L2-G-Z, МРК-32, Navic і ін.).

Додатково на базі ТОВ «Навіс-Україна» був розгорнутий вимірювальний комплекс з використанням 3 приймачів, розташованих у фіксованих точках простору, до складу якого входять 3 антени, вимірювальний блок та ПК. Комплекс призначений для опрацювання алгоритмів визначення кутового положення фазових центрів антен. Мета обробки сигналів — розрахунок кутів просторової орієнтації — азимута, диференту (тангажу) та крену. В комплексі було використано антени фірми «Навіс-Україна» для обладнання контрольно-коригуючих станцій, які дають змогу зменшити вплив багатоприменності до 1 мм у перерахунку до довжини базової лінії. Накопичені файли «сирих» вимірювань в точках накопичення м. Харків, Сміла, Полтава та Суми конвертувались в файли формату `gipex`. Для цього була спеціально розроблена програма `raw_to_gip`. Файли цього типу в подальшому обробляються програмою `Saturn`. Результатом обробки були файли звітності по довжині базової лінії та її азимуту. Для обробки попередньо вибирались файли за одні й ті ж проміжки часу. Таким чином була сформована база вимірювань на великих базових відстанях — сотні кілометрів.

Вирішено алгоритмічну задачу побудови супутникового навігаційного поля для різних висот космічних об'єктів з використанням імітатора. При цьому вирішено задачу врахування параметрів тропосфери та, у першу чергу, іоносфери Землі в сценарії імітації навігаційного поля, що дало можливість налаштування процесів руху та стикування об'єктів у космічному просторі ще до запуску об'єктів. Надалі планується доробка сценарію імітації сигналів супутникових систем, за допомогою якого можна буде відпрацювати методи визначення координат для декількох КА, параметрів їхнього руху та орієнтації, які будуть використовуватися при відпрацюванні зближення та стиковки об'єктів у космосі.

Експериментально досліджена можливість зменшення похибок визначення координат при введенні диференційних поправок координат та псевдовідстаней. Використання диференційних

поправок обчислення псевдовідстаней є одним з найбільш потужних засобів зменшення похибок вимірювання координат, пов'язаних з впливом умов поширення. При цьому, як було показано експериментально, можна використовувати бази між референтною та обмірювальною станціями довжиною до 400 км.

Запропоновані та експериментально досліджені параметричні та непараметричні методи цифрової фільтрації, які дозволяють усунути аномально високі похибки вимірювання координат — так звані імпульсні похибки. Запропоновані підходи дозволяють знизити середню квадратичну похибку в середньому до 20 %. Однак при цьому вдається усунути малоімовірні, але високоінтенсивні викиди, що можуть приводити до аномально високих похибок вимірювання поточних координат.

Приведено аналіз розробок перспективних акселерометрів та мікроелектромеханічних систем як перспективного напрямку розвитку супутникового приладобудування. Показано перспективність розробки акселерометрів на основі явища надпровідності та з використанням масиву нанотрубок. Сформульовано принципи створення перспективного супутникового акселерометра та розроблено пропозиції щодо їхньої реалізації. Показано, що для реалізації конкурентоспроможного супутникового акселерометра необхідно розробити керований магнітний підвіс пробного тіла на основі високотемпературних наноплівки з використанням оберненого зв'язку та мікропроцесорного мікромодуля. При цьому необхідно врахувати вплив різних чинників на жорсткість підвісу, серед яких, зокрема, наявність додаткової ферромагнітної маси на вільній пробній масі, вплив активного та пасивного фільтрів на точність вимірювань. Розроблено математичні моделі динаміки та стійкості керованого надпровідного підвісу. Побудовано чисельні алгоритми оцінювання величини прискорення левітуючого пробного тіла. Спільне використання даних супутникового акселерометра та даних, отриманих по сигналах ГНСС, може дозволити знизити похибки визначення координат та параметрів руху КА.

### Наукові результати

1. Запропоновано інтерполяційний метод введення корекції координат, який на відміну від існуючих, використовує дані трьох базових станцій. Запропонований підхід дозволяє підвищити стійкість та достовірність корекцій координат. Цей метод введення диференціальної корекції, як правило, зменшує дисперсію похибки координат на 20...25 % для поточних значень. При цьому запропонований підхід дозволяє знизити систематичну помилку в порівнянні з тією, що одержується при стандартному диференціальному методі корекції.

2. Експериментальне досліджено особливості поведінки радіосигналів ГНСС при малих кутах піднесення супутника над обрієм. Результати дозволили запропонувати алгоритм вилучення з вирішення навігаційної задачі супутників з великим рівнем флуктуацій сигналів, який пов'язаний з впливом умов поширення радіохвиль, що може призводити до появи аномально високих похибок вимірювання координат, яких потрібно уникати при проведенні маневру стикування космічних апаратів. Використання в алгоритмі вилучення викидів додаткового каналу першої похідної дозволяє знизити величини викидів на рівні вірогідності 0.99 до 0.44...0.54 від рівня вихідного процесу (в нормованих координатах) і 0.235...0.325 при рівні 0.9 для фільтру з ковзним середнім. Для медіанного фільтра вони мають значення 0.489...0.66 при рівні 0.99 та 0.563...0.746 при рівні 0.9.

3. Показано, що у випадку використання двочастотних спостережень задачу РФН надійно вирішено для кожної окремої епохи при визначенні векторів баз як під час вирішення задачі оцінки ПКО, так і при відносному визначенні об'єктів, що зближуються/віддаляються (у кінематичному режимі спостережень). При цьому немає необхідності використовувати обмежувальні умови в задачі визначення ПКО.

4. У випадку використання тільки одночастотних спостережень для надійного вирішення задачі РФН потрібно 7—10 хв, тому що в умовах тестування переважає сильно корельована багатопроменева складова похибок кодівих і фазових GPS-спостережень. Для підвищення надійності

РФН одночастотних спостережень необхідно використовувати обмежувальні умови — інформацію про базові відстані між фазовими центрами антен. Використання обмежувальних умов дозволило зменшити мінімальний інтервал для надійного рішення завдання РФН до 1 хв.

5. При вирішенні задачі відносних кінематичних визначень/навігації рухомих об'єктів похибки позиціонування (СКВ) не перевищували 10 мм для всіх трьох координат на базових відстанях ~200 м протягом усього сеансу вимірів (~40 хв).

## ПРОЕКТ 29

### Концепція побудови та експериментальне відпрацювання прототипу компактного супутникового приладу SIDRA з реєстрації потоків заряджених частинок високих енергій

*Радіоастрономічний інститут НАН України*

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук *О. В. Дудник*

**Еман 1.** «Розробка концепції побудови, алгоритмів обробки сигналів, робочої конструкторської документації і принципів електричних схем прототипу компактного супутникового SIDRA».

Запропоновано конфігурацію прототипу приладу SIDRA, побудовану за принципом модульної конструкції: детекторний модуль; модуль аналогової обробки сигналів; модуль цифрової обробки сигналів і модуль вторинного живлення. Механічна частина приладу передбачає виготовлення трьох фрезерованих корпусів, які кріпляться між собою. Усередині корпусу приладу передбачено вільний простір для розміщення стрічкових кабелів і кабелів у вигляді джгутів, що дозволяють виконати електричні з'єднання між окремими модулями. Із зовнішнього сторони верхньої частини корпусу механічно кріпиться детекторний модуль, що включає в себе сенсорну частину, яка складається з напівпровідникових і скінтіляційного детекторів. На підставі вказаних підходів розроблено ескізний варіант габаритного креслення макету приладу. На кресленні зображений прилад у трьох проекціях, вказані габаритні і настановні розміри макета приладу і

технічні вимоги до умов виготовлення, кріплення, експлуатації.

За допомогою програми дизайну AutoCAD Mechanics 2002 здійснено проектування механічних блоків детекторної головки приладу. Результатом проектування є ескізні креслення блоків детекторного модуля: утримувачів кремнієвих детекторів; утримувача скінтіляційного детектора; конічної системи формування кута зору приладу; детекторної голівки. Детекторний модуль конструктивно складається з кришки, конуса, корпусу. Кришка захищає від попадання світла і пилу, конус фокусує потрапляння частинок усередину корпусу. Усередині корпусу розташовані три напівпровідникові і один скінтіляційний детектори. Детектори розташовані у певній послідовності і на певній відстані між собою, що забезпечує необхідний кут огляду. Напівпровідникові детектори встановлюються у спеціальні утримувачі, за допомогою яких вони кріпляться до корпусу детекторного модуля. Утримувачі стосовно один одного розміщені паралельно і під кутом 90°. Таке розташування утримувачів звільняє всередині корпусу детекторного модуля місце для прокладання кабелів від детекторів до модуля аналогової обробки сигналів. Вузол утримувача напівпровідникового детектора являє собою фрезований корпус з двома точками кріплення і посадковим місцем під напівпровідниковий детектор. Зверху до корпусу кріпиться спеціальна пластина, яка фіксує положення напівпровідникового детектора в корпусі утримувача.

Розроблені функціональна схема каналів аналогової обробки сигналів, схеми принципів електричні попередніх зарядо-чутливих підсилювачів, підсилювачів-формуваць, та пристроїв вибірки і запам'ятовування сформованих аналогових сигналів псевдогауссової форми з залученням пакету програм National Instruments Multisim 11.0.2. Модуль аналогової обробки являє собою двосторонню друковану плату, на якій виконані чотири незалежні канали обробки сигналів, а саме: перші три канали призначені для підключення високоомних кремнієвих детекторів товщиною 100, 1000 і 1600 мкм відповідно, і четвертий канал для обробки сигналів, що над-



ходять від кремнієвого фотоелектронного помножувача.

Для забезпечення модулів супутникового приладу SIDRA необхідними рівнями напруг розроблені структурна і електрична схема плати вторинного живлення. Плата вторинного живлення генерує усі необхідні рівні напруги для аналогового та цифрового модулів, а також усі необхідні напруги зворотного зміщення для кремнієвих детекторів від бортової мережі +27 В. Схемне рішення блока живлення виконане за принципом «холодного резервування», тобто, фактично, на одній платі блока розташовано два ідентичних канали, що забезпечують всі необхідні напруги живлення, але тільки один канал постійно ввімкнений і навантажений. Перемикання між каналами блока живлення здійснюється за допомогою спеціальної команди ззовні, схемна реалізація відпрацювання якої також реалізована на платі блока живлення. Принцип «холодного резервування» значно підвищує надійність роботи найбільш навантаженого блока приладу SIDRA — плати вторинного живлення. Блок живлення приладу SIDRA передбачає ланцюги контролю для всіх вторинних напруг. Контроль здійснюється за командою, що генерує бортова електроніка космічного апарата або інша схема управління. Схема блока передбачає захисні ланцюги від перепадів та завод по первинних ланцюгах живлення. Передбачені самовідновлювальні запобіжні ланцюги від короткого замикання первинних ланцюгів живлення.

За методом Монте-Карло здійснено комп'ютерне моделювання проходження легких ядер крізь детектори телескопічної системи приладу. При цьому були використані бібліотеки пакету програм GEANT4, які описують проходження протонів, дейтронів, альфа-частинок та ядер літію крізь матеріал детекторів. В результаті моделювання отримані величини поглинених енергій в матеріалах детекторів для кожного сорту заряджених частинок, що моделювалися. Проведено моделювання проходження електронів і протонів різних енергій крізь модель детекторного модуля під різними кутами надходження. Моделювання проводилося за допомогою програми Geant4-9.6.1 та з використанням математичної моделі

детекторного модуля. В якості коліматорної системи моделювалася конфігурація детекторного модуля, що включає в себе ступінчастий коліматор. При моделюванні проходження електронів та протонів крізь детекторний модуль під різними кутами надходження діаметр зрізу потоку первинних частинок дорівнював 80 мм. Кут надходження первинних частинок змінювався від 0 до 50° відносно осі  $Z$  детекторного модуля з кроком по куту надходження у 5°. На кожному куті виконане моделювання проходження електронів з фіксованими первинними енергіями 100, 250 та 500 кеВ та протонів з первинними енергіями 1.5, 8 та 15 МеВ крізь телескопічну систему детекторів детекторного модуля. Кількість частинок кожної фіксованої енергії первинних частинок становила  $10^6$  на весь діаметр зрізу потоку первинних частинок. В результаті обробки даних, накопичених при моделюванні, були побудовані залежності коефіцієнта реєстрації первинних частинок від кута їхнього надходження та визначена фактична кутова чутливість детекторного модуля.

Розроблена схема електрична принципова спектрометричних каналів обробки сигналів з детекторів Д1-Д4. Канали Д1, Д2 і Д3 функціонально не відрізняються один від одного і складаються з таких блоків: зарядочутливий попередній підсилювач (призначений для перетворення поглиненої енергії в кремнієвому детекторі у сходинок напруги, пропорційну величині поглиненої енергії); підсилювач-формував (призначений для формування спектрометричного імпульсу з вихідного сигналу ЗЧПП); масштабний підсилювач (призначений для зміни коефіцієнта підсилення спектрометричного імпульсу, тим самим забезпечує переключення режимів детектування заряджених частинок); пристрій вибірки та запам'ятовування (перетворює сформований на підсиленій імпульс у цифровий код, придатний до обробки цифровим модулем, а також приймає участь у логіці визначення сорту частинки). На відміну від каналів Д1, Д2 та Д3, канал Д4 не є спектрометричною одиницею, а призначений для реєстрації частинок високих енергій та вторинних гама-квантів низьких енергій. Канал Д4 оброблює сигнали з лічильни-

ка фотонів та функціонально значно простіший за спектрометричні канали Д1, Д2 та Д3. Аналоговий модуль виконаний на базі пасивних елементів типорозміром 0603 та на базі мікросхем у корпусах SOIC, що дозволило максимально мінімізувати геометричний розмір друкованої плати, яка є кінцевим продуктом розробки.

Кожен з двох напівкомплектів блока живлення складається з п'яти незалежних каналів, а саме: один канал, що генерує живлення для аналогового модуля, один — для модуля цифрової обробки даних та три канали, що генерують напруги зміщення для кремнієвих детекторів детекторного модуля приладу SIDRA. Канали живлення аналогового та цифрового модулів побудовані на базі DC/DC-перетворювачів первинної напруги +27 В, що надходить від космічного апарата, у необхідні  $\pm 5$  В та +5 В відповідно. В розробленій схемі передбачені індуктивно-ємнісні та ємнісні фільтри по первинних та вторинних ланцюгах живлення каналів  $\pm 5$  В та +5 В. DC/DC-перетворювачі мають гальванічний розділ між первинними та вторинними ланцюгами, що значно підвищує завадостійкість каналів живлення АМ та ЦМ від перепадів напруги бортової системи живлення.

Канали, що генерують напруги зміщення для кремнієвих детекторів, побудовані на базі лінійних DC/DC-перетворювачів виробництва фірми «Matsusada Inc.». Ці DC/DC-перетворювачі мають окремий вхід для керування величиною вихідної напруги. Величина вихідної напруги змінюється від 0 до максимального значення за лінійним законом від величини напруги на вході. Величина керувальної напруги лежить в межах від 0 до 10 В. У зв'язку з тим, що в процесі роботи приладу SIDRA зовсім не потрібно змінювати величини напруг зміщення кремнієвих детекторів, то схема регулювання вихідної напруги реалізована у вигляді звичайного дільника напруги, на базі потенціометра. На етапі налаштування детекторного модуля цим потенціометром встановлюється оптимальне значення напруги зміщення для кожного кремнієвого детектору і фіксується.

Розроблена робоча конструкторська документація основних вузлів приладу: утримувачів

кремнієвих детекторів, утримувача сцинтиляційного детектору, детекторної головки в цілому, кінцевого коліматора формування кута зору, корпуса друкованої плати модуля аналогової обробки сигналів, корпуса друкованої плати блока вторинного живлення. Збиральне креслення детекторного модуля включає в себе захисну кришку; кінчну систему формування кута зору; детекторну головку; утримувач сцинтиляційного детектору; утримувач першого кремнієвого детектору Д1; утримувач другого Д2 та третього Д3 кремнієвих детекторів; сцинтиляційний детектор з фотоприймачем.

Конструктивно аналоговий модуль уявляє собою фрезований корпус, всередині якого розміщена друкована плата аналогової обробки сигналів. Відповідно до цього розроблено ескіз креслення фрезованого корпуса та ескіз складального креслення модуля аналогової обробки сигналів. Габаритний розмір корпуса визначається розміром друкованої плати та вільним місцем для розміщення кабелів у вигляді джгута, за допомогою яких виконуються електричні з'єднання між окремими модулями. Всередині корпуса передбачені чотири виступи з різьбовими отворами для кріплення друкованої плати за допомогою гвинтів. На бічних стінках корпуса розташовані отвори для з'єднання окремих модулів між собою за допомогою гвинтів та посадкові місця під розташування зовнішніх роз'ємів. Корпус виготовлено з матеріалу — сплав Д16А ГОСТ17232-99, покриття нікель.

Згідно з розробленою принциповою електричною схемою аналогового модуля проведено трасування чотирьохканальної друкованої плати. Друкована плата аналогового модуля виконана на базі пасивних елементів типорозміру 0603 та на базі мікросхем у корпусах SOIC з метою досягнення мінімального геометричного розміру плати. Розробка дизайну друкованої плати проводилася за допомогою програмного забезпечення САПР P-CAD 2006. Розроблений PCB-дизайн друкованої плати вторинного живлення. В процесі розробки дизайну враховані типорозміри, характер та тип монтування обраної елементної бази, також передбачені монтажні отвори для кріплення радіаторів. Передбачені отвори

для механічного кріплення сигнальних кабелів. Обрані типи роз'ємів, що використовуються при з'єднанні каналів живлення блока живлення з користувачем.

### ПРОЕКТ 30

#### Наукові основи та технічні пропозиції щодо створення комплексу апаратури

*Інститут космічних досліджень  
НАН України та ДКА України*

Науковий керівник:  
доктор фізико-математичних наук *О. П. Федоров*

**Еман 1.** «Наукові та технологічні основи створення апаратури для іоносферних досліджень, перспективних систем енергопостачання та космічного матеріалознавства».

1. Проведено розрахунковий експеримент щодо виникнення потоку рідини в наземних і космічних умовах для циліндричного зразка, який передбачається використати в космічному експерименті. Одержані профілі потоків рідини, зокрема нестационарні контури перед фронтом кристалізації в наземних умовах. Виконано порівняльний аналіз для методів Бриджмена та зонної плавки. Одержані розрахункові величини параметрів вібрації, які передбачається використати для створення керувального потоку рідини в натурному експерименті. На основі розрахункових даних виготовлено макет вібраційного вузла, який забезпечує бажані параметри керувального потоку рідини. Натурні експерименти підтвердили ефективність розроблюваного підходу для розроблення експериментальної польотної установки.

Проведено аналіз відомих способів побудови зчитувача зображень кристалізації досліджуваних моделей та зроблено вибір найбільш доцільного способу зчитування зображень. Виготовлено макет зчитувача та проведено дослідження його параметрів

2. Розроблено фізичне та методичне підґрунтя для вдосконалення приладів діагностики іоносферної та магнітосферної плазми. Отримані позитивні результати зменшення рівня магнітних шумів при вдосконаленні режимів відпалення магнітного осердя магнітометрів. Встановлено

залежності якості отриманих результатів магнітних вимірювань від рівня шумів бортових систем ШСЗ та параметрів приладів. Зокрема, на підставі даних ШСЗ ЧИБИС-М, на якому успішно працюють магнітометри та електрометр, створені в ЛЦ ІКД, показано, що в умовах високого рівня шумів на борту цього супутника отримання достовірних даних можливе тільки при відключенні системи орієнтації ШСЗ.

При аналізі сигналів, отриманих з борту ШСЗ ЧИБИС-М, проведено оцінку необхідної межі границі чутливості магнітометрів та електрометрів. Зокрема, показано, що для дослідження гармонічних резонансів ліній електропередач в іоносфері, що є одною із задач наступної місії «Іоносат-Мікро», необхідний рівень магнітних шумів складає 0.1 пТл на частоті 1 кГц, а рівень електричних шумів — 0.1 мкВ/м на цій же частоті.

Проведено експериментальну перевірку запропонованих шляхів покращення параметрів на макетах вимірювальних приладів. Результати перевірки показали, що запропоновані шляхи вдосконалення магнітних давачів дають реальне покращення їхніх параметрів, зокрема зменшення рівня магнітного шуму.

3. Для обґрунтування шляхів використання нових типів накопичувачів енергії для супутників та розробки науково-технічних пропозицій щодо створення інтерфейсного модуля проведено аналіз відомих розробок, сформульовано вимоги до системи керування експериментальним зразком з врахуванням систем збору і обробки наукової інформації. Запропоновано математичну модель системи «накопичувач енергії на основі ультраконденсаторів — система керування — сонячна батарея — інтерфейсний модуль — система збору та обробки наукової інформації». Основним результатом дослідження є створення математичної моделі, яка описує процеси зарядки-розрядки ультраконденсаторів з нанопористими вуглецевими матеріалами. Розроблено алгоритми оптимізації характеристик ультраконденсаторів з урахуванням процесів зарядки-розрядки. Запропоновано новий чисельний алгоритм розв'язання задачі оптимізації з урахуванням обмежень. Результати моделю-

вання використані для обґрунтування моделей, які включають в себе температурну залежність і можуть адекватно описувати поведінку різних типів ультраконденсаторів. Проведено аналіз програм моделювання, які були використані для порівняльного аналізу. Показано, що оптимізація характеристик системи дозволить збільшити час роботи накопичувачів енергії на орбіті, істотно поліпшить їхню функціональність, показники системи енергозабезпечення на борту КА і підвищити його безпеку.

Розроблено пропозиції щодо зменшення впливу космічного іонізаційного випромінювання на функціонування накопичувача енергії. Запропоновано математичну модель мінімізації ризику впливу факторів космічної погоди на функціонування перспективного супутникового комбінованого елемента живлення. Вперше показано, що задача мінімізації впливу іонізаційної радіації з урахуванням динамічної моделі ультраконденсатора зводиться до змішаної задачі оптимізації з обмеженнями. Вона враховує як статистичні, так і динамічні характеристики комбінованого елемента живлення.

### ПРОЕКТ 31

#### Радіоелектронні елементи з підвищеною стійкістю до впливу космічного випромінювання

*Інститут фізики НАН України*

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук Л. Хируненко

Протягом звітнього періоду було проведено пошук найбільш широко відомих фірм, які спеціалізуються на виробі продукції космічного призначення. Проведено аналіз продукції, яка випускається наведеними нижче фірмами, і відібрані вироби вносились в базу даних. При пошуку виробів аналізувалась їхня чутливість по відношенню до сумарної накопиченої дози опромінення (TID) і чутливість до дії поодиноких заряджених частинок (SEE). Аналізувався також інтервал температур, допустимий для експлуатації виробів. Зверталась увага на те, згідно з якими стандартами розроблялись і виготовлялись радіоелектронні компоненти. Зазвичай за кордоном виготовлення виробів космічного і військо-

вого призначення відбувається у відповідності до спеціальних стандартів, які характеризують їхню чутливість до різних видів іонізаційних випромінювань. Використовуються стандарти США, такі як MIL-STD-883, MIL-19510, MIL-38510, MIL-38535, MIL-38534, MIL-STD-975, MIL-STD-1835, MIL-PRF19500 і стандарти Європейського космічного агентства.

*STMicroelectronics*: найбільш крупна європейська компанія, яка займається розробкою і виробництвом різних напівпровідникових компонентів і на сьогодні займає лідируючу позицію на ринку напівпровідникових приладів для індустріальних застосувань. Проаналізовані і внесені в базу даних аналого-цифрові конвертери, біполярні транзистори, діоди і випрямлячі, логіка, операційні помножувачі, контролери широтно-імпульсної модуляції (PWM), потужні МОН польові транзистори (MOSFET), регулятори напруги. До бази даних внесено 241 радіаційно стійкий виріб космічного призначення. Діапазон температур експлуатації відібраних виробів від  $-55$  до  $+125$  °C.

*Texas Instruments* (США) — світовий лідер у виробництві дискретних напівпровідникових компонентів і інтегральних мікросхем. Texas Instruments є визнаним лідером в області розробки компонентів для проектування високопродуктивних систем обробки і передачі даних, цифрової обробки сигналів, джерел живлення. Проаналізовано і внесено в базу даних конвертери даних, інтерфейси і синхронізація, помножувачі і компаратори, компоненти управління енергоспоживанням (опорні діоди, регулятори, джерела опорної напруги, прецизійні програмовані опорні джерела, імпульсні модулятори, конвертори, резонансні контролери зсуву фаз), процесори, логіка, пам'ять. Всього до бази даних внесено 219 радіаційно стійких виробів з діапазоном температур експлуатації від  $-55$  до  $+125$  °C.

*Linear Technology* (США) — широко відомий виробник аналогових мікросхем. Виробляє мікросхеми управління живленням (драйвери, контролери, схеми захисту та ін.), високошвидкісні цифро-аналогові і аналого-цифрові перетворювачі, операційні підсилювачі і компаратори, ВЧ-компоненти (детектори, трансивери,



мікросхеми волоконно-оптичних ліній зв'язку), інтерфейсні і спеціалізовані мікросхеми. Проаналізовано і внесено в базу даних такі виробниці космічного призначення: помножувачі, компаратори, джерела опорної напруги, регулятори напруги, стабілізатори напруги, позитивні і від'ємні лінійні регулятори, двоканальні позитивні і від'ємні лінійні регулятори, регулятори переключення і контролери, конвертери даних, контроль потужності. Всього до бази даних внесено 89 радіаційно стійких виробів з діапазоном температур експлуатації від  $-55$  до  $+125$  °С.

*Microsemi* (Канада) — широко відома компанія як виробник радіоелектронних елементів (вентильні матриці з експлуатаційним програмуванням — FPGAs, спеціалізовані інтегральні схеми — ASICs, радіочастотні компоненти, діоди, транзистори, МОН польові транзистори — MOSFETS, джерела живлення та ін.) космічного призначення, які мають підвищену стійкість до впливу іонізаційного випромінювання. Проаналізовано і внесено в базу даних такі виробниці космічного призначення: логіка, лінійні регулятори, стабілізатори з імпульсним регулюванням, цифро-аналогові конвертери, регулятори напруги, модулятори, регулятори комутуючої потужності, операційні помножувачі, програмовані вентильні матриці. До бази даних внесено 73 радіаційно стійких виробів з діапазоном температур експлуатації від  $-55$  до  $+125$  °С.

*Aeroflex* (США) — одна з найдавніших високотехнологічних компаній, яка виробляє широкий набір мікроелектронної продукції. Розглянуто і внесено до бази даних операційні помножувачі, чотириканальні інструментальні помножувачі, чотириканальні компаратори, аналогові мультиплексери, аналого-цифрові перетворювачі, мультиплексні аналого-цифрові перетворювачі, перетворювачі обертання в цифровий код, транслятори рівня напруги, високошвидкісні контролери широтно-імпульсної модуляції, програмовані вентильні матриці, процесори, телеметрія і телеуправління, проводові роутери, інтегральні спеціалізовані мікросхеми поєднані в єдиній монолітній матриці високої щільності високої швидкості, цифрова логіка з аналоговою і змішаною функціями сигналів (ASICs), потужні МОН по-

льові транзистори (MOSFET). Всього до бази даних внесено 81 радіаційно стійкий прилад. Діапазон температур експлуатації від  $-55$  до  $+125$  °С.

*Xilinx* (США) — найбільший в світі виробник мікросхем програмованої логіки (програмованих вентильних матриць — FPGA, складних пристроїв з програмованою логікою — CPLD), налагоджувальних засобів і програмного забезпечення. На світовому ринку продукція Xilinx займає більш як 50 %. Проаналізовано і внесено в базу даних 22 програмовані вентильні матриці, програмовані постійні запам'ятовувальні пристрої. Всього до бази даних внесено 35 виробів з діапазоном температур експлуатації від  $-55$  до  $+125$  °С.

*Cypress Semiconductor* (США) — спеціалізується на виробництві інтерфейсних мікросхем, програмуємих аналого-цифрових систем, мікросхем пам'яті. Компанія виробляє радіаційно стійкі SRAM продукти, які забезпечують високу продуктивність при дотриманні максимальних стандартів захисту (Mil-PRF 38535). Всього до бази даних внесено 5 радіаційно стійких SRAM продуктів.

*Analog devices* (США) — займається передовими, інноваційними розробками в області обробки сигналів для оборонної і авіаційно-космічної промисловості. Виробляє широкий спектр високоякісних ВЧ компонентів, прецизійних перетворювачів, підсилювачів і давачів. Було проаналізовано аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі, компаратори, підсилювачі різного призначення (для вимірювання струму, з малою напругою зсуву постійної складової, з малим вхідним током зміщення, з високою швидкістю, інструментальні, диференційні, для виборки і зберігання, логарифмічні, з змінним коефіцієнтом підсилення), помножувачі, джерела опорної напруги та ін. Всього розглянуто 286 виробів з яких 139 внесено до бази даних. Діапазон температур експлуатації від  $-55$  до  $+125$  °С.

Таким чином на протязі звітнього періоду в базу даних внесено понад 880 радіоелектронних компонентів з підвищеною стійкістю до впливу іонізуючого випромінювання. Отримана інформація може бути використана в космічному приладобудуванні.

### ПРОЕКТ 32

#### Розробка колекторів світла апаратури для вивчення авроральних явищ в атмосферах планет сонячної системи

Головна астрономічна обсерваторія НАН України

Науковий керівник: Ю. С. Іванов

Завданням даного проекту було розробка і створення об'єктивів для монохроматичних камер названих експериментів. Для поєднання вимірювань авроральних границь і енергетичних характеристик авроральних частинок різними фізичними способами принципово необхідно, щоб кут поля зору монохроматичних панорамних фотометрів був не меншим за  $30^\circ$ , що пов'язано з кутом нахилу магнітної силової лінії (в авроральній області  $\sim 12...15^\circ$  до напрямку в надир. Спектральний діапазон вимірювань виділяється вузькосмуговими інтерференційними фільтрами, що змушує створювати оптичні схеми, в яких є ділянка майже паралельного ходу променів. В існуючих системах, що вирішують подібні задачі, мають місце великі втрати (до 50 %) і зазвичай їхнього пропускання — 0.3...0.4 при неадекватно складній оптиці. Тому в проекті було запропоновано оригінальний варіант оптичної схеми об'єктивів з уявним зображенням. Об'єктив різко спрощується при поліпшенні абераційних характеристик. Об'єктив побудований таким чином — обернена труба Галілея, фільтр, камерний об'єктив. Кут падіння променів на фільтр — не більше  $4.5^\circ$ . Такий кут не призво-

дить до погіршення характеристик фільтра, але дозволяє істотно, приблизно на 30 %, зменшити всі габарити об'єктива.

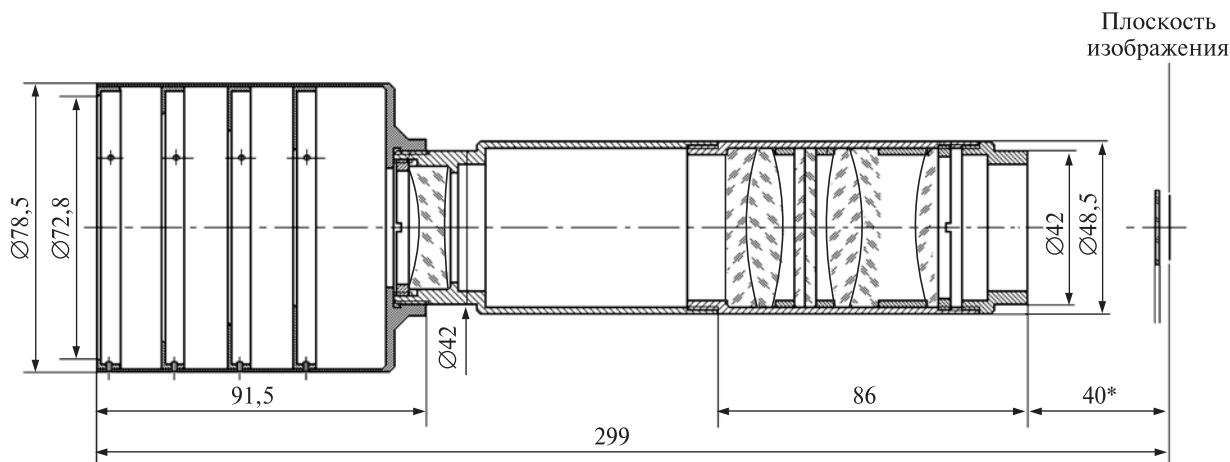
Календарним планом проекту передбачалося:

1. Розрахунок оптичних схем об'єктивів приладів «Авровізор-ВІС/МП» і «Летиція».
2. Розробка робочої конструкторської документації.
3. Виготовлення макетів для лабораторних випробувань.

Розрахунки оптичної схеми показали, що об'єктиви відповідають всім необхідним характеристикам і дають практично однопиксельне зображення по всьому полю. У пікселі  $13 \times 13$  мкм концентрується від 93 до 96 % відсотків енергії точкового джерела. Таким чином, роздільна здатність системи по місцевості буде визначатися тільки піксельною структурою приймача.

Було розроблено технічну документацію для виготовлення складових частин та зборки об'єктивів в цілому.

Розробка і виготовлення об'єктивів велися з урахуванням їхньої експлуатації в умовах космічного польоту. Всі елементи і групи перевірялися на відповідність кресленням, визначалися їхні робочі відрізки, характери і величини аберацій. Експериментальні дослідження об'єктивів показали відповідність реалізованих параметрів розрахунковим та підтвердили їхні високі експлуатаційні якості, що повністю задовольняють вимоги експерименту. Об'єктиви демонструвалися на ювілейній виставці НАН України 20—22 листопада 2013 р.



### ПРОЕКТ 33

#### **Розроблення робочої документації, оптичних схем, технологічних процесів та виготовлення наукової апаратури для російсько-українського космічного експерименту «Планетний моніторинг» з борта МКС**

Головна астрономічна обсерваторія НАН України

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук А. П. Відьмаченко

**Етап 2.** «Розробка блока вхідної оптики коронографа телескопа ПТ-600».

1. Розроблено основні технічні вимоги до вхідної оптичної системи зоряного коронографа, призначеного для астрофізичних спостережень слабкоконтрастних об'єктів: екзопланет, протопланетних дисків та інших слабкоконтрастних астрономічних об'єктів поблизу яскравих астрооб'єктів, а саме: спектральний робочий діапазон — 450—2500 нм; поле зору — 5 сд; відносний отвір системи — 1:10.

2. Розроблені технічні пропозиції щодо вхідної оптичної системи коронографа, та узгоджено його з оптичною схемою телескопа. Опрацьовано кілька варіантів схеми побудови вказаної оптичної системи, проаналізовано їхні переваги та недоліки.

3. Проведено комп'ютерне моделювання різних варіантів оптичних схем блока вхідної оптики, проведено габаритний та абераційний аналізи. Показано, що пропонувані варіанти схем реалізують одну з основних вимог до коронографа — вимогу його ахроматичності в широкому спектральному діапазоні і забезпечують досить малі аберації, що задовольняють вихідні вимоги.

4. Розроблені технічні пропозиції узгоджено із замовником, Інститутом космічних досліджень РАН. За нашою участю в ІКД РАН проведено лабораторне моделювання блока коронографа; результати випробувань підтвердили основні характеристики вузла.

5. Згідно із завданням розроблено технічну документацію: оптичну схему блока вхідної оптики та робочі креслення оптичних деталей. Документацію було прийнято Замовником без зауважень.

### ПРОЕКТ 34

#### **Створення інтелектуальної лазерної системи стикування КА на активних оптичних маркерах та її лабораторне макетування**

Міжнародний центр «Інститут прикладної оптики»  
НАН України

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук В. Б. Тараненко

**Етап 1.** «Науково-технічне обґрунтування оптимальної схеми системи АСКА на активних оптичних маркерах та резервної системи АСКА на лазерному інтерферометрі».

*Проведено огляд інтелектуальних систем керування процесом стикування.*

Порівняння систем, які застосовуються для оцінки положення об'єкта в реальному масштабі часу для стикування, показує, що вони мають власні фундаментальні труднощі. Оцінка положення об'єкта є функцією його геометрії, умов навколишнього середовища, лінії зору, сенсорних характеристик, можливостей алгоритму обробки та відповідної комп'ютерної платформи. Проведено аналіз кількох діючих систем та таких, що знаходяться в стадії проектування. Серед діючих проаналізовані: «Space Vision System», яка використовується НАСА для стикування з МКС, системи «Курс» та «Курс-НА» (Росія), розглянуті компоненти «TriDAR Autonomous Rendezvous & Docking System» (Канада).

Зроблений огляд стандартів стикування виявив особливе положення та значущість останніх фаз цього процесу, коли відстань між космічними апаратами (КА) не перевищує 100 м. Огляд обмежений процесами стикування низькоорбітальних КА, але певні елементи пропонованої системи дозволять провести стикування з поверхнею малих космічних тіл (астероїдів). За основну КА-мішень обрано МКС. У першу чергу приймалось до уваги як продовження функціонування діючої станції, так і поява нових, у відповідності до нової космічної програми Росії та аналогічних документів НАСА та ЄКА. Проаналізовано підсистеми орієнтації, які знаходяться в стадії НДКР з терміном закінчення 2015—2017 рр.

*Сформульовані вимоги до активних оптичних маркерів.*

Розглянуто питання вибору найбільш зручної системи координат, в якій можливі отримання та оптимальна обробка позиційних та орієнтаційних даних. Ці локальні системи координат можна обрати окремо для КА-мішені і для КА-пошукувача (транспортного КА).

Аналіз перспективних розробок дає можливість визначити необхідність створення резервних систем, таких як незалежний далекомір на інфрачервоному пікосекундному лазері для передостанньої фази стикування. Такий пристрій є необхідним не тільки для вимірювань відносної дальності в реальному часі, але і прискорення математичної обробки при формуванні команд на керівні засоби (гальмівні та маневрові двигуни). Проте в останній фазі стикування найкращі можливості із стабільного надання інформації про відносну відстань з точністю до міліметрів може надати лазерний інтерферометр. Показано доцільність використання оптичного інтерферометричного датчика переміщень з міліметровою чутливістю. Показано, що запропонований метод оцінювання малих переміщень КА забезпечує можливість його використання в системі стикування при відповідних параметрах маркерів.

Проаналізовано можливості використання методів розпізнавання оптичних образів в системі стикування космічних апаратів, наведено порівняння сучасних методів класифікації та розпізнавання. Розглянуто наступні методи: а) послідовне розпізнавання оптичних зображень КА та маркерів на основі динамічного програмування; б) метод розпізнавання з використанням функцій прийняття рішень; в) розпізнавання оптичних зображень з використанням статистичних методів; г) розпізнавання оптичних зображень на основі найбільш інформативних ознак та динамічного підходу. Показано на можливість навчання алгоритму розпізнавання за допомогою приросту інформації. Основна роль у науково-технічній пропозиції відводиться системі активних оптичних маркерів, які можуть бути встановлені на транспортному КА.

Представлений перелік вимог, які накладаються на методи та засоби, які вирішують задачі використання оптичних активних маркерів в процесі зближення та стикування космічних апаратів: роздільна здатність вимірювальної системи, достовірність отримуваної інформації; швидкодія вимірювальної системи, алгоритм знімання, аналізу та передачі інформації, забезпечення стабільності отримання інформації, що вимірюється, надійність функціонування твердотільного лазера в умовах дії на нього іонізаційного випромінювання та факторів космічної погоди.

Сукупний аналіз цих позицій при обраному методі отримання згаданої інформації дозволяє сформулювати загальні вимоги до окремих вузлів та пристроїв, які входять в оптичну систему. Це у першу чергу стосується характеристик джерела оптичного випромінювання, оптичної схеми, системи знімання, обробки та зберігання вимірювальної інформації.

Оптичний навігаційний інструмент є важливою складовою навігаційної системи. Саме за його допомогою відповідна комп'ютерна платформа видає команди до двигунів орієнтації. Використання європейцями для КА «Жюль Верн» системи пасивних маркерів, наявних на МКС, обумовлене цілим рядом причин, серед яких: малі затрати (не потрібні електронні модулі та фотодіоди, проста технологія виготовлення); надійність (відсутні джерела живлення та напівпровідникові деталі); довговічність та мала вага.

Активні оптичні системи (маркери — АОСМ) відстеження руху використовують на світіння самих маркерів. Активні системи у порівнянні з пасивними мають більшу точність та можливість охоплення більшої робочої зони. Крім того, джерела світла (наприклад, лазерні діоди) можуть бути імпульсними, що дає можливість захоплення значної кількості маркерів, які знаходяться ближче один до одного. Саме в них можливе одночасне використання часової та поляризаційної сепарації зображень маркерів для їхньої подальшої обробки.

На базі АОСМ можна забезпечити роботу системи стикування, заснованої на автоматичному знаходженні та розпізнаванні об'єктів з визна-



ченням кутового напрямку на них в реальному часі. Запропонована система забезпечує також стійкість до змін яскравості та геометрії об'єктів спостереження та місця їхнього знаходження. До безсумнівних переваг такої системи належать: висока ймовірність правильного знаходження та розпізнавання КА (як мішені), малі масогабаритні характеристики та роботу в реальному часі. Показана можливість побудови на базі АОСМ панорамної оптоелектронної системи без сканування.

*Проведено науково-технічне обґрунтування оптимальної схеми апаратури забезпечення даними системи управління зближенням космічних апаратів, а саме:*

- проведена оцінка вимог до апаратури та сформульовані кінематичні та динамічні умови стикування;

- обґрунтовано вибір вимірюваних величин, а саме: кутових положень осей стикувального вузла КА відносно осі візування, відстані між КА, часових інтервалів між вимірюванням відстаней;

- запропоновано методи вимірювання положення осей стикувальних вузлів відносно осі візування;

- для автоматизації вимірювань, підвищення роздільної здатності і перешкодозахищеності запропоновано метод та пристрій з самосвітними шкалами меншої протяжності, на який подані заявки на патент;

- проаналізовано методичні основи комплексу вимірювань та вимоги до вимірювання відстані між КА і кутовим положенням осей стикувального вузла КА відносно осі візування;

- запропонована схема апаратури забезпечення даними стикування КА.

Результати проведених досліджень можуть бути основою для формування ТЗ для створення лабораторного зразка інтелектуальної системи керування процесом стикування КА та розробка програмних засобів керування рухом і безпечним зближенням і стикуванням КА.

## **Напрямок** **Використання космічних засобів** **та технологій для вирішення** **науково-практичних задач**

### **ПРОЕКТ 35**

#### **Вивчення процесу спрямованої кристалізації методами прямого спостереження за еволюцією фазової границі прозорих речовин в умовах мікрогравітації та накладення контрольованих вібраційних впливів («Морфос-В»)**

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова  
НАН України*

Науковий керівник: *Є. Л. Живолуб*

**Етап 2.** «Наземне відпрацювання космічного експерименту «Морфос-В» — експериментальне дослідження динаміки поверхні розділу фаз при спрямованому твердінні модельного сплаву на основі сукципопітрилу. Деталізація та випуск конструкторської документації дослідницької польотної установки».

1. Вдосконалено лабораторну кристалізаційну установку з метою проведення досліджень еволюції положення поверхні розділу фаз при спрямованому твердінні органічних модельних речовин. В результаті вдосконалення значно підвищено точність завдання температури (до  $\pm 1$  °C замість  $\pm 5$  °C) і стабільності підтримки температури (до  $\pm 0.1$  °C замість  $+1$  °C). Реалізовано можливість послідовного спостереження різних ділянок фронту кристалізації на всій його довжині 70—80 мм шляхом сканування оптичної системи вздовж лінії фронту кристалізації.

2. Проведено дослідження еволюції положення поверхні розділу фаз при спрямованому твердінні прозорого модельного сплаву сукцинонітрилацетон. Експериментально і теоретично показано, що просування плоского фронту прозорого сплаву па основі сукципопітрилу за типових умов вирощування є істотно нестационарним: спостерігався безперервний зсув положення фронту відносно ізотерми, що кількісно задовільно описується розрахунком динаміки накопичення домішки перед фронтом кристалізації. Таким чином, унаслідок ефектів нестационарності в реальних експериментальних умовах область пара-

метрів стійкого росту (швидкість, температурний градієнт, концентрація) залежить від умов вирощування, що істотно обмежує застосовність лінійної теорії стійкого росту кристалів.

3. Проведено деталізацію та випуск конструкторської документації корпусу робочого блока експериментальної польотної установки «Морфос-В».

4. Проведено деталізацію та випуск конструкторської документації градієнтного пристрою та оптичної системи експериментальної польотної установки «Морфос-В».

### ПРОЕКТ 36

#### **Використання супутникових даних для біологічного моніторингу Чорного моря**

*Інститут біології південних морів  
ім. О. О. Ковалевського НАН України*

Науковий керівник:  
академік НАН України *В. М. Єремєєв*

1. Розроблена і применена малопараметрична регіональна модель для оцінки первичної продукції Чорного моря з використанням даних супутникового сканера кольору (SeaWiFS) з 1998 по 2010 гг. Для параметризації моделі привнесені результати аналізу обширної бази даних по вертикальному розподіленню хлорофілла і фотосинтетическим параметрам фітопланктону. При моделюванні первичної продукції використані достовірні кількісні закономірності, що відображають зв'язок концентрації хлорофілла і ефективності фотосинтезу на певній глибині з його концентрацією в поверхневому шарі, розрахованої за розробленим регіональним алгоритмом.

2. Розроблений регіональний алгоритм дозволив вперше дати повну картину просторово-часової змінливості продукції фітопланктону для всієї акваторії моря і оцінити її міжрічні відмінності для окремих регіонів. Порівняння даних з результатами попередніх досліджень показало, що середня величина річної первичної продукції в глибоководних районах моря вище, ніж вважалося раніше. Ці відмінності пов'язані з удосконаленням методических особливостей визначення фото-

синтетических характеристик фітопланктонного суспільства і з зменшенням дискретності вимірювань, що обумовили більш точне визначення просторово-часової змінливості продукції фітопланктону порівняно з експедиційними дослідженнями.

3. Розроблено регіональний алгоритм оцінки концентрації хлорофілла а, як показателя біомаси фітопланктону. Принципова особливість цього підходу полягає в тому, що в якості індикатора сумарного поглинання світла використовується відношення виходячого з моря випромінювання на двох довжинах хвиль, що дозволило збільшити точність розрахунків, так як відношення випромінювання більш чутливо до змін поглинання світла, ніж зворотне розсіювання. В алгоритмі виділено два типи рішень, що відповідають різним районам моря, що відрізняються по біооптическим показателям вод. Порівняння модельних оцінок концентрації хлорофілла а з результатами польових вимірювань і отриманих по іншим моделям показало, що запропонований алгоритм дає кращі результати.

### ПРОЕКТ 37

#### **Дослідження гідродинамічних течій, що виникають в умовах мікрогравітації і можливостей управління цими течіями та вільною поверхнею рідини за допомогою вібраційних, акустичних та імпульсних методів**

*Інститут космічних досліджень  
НАН України та ДКА України*

Науковий керівник:  
доктор фізико-математичних наук  
*Ю. П. Ладіков-Росєв*

1. Розроблено математичний метод для аналізу впливу високочастотної вібрації на термодинамічні процеси в умовах космічного експерименту.

2. Побудовано математичну модель впливу високочастотної поступальної вібрації на процеси кристалізації в ампулі Бріджмена. Показано, що в умовах мікрогравітації високочастотна вібрація відіграє таку ж саму роль, як і гравітація у земних умовах.

Під час досліджень розглянуто задачу про стійкість фронту кристалізації в циліндричній

посудині зі спрямованою кристалізацією. Задачу зведено до диференційного рівняння 8-го порядку. У підсумку після розв'язку задачі отримано дев'ять алгебраїчних рівнянь для знаходження характерного інкременту збурення. Зокрема, для випадку осьової симетрії показано, що збурення фронту кристалізації є суперпозицією збурень, які описуються функціями Бесселя нульового порядку  $J_0(\chi_k r)$  з різними значеннями  $\chi_k$ , де  $\chi_k$  — корінь функції Бесселя  $J_0(\chi_k r) = 0$ .

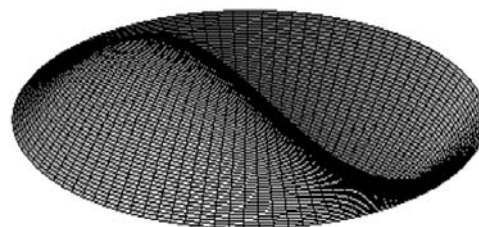
За відсутності осьової симетрії збурення на фронті кристалізації залежатимуть також від азимутального кута  $\theta$ . Вони також можуть бути представлені як суперпозиція функцій, які мають вигляд  $J_0(\chi_k r) \cos n\theta$ , де  $n$  — ціле число.

На наведених нижче рисунках показано комірчасту структуру збурень, які, як відомо, спостерігаються в експериментальних умовах (Див. Земсков В. С. Новые научные представления о процессах, сопровождающих направленную кристаллизацию расплавов. Итог экспериментов по выращиванию кристаллов полупроводников на космических аппаратах // Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем: Сб. тр. VII Российского симпозиума, Москва 11—14 апреля 2000 г. — М.: Ин-т проблем механики РАН. — 2000. — С. 34—51).

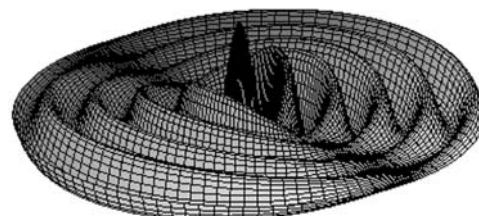
Як видно з рисунків, комірчаста структура, що спостерігається у ряді космічних експериментів, виникає за досить великих  $k$  і  $n$  та при відсутності осьової симетрії.

3. Проведено теоретико-математичні та чисельні дослідження, які мають на меті створення та обґрунтування математичних моделей, що описують вплив високочастотних вібраційних (в тому числі хаотичних) та акустичних полів на характер руху обмеженого об'єму рідини в слабких силових полях, та дають змогу описати вплив цих полів на поверхню рідини. Для цього було:

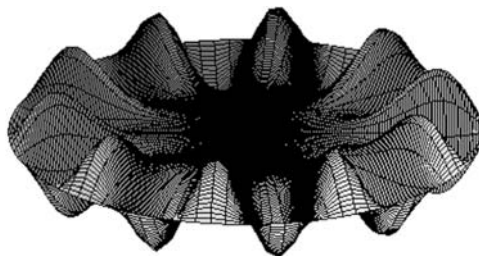
- проаналізовано динамічну систему, яка представлена абстрактним нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку. Використовуючи метод Капіци — Блехмана, побудовано усереднення Капіци, виведено та проаналізовано функціонал квазіпотенціальної енергії (в найбільш загальному випадку), локальні мініму-



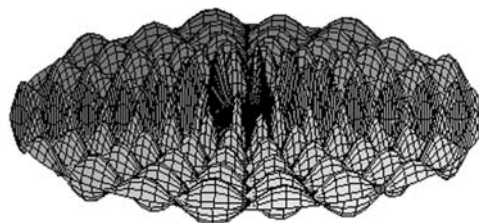
$k = 1, n = 1$



$k = 10, n = 1$



$k = 1, n = 10$



$k = 10, n = 10$

Вигляд збурення фронту кристалізації при різних значеннях  $k$  і  $n$

ми якого відповідають стійким формам квазірівноваги вихідної динамічної системи.

- абстрактні результати щодо функціоналу квазіпотенціальної енергії конкретизовано для задачі про течії ідеальної рідини в баці, що вібрує з високою частотою. За допомогою усереднення в функціоналі дії було отримано явний вигляд функціоналу квазіпотенціальної енергії та сформульовано задачу про визначення оптимальних форм капілярної рідини, що відповідає мінімумам цього функціоналу.

- математично строго доведено, що мінімуми функціоналу квазіпотенціальної енергії дійно відповідають стійким віброкапілярним формам рівноваги.

- застосовано метод скінченних елементів та введено дискретний аналог функціоналу квазіпотенціальної енергії. Строго математично доведено придатність методу до розв'язків задачі про віброкапілярні форми рівноваги, дано оцінки точності.

4. Проведено чисельні експерименти щодо знаходження стійких форм віброрівноваги. За отриманими результатами цих розрахунків описано ряд відомих експериментальних явищ. Особливу увагу приділено опису явища перевертання та розриву (фрагментизації) рідини.

Феномен перевертання полягає в тому, що дія горизонтальної високочастотної вібрації спричинює «прилипання» рідини до однієї із стінок баку, а сама рідина залишається стійкою відносно зовнішніх збурень.

При розриві маємо роз'єднання рідини на приблизно дві рівні частини, яке відбувається на двох протилежних стінках баку. Відповідні віброкапілярні форми виникають внаслідок горизонтальних вібрацій прямокутного контейнера. Розрахунки показують хорошу якісну відповідність розробленої під час досліджень математичної теорії та відомих з наукової літератури експериментальних даних.

### ПРОЕКТ 38

#### **Методи дистанційного оцінювання біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів в межах різних ландшафтно-кліматичних зон території України**

*Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі  
Інституту геологічних наук НАН України*

Науковий керівник: академік НАНУ В. І. Лялько

На першому етапі виконання НДР виконавцями був проведений аналіз стану досліджень та обґрунтування методів оцінювання біофізичних параметрів рослинних угруповань на основі оброблення даних дистанційних спостережень. Розглянуто можливості дистанційного оцінювання біофізичних параметрів рослинних угруповань за багато- та гіперспектальними даними

супутникової зйомки. Здійснено огляд інформаційних продуктів оцінювання біофізичних параметрів, що надаються сучасними системами космічного знімання NOAA, EOS (MODIS), SPOT, Proba-V та тими, що плануються до запуску — супутника Biomass Європейського космічного агентства. Також розглянуто особливості визначення біофізичних параметрів рослинних угруповань методами лазерної локації.

Значна увага приділена роботам, де досліджуються прояви спектрополяризаційного ефекту у рослинах і розглядається роль поляризації у вивченні стану рослинності. Представлено спектрополяризаційну ознаку як додаткову характеристику стану лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів.

Проведено аналіз сучасних гіперспектральних сенсорів та методів гіперспектральної зображуючої спектроскопії для аналізу стану угруповань рослин та вмісту пігментів. Розглянуто регресійні та динамічні моделі оцінювання біофізичних параметрів рослинного покриву. Подано огляд сучасних методів класифікації спектральних даних з точки зору їхнього практичного застосування до задач оцінювання стану рослинних угруповань. Застосування цих методів проілюстровано на прикладі методу опорних векторів (Support Vector Machines — SVM) та нейронних мереж. Розглянуто сучасні моделі оцінювання біофізичних параметрів рослин з використанням SVM-регресії.

Здійснено вибір основних біофізичних параметрів рослинних угруповань, які можуть бути визначені дистанційно, та проведено дослідження особливостей їхніх змін у межах різних типів рослинного покриву впродовж вегетаційного сезону в різних ландшафтно-кліматичних зонах України на прикладі вибраних тестових ділянок.

Для лісових рослинних угруповань обрані показники поділено на три категорії: морфоструктурні показники, які надають уявлення про розмір, будову, склад і структуру рослинного об'єкта; біофізичні показники, які відображають фізичні процеси, що відбуваються в об'єкті в ході індивідуального розвитку, або є наслідком його реагування на зовнішній вплив, вказують на вміст певних речовин або пігментів, феноло-



гічні показники — метрики, які характеризують сезонні цикли рослинних угруповань.

У категорії морфоструктурних показників детально розкрито підходи до визначення індексу листової поверхні *LAI* з використанням багатоспектральних космічних знімків. *LAI* визначає просторовий розподіл рослинних елементів і є важливою характеристикою при кількісному оцінюванні рослинних об'єктів. Наведено шість алгоритмів залучення методів лазерної локації до оцінювання зелених насаджень на рівні найменшої структурної одиниці, (тобто одного дерева). Наведено способи залучення таких методів і для визначення індексу листової поверхні та біомаси.

До складу основних біофізичних показників було обрано частку поглиненої фотосинтетично активної радіації (*fPAR*), концентрацію пігментів та чисту первинну продуктивність (*NPP*).

Серед фенологічних метрик обрано тривалість вегетаційного періоду (*GLS* — Growing Season Length), його початок та закінчення (*SOS* — Start of the Growing Season, *EOS* — End of the Growing Season). Представлено обґрунтування вибору супутникових знімків для оцінювання фенологічної динаміки лісових угруповань.

До основних біофізичних параметрів агрофітоценозів обрано параметри, що характеризують водообмін у рослинному та ґрунтовому покриттях, а також ті, що є індикаторами диференціації рослинного покриття. До першої групи параметрів, що характеризують водообмін в рослинах, віднесено транспірацію, що може характеризуватись як процес і має відповідну інтенсивність, швидкість, динаміку і т. п., а також вміст води в рослинах (у вегетативних органах) та ґрунті, які є відносно статичними. До другої групи показників віднесено вегетаційні індекси в області червоного краю (660—780 нм), а саме три індекси червоного краю: позиція червоного краю *REP*, наземний хлорофільний індекс *MTCI*, який позначено як *TCI*, та модифікований нормалізований різницевий індекс червоного краю *NDVI*<sub>705</sub>.

На прикладі вибраних тестових ділянок визначено особливості змін вибраних біофізичних параметрів основних типів лісових рослинних угруповань впродовж вегетаційного періоду в межах різних ландшафтно-кліматичних зон

України. Тестові ділянки у чотирьох ландшафтно-кліматичних зонах: лісова зона (Волинське Полісся), лісостепова зона (Київська область), гірські ліси Криму та Карпат.

Наведено методологічні підходи до проведення польових завіркових вимірювань вибраних біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів.

### ПРОЕКТ 39

#### Методи та засоби експериментальної системи моніторингу об'єктів ближнього космосу з метою виявлення потенційно загрозливих ситуацій та підготовки заходів щодо їхнього усунення

Головна астрономічна обсерваторія НАН України

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук В. С. Кислюк

**Еман 1.** «Розробка та впровадження стандартизованих методів та засобів моніторингу, оперативної обробки даних та формування баз даних та каталогу потенційно загрозливих космічних об'єктів на навколоземних орбітах».

Оновлено список низькоорбітальних космічних об'єктів (КО) з урахуванням зміни умов їхньої видимості для вибору КО, що входять в зону видимості з території України кожної доби.

Продовжені систематичні координатні спостереження КО за обраним списком на телескопах УМОС; результати спостережень оброблені до екваторіальних координат; сформовано каталог положень КО на робочому FTP-сервері УМОС.

Проведено оцінку точності координатних спостережень КО окремих телескопів: внутрішньої точності за нев'язками розрахунку орбіти на одному витку; зовнішньої точності за різницями з надточними ефемеридами служби ILRS.

Розраховані елементи орбіти КО за результатами спостережень кількох послідовних проходжень з одного телескопа; сформовано каталог елементів орбіт у форматі TLE та векторів стану; розраховані ефемериди (прогнозу траєкторії) КО протягом  $\pm 250$  витків від епохи елементів орбіти; сформовано каталог ефемерид у форматі служби ILRS.

Проведено дослідження залежності точності розрахованих ефемерид (прогнозу траєкторії) від

типу орбіти та часу прогнозування методом порівнянням каталогу ефемерид з каталогом положень.

З урахуванням майбутнього розміщення на базі домену тао.kiev.ua створено макет сайту УМОС з розміщенням наступної інформації: характеристики телескопів УМОС, параметри КО, що спостерігаються телескопами УСОС, елементи орбіти та ефемериди, визначені за спостереженнями УМОС (остання інформація також розміщується на FTP-сервері).

Проведені тестові синхронні спостереження геостационарного супутника зі спостережних пунктів, розташованих в Миколаївській обсерваторії та на спостережній станції Лісники Київського національного університету. Синхронні спостереження з Міжнародним центром МЦАМЕД (пік Терскол, Кабардино-Балкарія, Росія) не проведені через технічні проблеми телескопа центру.

Проведені лазерні експерименти з супутником ARTEMIS з метою дослідження впливу атмосфери на поширення лазерного випромінювання та визначення координат нестабільного супутника ARTEMIS відносно опорних зірок.

#### ПРОЕКТ 40

##### **Розроблення науково-методичного забезпечення поліпшення точності геоприв'язки даних космічних апаратів**

*Інститут космічних досліджень  
НАН України та ДКА України*

Науковий керівник:  
доктор технічних наук *Н. М. Куссуль*

**Еман 1.** «Розробка пробної версії програмного забезпечення поліпшення геоприв'язки супутникових зображень середнього розрізнення».

Розроблено метод, алгоритми та створено відповідну пробну версію програмного забезпечення для автоматичної геоприв'язки супутникових зображень середнього розрізнення. Створене програмне забезпечення відпрацьовано на даних вітчизняного супутника середнього розрізнення «Січ-2».

Проведено аналіз точності географічної прив'язки даних вихідних знімків КА «Січ-2» та знімків з уточненою геоприв'язкою. Перевірка точності прив'язки на 73 знімках КА «Січ-2» показала, що середня квадратична похибка прив'язки зменшилася у порівнянні з похибкою

прив'язки за орбітальними даними у середньому у 42 рази (з 590 до 14 м), а у порівнянні з іншими алгоритмами — у чотири рази.

#### ПРОЕКТ 41

##### **Створення системи збору, обробки та аналізу наземних і бортових космічних GPS/ГЛОНАСС-спостережень для моніторингу, досліджень й моделювання повного електронного вмісту іоносфери у рамках міжнародного проекту «Іоносат-Мікро»**

*Головна астрономічна обсерваторія НАН України*

Науковий керівник роботи:  
кандидат технічних наук *О. О. Жаліло*

**Еман 1.** «Експериментальне відпрацювання апаратно-програмних засобів збору, обробки та аналізу спостережень мережі наземних перманентних референційних ГНСС станцій України для оцінки і моделювання складових іоносферної затримки».

Для проведення теоретичних і експериментальних досліджень, оцінки і моделювання просторово-часового розподілу повного електронного вмісту (ПЕВ) іоносфери за двочастотними фазовими ГНСС-спостереженнями на основі використання вітчизняного програмно-математичного забезпечення ОСТАВА в ході першого етапу роботи (2013 р.) проведено удосконалення додаткових засобів обробки та аналізу спостережень мережі наземних перманентних референційних ГНСС-станцій. Розроблено та відпрацьовано з використанням реальних ГНСС-спостережень алгоритми моделювання ПЕВ, отримано результати моделювання та проведено порівняння складових іоносферних затримок у зимовий та літній періоди спостережень, а саме:

1) зібрано і оброблено дані GPS-спостережень для вибраних станцій України; для моделювання ПЕВ були використані накопичені добові спостереження 2013 р. — 35 станцій (10 січня), 21 станції (11 січня), 38 станцій (19 червня), 37 станцій (20 червня);

2) в ході щодобової обробки GPS спостережень були вирішені такі головні задачі:

- попередня обробка спостережень («пре-процесінг»);
- побазове розрізнення фазової неоднозначності спостережень обох частот GPS з вико-

ристанням точних продуктів сервісних центрів IGS/EPN;

- отримання координатних рішень з використанням точних продуктів сервісних центрів IGS/EPN;

- формування лінійних комбінацій («нульових», одинарних і подвійних різниць) так званих «безгеометричних» («geometry-free») комбінацій на обраних базових лініях і їх фільтрації/згладжування;

- використання отриманих оцінок «geometry-free» комбінацій для формування трендової 2D-моделі (модель «тонкого шару») ПЕВ і поточних іоносферних варіацій (включаючи іоносферні варіації, що переміщуються, — ПІВ/MSTIDs);

3) апробація/порівняння рішення задачі моделювання ПЕВ з глобальною моделлю GIM IONEX (IGS).

В ході роботи також було виконано доопрацювання алгоритмів та вирішено задачу розрізнення фазової неоднозначності вимірювань та спільної оцінки координат приймачів та зенітних тропосферних затримок на базових лініях до 1000 км. Виконано верифікацію та порівняння результатів обробки з використанням наукового програмно-го комплексу BERNESE (Швейцарія).

## **Н а п р я м Є** **Науково-правовий,** **економічний та соціальні аспекти** **космічних досліджень**

### **ПРОЕКТ 42**

#### **Еколого-правові засади космічної діяльності**

*Інститут держави і права ім. В. М. Корецького  
НАН України*

Науковий керівник:  
доктор юридичних наук *Н. Р. Малишева*

**Еман 1.** «Правові засади охорони довкілля Землі від наслідків космічної діяльності» (2013 р.).

На підставі вивчення сучасного стану еколого-правових засад космічної діяльності в Україні та його порівняння з міжнародними еколого-правовими засадами космічної діяльності, а також з міжнародними зобов'язаннями України у цій сфері вироблено рекомендації щодо вдосконалення правового регулювання еколого-правових відносин у сфері космічної діяльності.

1. Проведено огляд літературних джерел та чинного космічного законодавства, національних та міжнародних космічних проектів.

2а. Опубліковано:

- один підручник космічного права;

- один розділ посібника з екологічного права, присвячений екологічній безпеці космічної діяльності;

- два розділи монографії «Правова доктрина України»;

- один розділ монографії «Правова система України» (в 5 томах) — мова англійська;

2б. Взято участь:

- у організації та проведенні міжнародної науково-практичної конференції на тему: «Правові проблеми публічно-приватного партнерства у сфері аграрних, земельних, екологічних та космічних відносин», Київ, 22 листопада 2013р.;

- у III Міжнародній науковій конференції «Транспортне право в XXI столітті». Доповідь на тему: «Актуальні проблеми міжнародного космічного права», 21 березня 2013 р.;

- у Міжнародній конференції, присвяченій підписанню Угоди про співпрацю між Інститутом космічного права університету Кейо, Японія — доповідь на тему: «Космічна політика та космічне право в пострадянських державах»;

- у Міжнародній конференції, присвяченій проекту Міжнародного кодексу поведінки в космосі, 16—17 травня 2013 р.

- у Міжнародному Астронавтичному Конгресі. Доповідь на тему: «Space Debris — emerging challenge, common concern and shared responsibility: legal considerations and directions towards secure and sustainable space environment», 23—27 вересня 2013 р.

3. Підготовлено і передано Державному космічному агентству України Аналітичну довідку щодо концептуальних засад державно-приватного партнерства в сфері космічної діяльності (липень 2013 р.).

4. Здійснювалося усне консультування делегації України на сесії Юридичного підкомітету Комітету ООН з космосу (березень 2013 р.).

5. Взяти участь у підготовці та рецензуванні проектів Законів України: «Про державне регулювання в сфері супутникової навігації».

УДК 629.7.054

**В. Ю. Шибецький**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

## **ПОХИБКИ ДВОСТЕПЕНЕВОГО ГІРОСКОПА У НАПІВНАТУРНИХ УМОВАХ ГІПЕРЗВУКОВОГО ПОЛЬОТУ**

---

*Наводяться результати напівнатурних стендових випробувань гіроскопічного давача кутових швидкостей, уніфікованого на функціональну спроможність в ультразвуковому полі реалії гіперзвукowego польоту. Виявлено додаткові зони каустик, що появляються при хвильовому збігу.*

---

### **ВСТУП**

Освоєння літальними апаратами (ЛА) гіперзвукowych швидкостей сьогодні стає надзвичайно важливим етапом розвитку авіації. Значення гіперзвукowych технологій важко переоцінити: бойовий гіперзвуковой ЛА отримує величезну тактичну перевагу над іншими бойовими системами, стаючи практично неуразливим для систем ППО [3]. До того ж такий ЛА має змогу доставити бойову частину (БЧ) у будь-яку точку земної кулі за одну годину.

За останніми даними Китай провів випробування першого гіперзвукowego ЛА власної конструкції і став, таким чином, третьою країною після США і Росії, які мають таку техніку. Випробування апарата, за твердженням китайських джерел, несе виключно наукове значення. Однак у перспективі на основі даної конструкції можуть бути створені крилаті ракети [[http://rus.ruvr.ru/2014\\_01\\_17/Giperzvuk-tretij-uchastnik-gonki-8178/](http://rus.ruvr.ru/2014_01_17/Giperzvuk-tretij-uchastnik-gonki-8178/)].

У засобах масової інформації з'явилися повідомлення про те, що ЛА Китаю досяг швидкості 10 Мах, і це при тому, що подібні ЛА в Росії рухаються зі швидкістю в 4.5 Мах, а в США — 5 Мах. Але більш-менш точного підтвердження цієї інформації на сьогодні не існує [<http://vpk-news.ru/articles/390>].

Зараз у світі зростає інтерес до освоєння активних гіперзвукowych польотів в атмосфері. Однак роботи, що були розпочаті в Радянському Союзі і США у 1960-ті роки, так і не завершені. Причина не лише у фінансовій складовій. Найбільша складність криється у розв'язанні технічних завдань, що стикаються з величезною кількістю науково-технічних бар'єрів [4].

Масштабні дослідження гіперзвукowych технологій здійснюються по п'яти магістральних напрямках: аеродинаміка, теплозахист, наведення, навігація і керування рухом, обладнання і двигуни.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

У системах управління крилатими ракетами та гіперзвукowymi ЛА широке застосування знайшли так звані поплавкові гіроскопи, які конструктивно позбавлені основних недоліків «сухих» приладів — значних за величиною (і головне, змінних) моментів сил сухого тертя на вихідній осі, а також неприпустимо високої чутливості до ударних і вібраційних впливів, особливо небажаних для інтегровальних гіроскопів [1, 2]. Тому за об'єкт дослідження обрано конкретну технічну реалізацію поплавкового приладу, що серійно виготовляється авіаційною промисловістю, — уніфікований давач кутових швидкостей класу ДУСУ2-30В, призначений для використання в літальних апаратах тривалої дії.

Приймаючи до уваги надзореткі експлуатаційні умови гіперзвукowych, надзвичайно акту-



альними постають задачі дослідження взаємодії систем інерціальної навігації літального апарату з акустичними полями, що виникають у процесі експлуатації.

### ПОХИБКА ДУСУ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ОПРОМІНЮВАННІ НА НЕРУХОМІЙ ОСНОВІ

Тестування датчика кутових швидкостей ДУСУ2-30В на функціональну спроможність провадилося на ультразвуковій установці MINI ULTRASONIC CLEANER MODEL 3560. Вихідний сигнал приладу реєструвався вимірювальною апаратурою для двох режимів — при вимкненому гіроагрегаті і при його робочому стані.

Порівняльний аналіз реалізації вихідного сигналу датчика надає можливість, з одного боку, встановити ступінь впливу ультразвукового пучка на поліагрегатний підвіс гіроскопа, а з іншого — визначити ступінь впливу і динаміку розвитку в часі похибки  $\Delta\omega$  вимірювань кутової швидкості літального апарату при гіперзвуковому польоті. Датчик ДУСУ встановлюється на штативі таким чином, щоб поворотом корпусу приладу відносно своєї осі на фіксований кут  $\varphi$  окреслити найбільш небезпечний напрямок дії проникного акустичного випромінювання при льотній експлуатації.

При вимкненому гіроагрегаті вихідний сигнал датчика кутових швидкостей (рисунок, лінія 1) у промені «білого шуму» ультразвукового випромінювання зазнає стохастичних змін не тільки за величиною, але і за знаком. Величина зсуву нуля може сягати 0.5 град/с (у перерахунку на похибку вимірювань). У положенні  $\varphi = 0^\circ$  похибка вимірювань практично нульова, або не перевищує межу чутливості датчика.

Незначні зміни похибки за знаком мають місце при  $\varphi = 0^\circ$ , а при  $\varphi = 270^\circ$  вони не тільки змінні за знаком, але і мають істотний розкид по амплітуді. При куті  $\varphi = 225^\circ$  розкид значень зсуву нуля перевищує 0.1 град/с, але має постійний знак.

Очевидно, що наявний зсув нуля датчика ДУСУ при ультразвуковому опромінюванні (при вимкненому гіроагрегаті) обумовлений інтегральною реакцією деталей підвісу гіроскопа на опромінювання. У першу чергу це стосується

струмозмінача потенціометра, що має вигляд консолі.

Не останню роль відіграють нелінійні коливання поверхні «поплавка» і поява зон каустик, що є втіленням резонансних проявів при виникненні хвильового збігу.

При ввімкненому гіроагрегаті, очевидно, відбудуться зміни вихідного сигналу приладу (рисунок, лінія 2), викликані гіроскопічною реакцією. Так, при  $\varphi = 0^\circ$  похибка приладу збільшується практично в десять разів і змінює знак. Максимальна її величина сягає  $\Delta\omega_{\max} = 1$  град/с, а середня —  $\Delta\omega_{\text{cp}} = 0.7$  град/с.

При кутовому положенні корпусу приладу  $\varphi = 45^\circ$  середня величина похибки  $\Delta\omega_{\text{cp}}$  і її максимальне значення  $\Delta\omega_{\max}$  дещо зменшуються за модулем, але змінюють знак на протилежний:  $\Delta\omega_{\text{cp}} \approx +0.55$  град/с,  $\Delta\omega_{\max} \approx +0.72$  град/с.

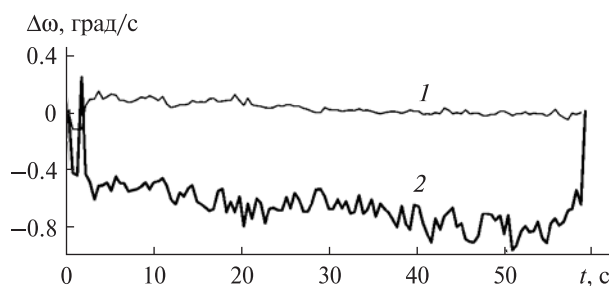
Поворот корпусу ДУСУ на кут  $\varphi = 90^\circ$  дозволяє практично стабілізувати в часі похибку приладу на рівні  $\Delta\omega_{\text{cp}} \approx -0.45$  град/с.

Поворот корпусу ДУСУ на кут  $\varphi = 135^\circ$  дозволяє звести середню похибку до значення  $\Delta\omega \approx -0.05$  град/с, разом з тим розкид значень складе  $\pm 0.2$  град/с. Крім того, спостерігається суперпозиція довгоперіодної і короткоперіодної складових.

При куті  $\varphi = 180^\circ$  вихідний сигнал ДУСУ має мінімальний розкид по амплітуді, а середня похибка не перевищує  $\Delta\omega_{\text{cp}} \approx -0.45$  град/с.

Поворот корпусу ДУСУ на кут  $\varphi = 225^\circ$  практично не змінює діаграму похибки.

На кутах повороту  $\varphi = 270^\circ$  і  $\varphi = 315^\circ$  діаграма похибки не змінюється. Середня її величина залишається рівною  $\Delta\omega_{\text{cp}} \approx -0.45$  град/с без тенденції до розвитку в часі. Але спостерігається незначний розкид значень при  $\varphi = 315^\circ$ .



Вихідний сигнал ДУСУ

Таким чином, поворот корпусу ДУСУ на кути  $\varphi = 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$  і  $315^\circ$  практично не змінює діаграму розвитку похибки приладу в часі.

### ОДНОЧАСНИЙ ВПЛИВ НА ДУСУ КУТОВОЇ ХИТАВИЦІ І ПРОНИКНОГО АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Порівняльний аналіз похибки ДУСУ при кінематичному впливі і спільному впливі кінематичного збурення з ультразвуковим опромінюванням показав, що спектр кутового руху поплавка стає більш насиченим, причому явно спостерігається систематична складова у вихідному сигналі.

Розкид значень також збільшується і перевищує в 2-3 рази значення при кінематичному збуренні.

Таке насичення спектру похибки  $\Delta\omega$  пояснюється суперпозицією кінематичної похибки  $\Delta\omega_k$  і акустичної похибки  $\Delta\omega^a$ . При цьому акустична похибка містить дві складові. Перша обумовлена впливом ейлерових сил інерції в зоні акустичного і кінематичного впливів, що породжують збурювальні моменти. До речі, спостерігається ефект вибіркості частот кінематичного збурення та акустичної вібрації поверхні підвісу гіроскопа, що призводить до виникнення систематичної і періодичної складових різницевої та сумарної частот. Друга складова акустичної похибки обумовлена впливом ультразвукового променя на оболонкову частину поплавкового підвісу на резонансному рівні у вигляді зон каустик.

### ВИСНОВКИ

При експлуатації давача ДУСУ2-30В зовнішній ультразвуковий промінь гіперзвукового польоту породжує додаткові похибки ДУСУ, які за своєю величиною перевищують паспортні значення. Наявність таких похибок негативно відображається на точності позиціонування ЛА в цілому, а у випадку гіперзвукових апаратів може призвести до виникнення позаштатних ситуацій, в тому числі до катастрофічних наслідків.

Взаємне позиціонування джерела ультразвукового випромінювання і гіроскопа суттєво

впливає на похибку ДУСУ, яка змінюється не лише за величиною, але і за знаком.

При одночасному впливі на ДУСУ кутової хитавиці і проникного акустичного випромінювання з'являється систематична складова похибки, а її спектр насичується (у порівнянні із спектром сигналу ДУСУ за умови лише наявної кутової хитавиці корпусу).

1. Карачун В. В., Мельник В. Н., Шибецкий В. Ю. Погрешности гироскопа, обусловленные развивающейся качкой фюзеляжа при летной эксплуатации // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — № 5/7 (65). — С. 45—47.
2. Шибецкий В. Ю. Влияние гауссовой кривизны подвеса поплавкового гироскопа на упругую податливость в акустическом поле // Молодой ученый. — 2012. — № 12. — С. 116—120.
3. Шибецкий В. Ю., Карачун В. В. Поплавковый подвес гироскопа при летной эксплуатации // Изв. ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение. — 2013. — Вып. 4. — С. 41—44.
4. Karachun V. V., Mel'nick V. N. Influence of diffraction effects of the inertial sensors of a gyroscopically stabilized platform: three-dimensional problem // Int. Appl. Mech. — 2012. — 48, N 4. — P. 458—464.

Стаття надійшла до редакції 06.03.13

В. Ю. Шибецкий

### ПОГРЕШНОСТИ ДВУХСТЕПЕННОГО ГИРОСКОПА В ПОЛУНАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ ГИПЕРЗВУКОВОГО ПОЛЕТА

Приводятся результаты полунатурных стендовых испытаний гироскопического датчика угловых скоростей, унифицированного на функциональную способность в ультразвуковом поле реальный гиперзвукового полета. Выявлены дополнительные зоны каустик, которые появляются при волновом совпадении.

V. Yu. Shybetskiy

### ERRORS OF TWO-STAGE GYRO IN SEMI-NATURAL CONDITIONS OF HYPERSONIC FLIGHT

We present our results of semi-natural bench tests of uniform angular velocity sensor in the ultrasound beam which occurs in the operation of a hypersonic aircraft. It is proved that there are additional areas of caustic in wave pattern space.

УДК 531.13

К. Бомбарделли<sup>1</sup>, А. П. Алпатов<sup>2</sup>, А. В. Пироженко<sup>2</sup>, Е. Ю. Баранов<sup>3</sup>, Г. Г. Осинский<sup>3</sup>, А. Е. Закржевский<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Мадридський технічний університет

<sup>2</sup> Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

<sup>3</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

<sup>4</sup> Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка Національної академії наук України, Київ  
alex.zakr@mail.ru

## ПРОЕКТ «КОСМИЧЕСКОГО ПАСТУХА» С ИОННЫМ ЛУЧОМ. ИДЕИ И ЗАДАЧИ

---

*Приводится краткая информация о целях и задачах международного проекта LEOSWEEP, который выполняется рядом украинских организаций совместно с ведущими европейскими космическими организациями. Проект связан с разработкой первой космической миссии по бесконтактному удалению с орбиты отработанных последних ступеней ракет-носителей.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Проект LEOSWEEP = Improving Low Earth Orbit Security With Enhanced Electric Propulsion (повышение безопасности низких околоземных орбит с улучшенным электрореактивным двигателем) победил в рамках проводимого Европейской комиссией конкурса FP7-SPACE-2013. При желании этот акроним можно рассматривать также как “LEO Sweep” (Чистка низких околоземных орбит). Проект получил высшие оценки экспертов — 15 баллов из 15 возможных.

Участники проекта:

- SENER Ingenieria Y Sistemas S. A. (координатор Испания);
- Universidad Politecnica De Madrid (Испания);
- Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (Украина);
- Государственное предприятие «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля» (Украина);

- Международный центр космического права при Институте государства и права им. В. М. Корещко Национальной академии наук Украины (Украина);

- TransMIT Gesellschaft für Technologietransfer mbH (Германия);
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Ev (Германия);
- DEIMOS Engenharia S. A. (Португалия);
- University of Southampton (Великобритания);
- Centre National de la Recherche Scientifique (Франция);
- Universidad Carlos III De Madrid.

Цель работы — информирование украинской научно-технической общественности об основных идеях, целях и задачах проекта. Дополнительные подробности можно найти на сайте проекта [<http://www.leosweep.upm.es>].

### ПРОБЛЕМА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И ЕЕ УГРОЗЫ

Около 2500 тонн мусора, состоящего из отработанных космических аппаратов (КА), разгонных блоков, последних ступеней ракет-носителей, осколков и т. д., движется сейчас на низких око-

---

© К. БОМБАРДЕЛЛИ, А. П. АЛПАТОВ, А. В. ПИРОЖЕНКО, Е. Ю. БАРАНОВ, Г. Г. ОСИНСКИЙ, А. Е. ЗАКРЖЕВСКИЙ, 2014

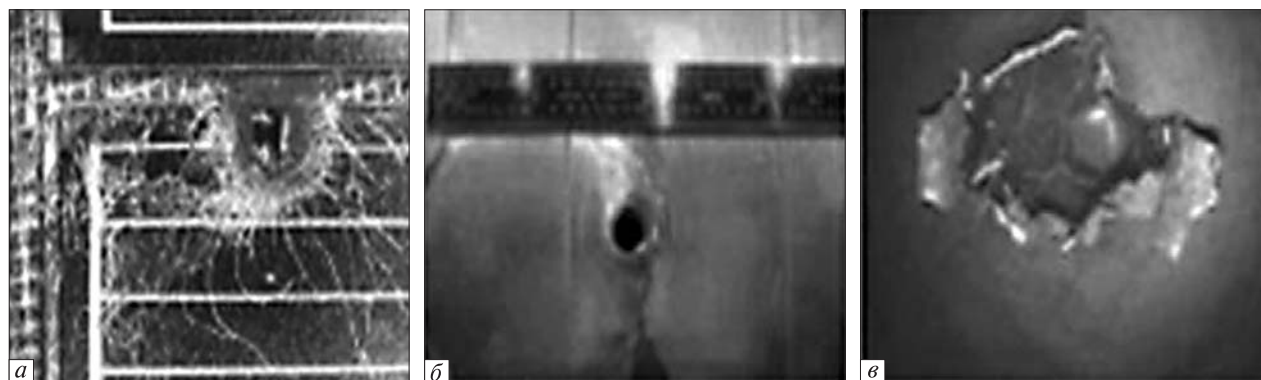


Рис. 1. Разрушения элементов КА мелким мусором

лоземных орбитах (НОО). Уже имеет место столкновение мусора с активными КА, с другим мусором, а также КА друг с другом [1].

Столкновение спутников «Космос-2251» и «Iridium-33» — первый случай столкновения двух искусственных спутников в космосе. Столкновение произошло 10 февраля 2009 г. над территорией Российской Федерации (над полуостровом Таймыр, над точкой 72.5° с. ш., 97.9° в. д.) на высоте 788.6 км. Скорости обоих спутников были приблизительно равны и составляли около 7470 м/с, относительная скорость равнялась 11.7 км/с. Искусственные спутники — «Космос-2251», принадлежавший космическим войскам России, выведенный на орбиту в 1993 г. и функционировавший до 1995 г., и «Iridium-33», один из 72 спутников оператора спутниковой телефонной связи Иридиум, запущенный на орбиту в 1997 г., в результате столкновения разрушились полностью. Масса американского спутника составляла 600 кг, а российского — 1 т. В результате столкновения образовалось около 600 обломков [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Столкновение\\_спутников\\_Космос-2251\\_и\\_Iridium\\_33](http://ru.wikipedia.org/wiki/Столкновение_спутников_Космос-2251_и_Iridium_33)]. Всего на данный момент зарегистрировано пять известных столкновений КА [<http://smartnews.ru/articles/15652.html>].

Ожидаемое увеличение этих столкновений представляет серьезную угрозу для космической деятельности в ближайшем будущем.

Распределение мусора по размерам на НОО примерно следует степенному закону, где количество фрагментов резко возрастает с уменьше-

нием размера. Поэтому основная угроза столкновений исходит от мелких фрагментов мусора. Эти частицы мусора слишком малы, чтобы отслеживаться средствами наблюдения, но обладают достаточной кинетической энергией, чтобы нарушить работу активных КА.

Рис. 1 дает представление о разрушениях при столкновении даже с очень малыми кусочками мусора. На рис. 1, а изображен кратер в солнечной панели космического телескопа Хаббла. На рис. 1, б видно входное отверстие около 10 мм в радиаторе STS-118. Выходное отверстие (рис. 1, в) может быть значительно больше.

Вместе с тем основная угроза ухудшения ситуации в околоземном космическом пространстве исходит от больших объектов мусора. Возможность их разрушения в результате катастрофических столкновений дает очень неблагоприятный прогноз. В настоящее время широко признано, что снятие угрозы лавинообразного характера увеличения мусора при столкновениях объектов возможно только при условии значительного уменьшения количества крупных объектов на НОО. Поэтому разрешение проблемы космического мусора связано с решением проблемы увода объектов, общая масса которых составляет сотни тонн, с наиболее загруженных областей НОО.

Анализ распределения космического мусора позволяет сделать вывод, что основная его масса состоит из объектов массой более 200 кг, а объекты массой более тонны составляют более 75 % общей массы мусора на НОО [9]. Следовательно,



системы активного увода должны обеспечивать увод объектов с массой 1—1.5 т с НОО. Эти объекты наиболее плотно сосредоточены на высотах 950—1000 км и 800—850 км с наклонениями орбит 82°, 98° и 75°.

### ИЗВЕСТНЫЕ КОНЦЕПЦИИ УВОДА МУСОРА С НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ

Анализ известных в настоящее время концепций увода космического мусора с орбит позволяет сформулировать три ключевые проблемы.

1. Экономическая и физическая жизнеспособность предлагаемой системы.

2. Минимизация операционных рисков, в том числе минимизация угроз дополнительного загрязнения НОО.

3. Необходимость создания соответствующей нормативно-правовой базы для увода отработанных объектов, принадлежащих различным владельцам.

В настоящее время есть несколько концепций активного удаления орбитальных обломков — от лазерных систем [4, 6] до электродинамических связей [2, 7, 8]. Солнечные паруса, которые, как известно, непрактичны на НОО, были предложены для того, чтобы увести неисправный спутник за геостационарную орбиту [10]. Как только разрабатывался быстрый и эффективный метод удаления орбитальных обломков, возникала важная технологическая проблема передачи импульса от системы удаления к космическим обломкам, чтобы выполнить маневр их удаления с орбиты или ее изменение.

Наиболее очевидный способ сделать это — состыковать систему удаления с целевым объектом перед возвращением с орбиты. Эта операция может, однако, быть технологически сложной и очень опасной. Космические обломки разнообразны по форме и механическим свойствам. Они характеризуются сложным движением вокруг центра масс (беспорядочное вращение, плоское вращение, колебания с большими амплитудами и т. д.), что усложняет стыковку. Другое возможное решение состоит в том, чтобы выполнить операцию захвата с помощью вспомогательных устройств (например, сеть или гарпун) выпущенных с КА [5]. В этом случае главная труд-

ность, возможно, связана с развертыванием и наведением устройства захвата, которое, кроме того, было бы трудно использовать в дальнейшем для повторных операций удаления.

Концепция удаления обломков, основанная на импульсно-лазерных системах, имеет в этом случае существенное преимущество, поскольку позволяет управлять далекими целями на орбите, возможно даже с Земли. К сожалению, маленький импульс, полученный при абляции материала, не может быть эффективным для объектов с размером больше 20 см [3].

### КОНЦЕПЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО «ПАСТУХА» С ИОННЫМ ПУЧКОМ

Основной принцип системы увода, положенный в основу проекта LEOSWEEP, заключается в использовании потока ионов в качестве средства, передающего силовой импульс [3]. Поток ионов ионного двигателя «КА-пастух» направляется на объект космического мусора (рис. 2). Скорость ионов порядка 30 км/с. Небольшое расхождение ионного луча (<15°), достижимое при использовании современных электроракетных двигателей, является ключевым моментом, позволяющим бесконтактное маневрирование «пастуха» на безопасном расстоянии от мишени. Достигшие поверхности мишени ионы внедряются в ее материал и полностью передают свой импульс, так же, как и отраженные ионы. Для компенсации силы реакции на «пастухе» предполагается дополнительная двигательная установка.

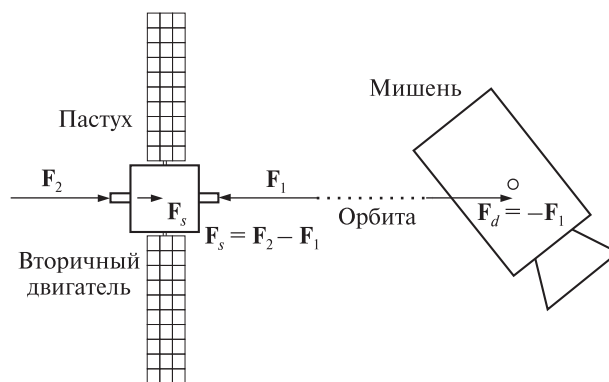


Рис. 2. Схема взаимодействия «пастуха» с ионным пучком

Концепция IBS схематически показана на рис. 2. «Спутник-пастух» оборудован основной двигательной установкой, которая испускает луч ускоренной квазинейтральной плазмы, направленный на мишень так, чтобы приложить силу  $F_d$  к мишени за счет импульса, который несут ионы плазмы. Если пренебречь импульсом, связанным с ионами, распыляемыми поверхностью мишени, а также считать, что луч полностью направлен на мишень, сила  $F_1$ , с которой основная двигательная установка действует на «спутник-пастух», будет равна по модулю и противоположна силе  $F_d$ .

На самом деле имеет место отражение части ионов от поверхности мишени, что в принципе увеличивает величину импульса, передаваемого мишени. Тем не менее их скорости отражения малы по сравнению со скоростями первичных ионов, так что их вклад в переданное количество движения будет незначительным. С другой стороны, уменьшение полного переданного импульса имеет место тогда, когда часть ионов пролетает мимо мишени из-за расхождения ионного пучка и возможных ошибок наведения луча, что устанавливает ограничение на максимальное расстояние между IBS и мишенью. Заметим, наконец, что рассогласование между центром давления луча и центром масс мишени не влияет на полный импульс, переданный мишени потоком ионов, пока последние продолжают полностью попадать в мишень. Это следует из закона сохранения количества движения системы до и после столкновения. С другой стороны, при этом будет происходить изменение угловой скорости мишени, что нужно будет учитывать в дальнейших исследованиях. Вектор суммарной силы, обеспечивающей торможение движения конфигурации «пастух — мишень», будет равен вектору  $F_2 = F_s + F_d$ . Отсюда следует, что двигатель, направленный в сторону движения по орбите, должен создавать тягу, большую, чем двигатель, бомбардирующий мишень. Соотношение модулей этих векторов определяется соотношением масс «пастуха» и мишени.

Миссия начинается с вывода «пастуха» на орбиту мусора перед ним и завершается, когда оба спутника достигают запланированной ор-

биты. После этого «пастух» под действием тяги уже одного ЭРД переходит на орбиту следующего объекта, намеченного для увода с орбиты, а предоставленный действию сил атмосферного сопротивления уводимый с орбиты объект продолжает снижение до входа в атмосферу.

Концепция IBS содержит ряд ключевых преимуществ по сравнению с другими известными технологиями:

1) **эффективность увода.** Предполагается, что масса «пастуха» с топливом не будет превосходить 10 % от массы уводимых объектов. Так, для увода 1.5 тонного объекта с 1000 км круговой орбиты на 500 км орбиту потребуется около 23 кг рабочего тела (ксенона). Такого же порядка масса потребуется и для второго двигателя. С учетом веса конструкции КА и других его подсистем ожидаемая масса «пастуха» не будет превосходить 150 кг. Для сравнения отметим, что 150 кг — это приблизительно масса топлива верхних ступеней Р-Н для одноимпульсного перевода их на орбиту с перигеем 50 км;

2) **низкий уровень риска**, связанный с отсутствием прямого контакта с объектом. Номинальное расстояние между объектом и «пастухом» по предварительным оценкам составит 10–20 м;

3) **передаваемый импульс не зависит от формы и собственного движения объекта.** Это преимущество представляется весьма существенным, поскольку механические контакты с нестабилизированной (вращающейся) целью проблематичны;

4) **возможность повторного использования.** Благодаря высоким удельным импульсам, характерным для ионных двигателей, расходы топлива резко сокращаются, и возможны несколько операций по удалению с помощью одного «КА-пастуха»;

5) **маневренность.** «Пастух» обладает высокой эффективностью всех видов орбитальных маневров на основе использования ионных двигателей для изменения таких параметров орбиты, как высота, наклонение, проведение операции сближения, предотвращение столкновений;

6) **технологическая готовность.** Ключевые элементы рассматриваемой технологии уже прошли испытание в космосе. Это относится к ра-

диочастотным ионным двигателям и к датчикам относительной навигации. Сама конструкция «пастуха» обычна для КА.

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Проект LEOSWEEP направлен на создание условий, обеспечивающих в ближайшем будущем проведение работ по удалению крупномасштабного мусора с помощью технологии «пастуха» с ионным лучом.

Одной из основных целей проекта является активизация деятельности в Европе и в Украине по решению проблемы космического мусора. Достижение этой цели предполагает подготовку демонстрационной миссии активного увода мусора. А значит, выбор объектов увода и решение соответствующих правовых вопросов. Значительная роль здесь отводится Украине как стране, производящей и запускающей ракеты-носители.

Среди других задач проекта важны также следующие.

1. Подробное изучение физики процессов, положенных в основу концепции. Здесь речь идет и о физике потока ионов на НОО, и о его взаимодействии с уводимым объектом, а также об устойчивости процедуры увода для различных движений (орбитального, вокруг центра масс). Последняя задача предполагает построение адекватных математических моделей динамики как «пастуха», так и уводимого объекта, а также физических полей, имеющих существенное влияние на динамику всей конфигурации.

2. Определение ключевых технологических проблем и принятие конкретных решений. Здесь, в частности, предполагается проектирование и изготовление ионного двигателя с расхождением луча, по крайней мере в два раза меньше, чем у существующих. Большое внимание следует уделить выбору системы наблюдения и навигации относительного положения цели увода для обеспечения устойчивости управления. Предполагается также конструктивная доработка «пастуха» с целью облегчить управляемость и устойчивость исследуемых процессов.

3. Разработка и проведение ряда ключевых наземных экспериментов. Здесь, в частности,

предполагается проведение в ИТМ испытания взаимодействия пучка ионов с поверхностью верхних ступеней ракет-носителей, которые предполагается использовать для демонстрационной миссии.

## ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ДЕМОСТРАЦИОННОЙ МИССИИ

Анализ объектов космического мусора показывает, что около 63 % от общей массы более чем однотонных объектов состоит из верхних ступеней ракет-носителей. Это около 47 % от общей массы мусора на НОО. Более того, около 64 % общей массы верхних ступеней на НОО, или около 30 % от общей массы мусора на НОО, представлено только тремя видами ракет-носителей: «Циклон-3», «Зенит-2» и «Космос-3М».

Все эти верхние ступени (таблица) были разработаны под руководством выдающегося конструктора Михаила Кузьмича Янгеля в ГKB «Южное». «Циклон-3» и «Зенит-2» создавались на Южном машиностроительном заводе.

Верхние ступени ракет-носителей являются идеальными объектами для крупномасштабных операций по уводу мусора. Для этого имеется по крайней мере три причины:

- можно осуществить увод нескольких однотипных объектов в одной миссии, при этом удалив с НОО тонны мусора;
- имеется достаточная концентрация верхних ступеней на орбитах определенных наклонений, которая облегчает осуществление многократных уводов в одной миссии;

## Параметры верхних ступеней КА разработки КБЮ на низких околоземных орбитах

Верхняя ступень	Масса, т	Количество на НОО	Суммарная масса, т	Производитель
«Циклон-3» (SL-14)	1.39	110	153	«Южмаш» (Украина)
«Зенит-2» (SL-22)	8.23	22	181	«Южмаш» (Украина)
«Космос-3М» (SL-8)	1.42	296	421	«Полет» (Россия)
Итого		428	755	

• увод верхних ступеней в меньшей степени связан с решением юридических вопросов на международном уровне, чем увод отработанных КА.

1. Алпатов А. П., Басс В. П., Баулин С. А. и др. Техногенное засорение околоземного космического пространства / Под ред. А. П. Алпатова. — Днепропетровск: Пороги, 2012. — 378 с.
2. Bombardelli C., Herrera J., Iturri A., Peláez J. Space debris removal with bare electrodynamic tethers // Proceedings of the 20th AAS/AIAA Spaceflight Mechanics Meeting, San Diego, CA, 2010.
3. Bombardelli C., Peláez J. Ion beam Shepherd for contactless space debris removal // J. Guidance, Contr., and Dynamics. — 2011. — 34, N 3. — P. 916—920
4. Bondarenko S., Lyagushin S., Shifrin G. Prospects of using lasers and military space technology for space debris removal // Second European Conference on Space Debris. — 1997. — 393. — P. 703.
5. Levin E. M. Dynamic analysis of space tether missions // Adv. Astronaut. Sci. — 2007. — 453 p.
6. Phipps C. R., Reilly J. P. ORION: Clearing near-Earth space debris in two years Using a 30-kW repetitively-pulsed laser // SPIE Proceedings of the International Society for Optical Engineering. — 1997. — P. 728—731.
7. Sanjurjo-Rivo M. Self-balanced bare electrodynamic tethers. Space debris mitigation and other applications: Ph. D. Thesis. — Technical Univ. of Madrid, School of Aeronautics, 2009.
8. Takeichi N. Practical operation strategy for deorbit of an electrodynamic tethered system // J. Spacecraft and Rockets. — 2006. — 43, N 6. — P. 1283—1288. — doi:10.2514/1.19635.
9. Technical report on space debris, United Nations. — New York, 1999. — 50 p.
10. Todd L., Bowling T. Debris mitigation in geostationary Earth orbit // Sixth Dynamics and Control of Systems and Structures in Space Conference, Riomaggiore, Italy. — 2004. — July.

Стаття надійшла до редакції 31.03.14

К. Бомбарделли, А. П. Алпатов, О. В. Пироженко, Е. Ю. Баранов, Г. Г. Осиновий, О. Е. Закржевський

#### ПРОЕКТ «КОСМІЧНОГО ПАСТУХА» З ІОННИМ ПРОМЕНЕМ. ІДЕЇ І ЗАДАЧІ

Приведено стисло інформацію про цілі та задачі міжнародного проекту LEOSWEEP, який виконується рядом українських організацій спільно з провідними європейськими космічними організаціями. Проект пов'язаний з розробкою першої космічної місії з безконтактного видалення з орбіти відпрацьованих останніх ступенів ракет-носіїв.

C. Bombardelli, A. P. Alpatov, A. V. Pirozhenko, E. Yu. Baranov, G. G. Osinovyj, A. E. Zakrzhevskii

#### PROJECT "SPACE SHEPPARD" WITH ION BEAM. IDEAS AND PROBLEMS

We give some short information on objectives and problems of the international project LEOSWEEP that is performed by a set of Ukrainian organizations in collaboration with leading European space organizations. The project deals with development of the first space mission directed on the contactless deorbiting of upper stages of launchers.



УДК 523.165

**А. И. Ключева**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

## **ЭФФЕКТЫ Понижения Интенсивности Галактических Космических Лучей, Связанные С Высокоскоростными Потокami От Корональных Дыр**

---

*Исследуется влияние высокоскоростных потоков солнечного ветра от корональных дыр на интенсивность галактических космических лучей с использованием данных пяти нейтронных мониторов в течение 2000–2013 гг.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие и совершенствование космических технологий позволило выявить многочисленные факторы влияния солнечной активности и вызванных ею нестационарных процессов в гелиосфере на технические и биологические системы, в связи с чем актуальной научной задачей стало изучение всего комплекса нестационарных внешних космических факторов, оказывающих влияние на Землю, а также прогнозирование солнечной активности и магнитных бурь. Большое значение в этом аспекте имеют исследования вариаций галактических космических лучей (ГКЛ). Под влиянием различных солнечных, гелиосферных и геомагнитных процессов поток первичных космических лучей существенно искажается по сравнению с таковым за пределами гелиосферы. Это дает возможность исследовать природу вариаций ГКЛ гелиосферного и магнитосферного происхождения.

Многочисленные исследования показали, что межпланетное пространство заполнено плазмой солнечного ветра. Солнечный ветер (СВ) зарождается в верхних слоях атмосферы Солнца, и его основные параметры определяются соответствующими параметрами солнечной атмосферы. Однако физические характеристики солнечно-

го ветра вблизи орбиты Земли крайне сложно связаны с физическими явлениями в атмосфере Солнца, и к тому же сильно зависят от уровня солнечной активности. Поэтому для простоты описания предполагается, что наблюдаемый вблизи орбиты Земли солнечный ветер состоит из трех в первом приближении независимых компонентов [3]: спокойный солнечный ветер, квазистационарные высокоскоростные потоки солнечной плазмы, спорадические высокоскоростные потоки.

Солнечный ветер модулирует поток галактических космических лучей, и ярким тому свидетельством являются форбуш-эффекты, представляющие резкое понижение интенсивности космических лучей, вызванное отклонением заряженных частиц неоднородностями межпланетного магнитного поля и ударными волнами в солнечном ветре.

Наиболее сильные и продолжительные форбуш-эффекты обусловлены корональными выбросами массы. Однако не менее интересно изучить влияние рекуррентных высокоскоростных потоков (ВСП) солнечного ветра на галактические космические лучи вблизи орбиты Земли; в данной работе предпринята такая попытка.

В течение многих лет происхождение рекуррентных ВСП оставалось загадкой, поскольку им не соответствовали какие-либо видимые особенности на поверхности Солнца. В настоящее

время можно считать доказанным, что обсуждаемые потоки зарождаются на Солнце в области так называемых корональных дыр.

Корональные дыры (КД) — это крупномасштабные области солнечной атмосферы с пониженной плотностью вещества и температуры. Корональные дыры регистрируются как участки короны с пониженной эмиссией в мягком рентгене и одновременно проявляются в различных линиях излучения из других слоев солнечной атмосферы [6, 7].

Но далеко не все корональные дыры порождают квазистационарные высокоскоростные потоки солнечного ветра, поэтому в первую очередь нужно установить надежную связь корональной дыры с высокоскоростным потоком СВ, после чего можно приступить к изучению взаимодействия этих потоков с космическими лучами.

В настоящей работе на большом статистическом материале исследуется связь корональных дыр с высокоскоростными потоками СВ на орбите Земли и модуляция этими потоками галактических космических лучей.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

**Подготовка выборки по корональным дырам.** В работе использовался большой массив наблюдательных данных за 2000—2013 гг.

В процессе анализа из рассмотрения исключались корональные дыры, высокоскоростные потоки из которых не могут пересечь плоскость эклиптики и быть зарегистрированными космическими аппаратами вблизи Земли. Такая ситуация возможна по следующим причинам:

1) высокоскоростной поток, расширяясь в межпланетное пространство, отклоняется от радиального направления;

2) полярные корональные дыры, границы которых удалены от экватора более чем на  $50\text{--}60^\circ$ , зачастую не могут быть источниками высокоскоростного потока квазистационарного СВ на орбите Земли [3];

3) если между корональной дырой и плоскостью эклиптики находится протяженный участок пояса или цепочки корональных стримеров, то в этом случае высокоскоростной поток не пере-

секает плоскость эклиптики, так как отклонение по широте участка пояса стримеров приводит к отклонению прилегающего к нему быстрого потока СВ.

Положения пояса и цепочек стримеров над видимым диском Солнца могут быть найдены с помощью расчетов магнитного поля в короне в потенциальном приближении [4, 5], или с использованием изображений короны, полученных коронографами LASCO C2 и C3 [2].

На основе вышеуказанных критериев было отобрано около 600 корональных дыр, прохождение которых через центральный меридиан Солнца могло бы быть источником высокоскоростных потоков СВ на орбите Земли. После этого мы провели анализ на соответствие выбранных корональных дыр высокоскоростным потокам рекуррентного СВ, зарегистрированным на орбите Земли.

**Анализ связи высокоскоростных потоков солнечного ветра на орбите Земли с выбранными корональными дырами.** Сведения о солнечном ветре на орбите Земли были получены по данным сайта OMNIweb (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). К высокоскоростным потокам солнечного ветра мы относили участки квазистационарного СВ со скоростью  $V \geq 400$  км/с, исключая области СВ за фронтом ударной волны, магнитные облака и другие межпланетные корональные выбросы массы. Также учитывались такие свойства квазистационарного СВ, как пониженная плотность протонов, повышенная температура и др. Если рассматриваемый поток не соответствовал выбранным критериям, он не анализировался.

Для нахождения рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра на орбите Земли, связанных с выделенными корональными дырами, можно использовать методику, детально описанную в работе [1]. Согласно этой методике с помощью соотношения

$$T_{V/2} = T_{\text{КД}} \pm dT + (4 \pm 1.5 \text{ сут}) \quad (1)$$

можно найти интервал времени, в пределах которого на орбите Земли должен регистрироваться фронт высокоскоростного потока СВ, источником которого является выделенная корональная дыра. Здесь  $T_{V/2}$  — момент времени, когда на

орбите Земли регистрируется середина фронта высокоскоростного потока,  $T_{\text{КД}}$  — момент регистрации корональной дыры,  $dT$  — интервал времени между моментом регистрации дыры и моментом, когда центр дыры оказывается на центральном меридиане. Если корональная дыра в момент  $T_{\text{КД}}$  зарегистрирована к востоку от центрального меридиана, то перед  $dT$  ставится знак «+», если к западу от центрального меридиана то знак «-». При этом

$$dT = |F_{\text{КД}}|/\Omega, \quad (2)$$

где  $F_{\text{КД}}$  — долгота центра КД, отсчитываемая от центрального меридиана (отрицательная к востоку, положительная к западу от центрального меридиана),  $\Omega$  — угловая скорость вращения Солнца, соответствующая длительности кэррингтоновского оборота.

Если фронт высокоскоростного потока квазистационарного СВ попадал в интервал времени, определяемый соотношением (1), то поток считался связанным с выделенной КД. При этом полярность магнитного поля на Солнце в КД и межпланетного магнитного поля в области высокоскоростного потока на орбите Земли должна совпадать.

**Критерий отбора понижений в потоке галактических космических лучей, источником которых являются высокоскоростные потоки солнечного ветра от выбранных корональных дыр.** Интенсивность космических лучей была исследована с использованием нейтронных мониторов по данным пяти станций (Moscow, Oulu, Climax, Kiel, Apatity). К каждой выбранной корональной дыре (соответственно к каждому высокоскоростному потоку СВ, связанному с ней) был построен график зависимости интенсивности потока галактических космических лучей от времени. В результате мы обнаружили, что многие высокоскоростные потоки очень слабо модулируют поток галактических космических лучей. Оставшиеся события, где эта модуляция была заметна (наблюдалось понижение потока ГКЛ), были отобраны для дальнейшего анализа.

Далее особое внимание было уделено форме профиля форбуш-понижения. Так, если был зарегистрирован предвестник форбуш-пониже-

ния или пост-форбуш снижение, если событие находилось в фазе восстановления или в нисходящей фазе, мы сразу исключали такие события из дальнейшего рассмотрения (поскольку зачастую такие особенности профиля форбуш-понижения говорят о модуляции ГКЛ *спорадическими* потоками СВ).

В итоге мы пришли к выводу, что понижения в потоке галактических космических лучей, вызванные *рекуррентными* высокоскоростными потоками СВ от выбранных КД, в графическом представлении должны иметь прямоугольную форму. Именно этот критерий (форма профиля понижения) стал одним из основных при подготовке выборки форбуш-понижений, вызванных прохождением по диску Солнца определенных корональных дыр.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

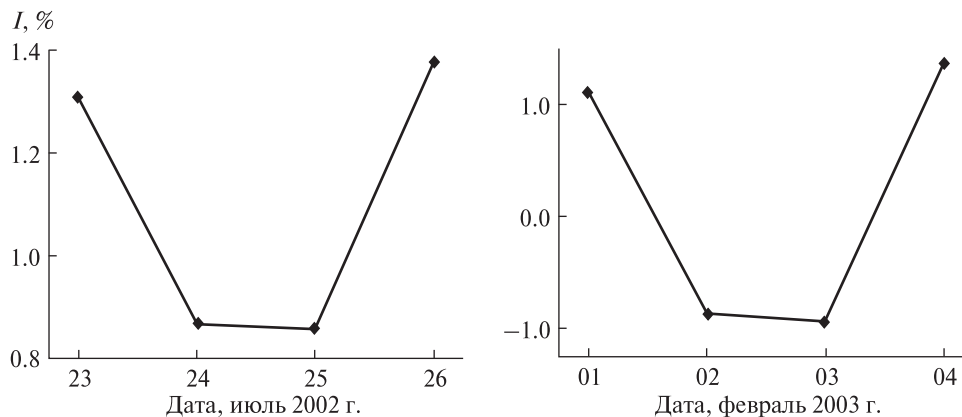
Каждая из отобранных корональных дыр была проанализирована с использованием методики, описанной выше, на предмет связи с высокоскоростным потоком рекуррентного СВ на орбите Земли. Те события, для которых эта связь была подтверждена, были отобраны для дальнейшего анализа.

Следующим этапом был поиск форбуш-понижений определенного типа, возникших в результате модуляции потока галактических космических лучей высокоскоростными потоками рекуррентного солнечного ветра. Такие понижения действительно были найдены (по данным пяти использованных нейтронных мониторов), и графики некоторых из них представлены на рис. 1.

В результате было отобрано больше 50 подобных событий, 25 из которых, на наш взгляд, наилучшим образом демонстрируют прямую связь корональной дыры, высокоскоростного потока рекуррентного СВ и «форбуш-понижение».

В таблице даны итоговые статистические сведения, относящиеся к выбранным корональным дырам, высокоскоростным потокам рекуррентного СВ и связанным с ними понижениям интенсивности ГКЛ.

В результате можно выделить следующие особенности исследованных понижений интенсивности ГКЛ вследствие модуляции рекуррентны-



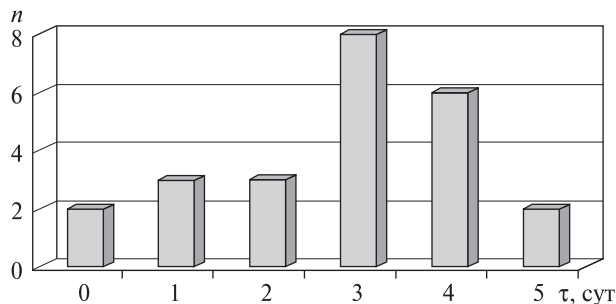
**Рис. 1.** Понижение интенсивности  $I$  потока галактических космических лучей вследствие модуляции высокоскоростных потоков рекуррентного СВ, зарегистрированное 23 июня 2002 г. и 1 февраля 2003 г. Московским НМ

**Физические параметры корональных дыр, высокоскоростных потоков солнечного ветра и связанных с ними понижений интенсивности галактических космических лучей**

Дата наблюдения корональных дыр	Положение корональных дыр на диске Солнца	Дата пересечения Землей середины фронта высокоскоростных потоков	$V_{СВ}^{max}$ , км/с	Начало понижения	Продолжительность понижения, сут
23.06.2002	З*	24.06.2002	505	23.06.2002	4
04.09.2002	Ц	08.09.2002	549	07.09.2002	4
28.09.2002	Ц/Ю	02—03.10.2002	516	02.10.2002	5
13—14.11.2002	Ц/Ю	16.11.2002	510	16.11.2002	6
04.12.2002	Ц	08.12.2002	707	07.12.2002	5
01—03.02.2003	Ц/С	03.02.2003	684	01.02.2003	4
25.05.2003	Ю	29.05.2003	716	29.05.2003	6
28.01.—02.02.2004	С	03—04.02.2004	852	02.02.2004	4
27—29.04.2005	С	01.05.2005	705	01.05.2005	4
22.06.2005	Ц	24.06.2005	566	23.06.2005	6
04.08.2005	Ц	07.08.2005	907	05.08.2005	5
10—12.10.2006	Ц	13.10.2006	607	12.10.2006	4
09—11.03.2007	Ц/Ю	13—14.03.2007	710	11.03.2007	5
27—28.05.2008	Ц	31.05.2008	710	28.05.2008	8
19—20.12.2008	Ц	23.12.2008	573	22.12.2008	5
10—11.02.2009	Ц	15.02.2009	570	13.02.2009	5
05—07.04.2009	Ц	10—11.04.2009	560	08.04.2009	7
09—10.09.2009	С	14.09.2009	388	13.09.2009	5
16.01.2010	С	21.01.2010	575	20.01.2010	5
11—12.11.2010	Ц	15—16.11.2010	828	14.11.2010	5
07—09.12.2010	Ц	13.12.2010	757	12.12.2010	6
18.03.2011	Ц	22.03.2011	483	20.03.2011	4
14—19.07.2012	С	18—24.07.2012	565	18.07.2012	9
	Ю		555		
15—16.08.2012	Ю	19.08.2012	572	18.08.2012	6

*Примечание:* Ц — корональная дыра проходила через экватор, Ю — положение центра корональной дыры было смещено к югу от экватора, С — положение центра корональной дыры было смещено к северу относительно экватора, З, В — центры корональных дыр расположены к востоку или к западу от центрального меридиана





**Рис. 2.** Распределение числа событий  $n$  по величине запаздывания  $\tau$  понижений интенсивности галактических космических лучей относительно регистрации высокоскоростных потоков рекуррентного СВ на орбите Земли

ми высокоскоростными потоками СВ от корональных дыр:

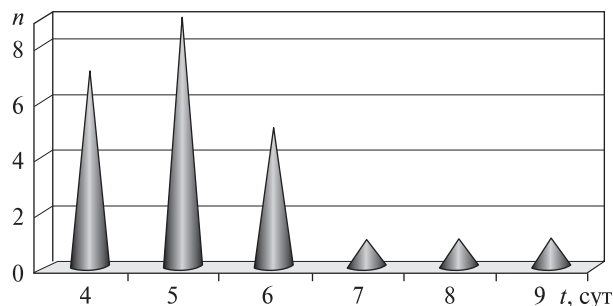
- коэффициент корреляции понижений интенсивности ГКЛ с рекуррентными высокоскоростными потоками СВ от выбранных 25 корональных дыр достаточно высок, и в среднем составляет  $-0.89$ ;

- величина понижений, вызванных модуляцией потока ГКЛ рекуррентными высокоскоростными потоками СВ, была значительно меньше обычных форбуш-понижений от корональных выбросов массы и составляла всего 1–2.5 %, в то время как понижения в потоке ГКЛ от корональных выбросов массы и других межпланетных ударных волн могут достигать 18–25 %;

- наиболее часто понижение в потоке интенсивности ГКЛ регистрировалось на 3–4 сут после регистрации высокоскоростного потока солнечного ветра от корональной дыры (гистограмма на рис. 2). Здесь под  $\tau = 0$  подразумевается, что понижение в потоке ГКЛ наблюдалось в те же сутки, что и регистрация корональной дыры, вызвавшей его;

- длительность  $t$  понижений интенсивности ГКЛ (от начала спада до полного восстановления интенсивности) чаще всего составляла 5 сут (гистограмма на рис. 3).

Данный результат говорит о том, что длительность исследованных понижений (4–6 сут) согласуется с временем жизни соответствующих высокоскоростных потоков в окрестностях Земли, а это, в свою очередь, согласуется со временем прохождения корональной дыры через цен-



**Рис. 3.** Частотное распределение длительности  $t$  исследованных понижений интенсивности галактических космических лучей

тральный меридиан Солнца (при протяженности корональных дыр по долготе 30–90°) [3].

## ВЫВОДЫ

В результате статистического анализа многолетних наблюдений мы можем сделать вывод, что не только корональные выбросы массы и другие спорадические потоки СВ могут быть причиной возникновения понижений интенсивности ГКЛ (в том числе и форбуш-понижений), но и корональные дыры, порождающие высокоскоростные потоки рекуррентного солнечного ветра, могут модулировать поток галактических космических лучей в окрестностях Земли.

Для объяснения этих эффектов требуется построение теоретической модели высокоскоростных потоков, которая будет развита нами в дальнейшем.

*Автор признателен создателям аппарата SOHO за использованные данные с сайта <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>, научным группам, работающим над сайтами [http://www.solen.info/solar/coronal\\_holes.html](http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html) (“Coronal hole history (since late October 2002)”), <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>, <http://www.lmsal.com/isolsearch> и <http://helios.izmiran.rssi.ru/cosray/main.htm> за свободный доступ к данным.*

1. Житник И. А., Жигалкин Р. К., Игнатьев А. П. и др. Исследование солнечных образований на основе комплексных наблюдений с Земли и на спутнике КОРОНАС-Ф: IV. Корональные дыры, открытые магнитные трубки и их связь с высокоскоростными потоками солнечного ветра // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2005. — **101**. — С. 128–145.

2. Файнштейн В. Г., Манженко А. А. Конфигурация пояса корональных стримеров по данным LASCO/SOHO и расчетам магнитного поля в короне: сравнительный анализ // Солнечно-земная физика. — 2004. — Вып. 4. — С. 33.
3. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. — М.: Мир, 1976. — 302 с.
4. Eselevich V. G., Fainshtein V. G., Rudenko G. V. Study of the structure of streamer belts and chains in the solar corona // Solar Phys. — 1999. — **188**. — P. 277.
5. Eselevich V. G., Kaigorodov A. P., Fainshtein V. G. Some peculiarities of solar plasma flows from coronal holes // Planet Space Sci. — 1990. — **38**. — P. 459.
6. Zirin H. The Sun. — New York: Cambridge University Press, 1988. — 259 p.
7. Zirker J. (ed.) Coronal Holes and High-Speed Wind Streams. — Boulder: Colorado Associated University Press, 1977. — 454 p.

*Стаття надійшла до редакції 13.02.14*

А. И. Ключева

#### ЕФЕКТИ ЗНИЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ГАЛАКТИЧНИХ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ, ПОВ'ЯЗАНІ З ВИСОКОШВИДКІСНИМИ ПОТОКАМИ ВІД КОРОНАЛЬНИХ ДІР

Досліджується вплив високошвидкісних потоків сонячного вітру від корональних дір на інтенсивність галактичних космічних променів з використанням даних п'яти нейтронних моніторів впродовж 2000—2013 рр.

А. И. Ключева

#### SOME EFFECTS OF DECREASE IN THE INTENSITY OF GALACTIC COSMIC RAYS WHICH ARE CAUSED BY CORONAL HOLE STREAMS

We investigate the influence of high-speed solar wind streams from coronal holes on cosmic-ray intensity on the basis of neutron monitor data of five stations from 2000 to 2013.

УДК 621.5

С. А. Засуха<sup>1</sup>, Н. И. Лихолит<sup>2</sup>, А. Л. Макаров<sup>3</sup>, Ю. О. Меленевский<sup>4</sup>, В. Т. Архипов<sup>4</sup>, В. Е. Шатихин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Державне космічне агентство України, Київ

<sup>2</sup> Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», Київ

<sup>3</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

<sup>4</sup> Науково-технічний центр криогенно-космічних технологій «Кріокосмос», Харків

## КРИООХЛАДИТЕЛЬ СПЛИТ-СТИРЛИНГ ДЛЯ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

---

*Описан опытный образец криоохладителя Сплит-Стирлинг, разработанный, изготовленный и испытанный Центром «Криокосмос» совместно с КП СП «Арсенал» и ГП «КБ Южное». Приводятся параметры криоохладителя, из которых видно, что его характеристики зависят от резонансных характеристик компрессора и охладителя, от соотношения объемов полостей машины, от давления и частоты работы машины. Параметры машины зависят также от параметров питающего напряжения (тока), от тепловой нагрузки и температуры охлаждения объекта. Приводятся также особенности подготовки системы к работе. Исследования работы опытного образца позволяют определить оптимальные пути его дальнейшего совершенствования. Результаты исследования дадут возможность потребителям и разработчикам подобных охладителей лучше понимать процессы, протекающие в машине.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Работа инфракрасных приборов в значительной мере зависит от надежной работы охлаждаемых устройств, обеспечивающих поддержание криогенных температур фотоприемных устройств (ФПУ) в заданном диапазоне. К другим требованиям, предъявляемым к охлаждаемым устройствам, относятся также скорость выхода на температуру охлаждения, стабильность температуры охлаждения, отсутствие вибраций, ресурс работы, энергопотребление и вес.

В настоящее время этим требованиям отвечают охладители, работающие по обратному циклу Стирлинга в модификации Сплит-Стирлинг. Основой их недостаток — возможные вибрации, связанные с тем, что у охладителя, на головке которого крепится на тепловой контакт ФПУ, имеется подвижный поршень с регенератором. Даже если поршень движется возвратно-посту-

пательно в направлении, куда направлено ФПУ, вибрация может появиться даже если жестко закрепить охладитель с ФПУ к объективу.

В ряде случаев на смену охладителей Сплит-Стирлинг приходят охладители, использующие пульсационные трубки, у которых нет подвижных частей в охладителе, но есть свои недостатки, в частности увеличенное время выхода на тепловой режим и короткая трубопроводная связь с компрессором, который является потенциальный источником вибраций.

Центр «Криокосмос», совместно с рядом украинских организаций, несколько лет занимается разработкой фотоприемной аппаратуры различного применения и охладителями для нее. Некоторые особенности Сплит-Стирлинга, полученные нами, могут быть полезны для работы их разработчикам и пользователям.

Система Сплит-Стирлинг состоит из компрессора, соединенного герметичной трубкой с охладителем, и блока управления. К охладителю может крепиться вакуумируемый сосуд с входным окном, через которое поступает обрабатываемый сигнал. Блок управления по кабелям,

---

© С. А. ЗАСУХА, Н. И. ЛИХОЛИТ, А. Л. МАКАРОВ,  
Ю. О. МЕЛЕНЕВСКИЙ, В. Т. АРХИПОВ,  
В. Е. ШАТИХИН, 2014

идушим от датчиков, установленных в компрессоре и охладителе системы, получает данные о ходе поршней компрессора, о ходе поршня охладителя, о температуре охлаждаемого объекта. В соответствии с этими параметрами блок подает электрическое питание на силовые электрические катушки компрессора, находящимися в магнитном поле постоянных магнитов, т. е. компрессор является активным агрегатом системы охлаждения, от которого зависит рабочая частота и изменение давления во всей системе.

### ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ОХЛАДИТЕЛЯ

Разработанный и изготовленный опытный образец охладителя типа Сплит-Стирлинг для охлаждения ФПУ, показанный на рис. 1, был сделан по принципу, описанному выше.

Опытный образец включал в свой состав компрессор, охладитель и блок управления, соединенный трубопроводом и кабелями. Линейный компрессор имел два оппозитных поршня диаметром 14 мм, перемещавшихся в одном цилиндре под действием подвижных электрических катушек, питаемых блоком управления переменным электрическим током с заданной частотой. Напряжение питания самого блока управления составляло  $27 \pm 4$  В.

Центрирование поршней и поддержание зазоров между поршнями и цилиндрами обеспе-

чивалось шариковыми направляющими, заключенными в специальных сепараторах. Эти шариковые направляющие обеспечивали сохранение зазоров, когда в них нет газового потока, и отсутствует усилие, обеспечивающее исключение контакта между поршнями и цилиндром. Начальное положение поршней и ограничение их движения в мертвых точках определялось также действием пружин, закрепленных на штоках поршней. Токовые катушки находились в постоянном магнитном поле, образованном постоянными магнитами и магнитопроводами, закрепленными в корпусе компрессора. Электрическое питание на силовые катушки подавалось через пружинные токоподводы. Регулирование хода поршней компрессора обеспечивалось силой тока, подаваемого на силовые катушки поршней, массой подвижных частей поршней, идентичностью магнитов, создающих магнитное поле вокруг катушек, противодействующей силой, создаваемой разностью давлений над и под поршнями, и пружинами, фиксирующими начальное положение поршней. На штоках поршней были закреплены электромагнитные датчики положения, фиксирующие крайние положения поршней и подающие данные об их положении на блок управления.

Охладитель Сплит-Стирлинг имел один поршень, внутри которого был расположен регенератор. Положение поршня и его движение определялось жесткостью пружины, закрепленной на поршне и в корпусе охладителя, массой поршня и разностью давлений над поршнем и под штоком поршня. Давление вокруг поршня охладителя определял компрессор, а давление под штоком поршня оставалось примерно постоянным и равнялось примерно среднему давлению в системе. Но на эту разность давлений влияло также гидравлическое сопротивление регенератора, уплотнение штока, а по времени — сопротивление трубопровода, соединяющего компрессор и охладитель.

Для обеспечения постоянства зазора между стенками цилиндра и поршнем охладителя также использовались шариковые направляющие с сепаратором, которые обеспечивали длительный ресурс работы машины. Регенератор, который

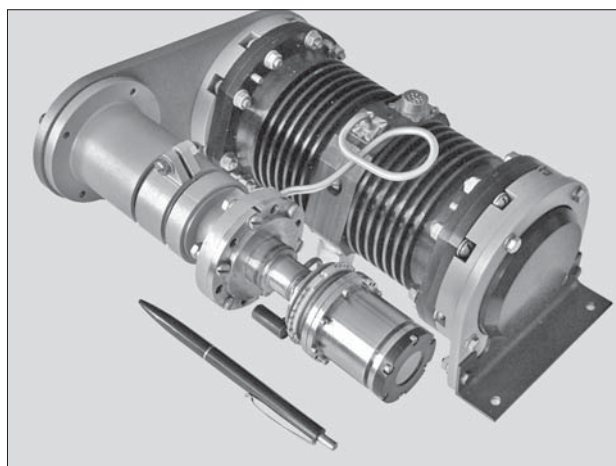


Рис. 1. Опытный образец охладителя типа Сплит-Стирлинг для охлаждения фотоприемных устройств



находился в поршне охладителя, состоял из сетчатой насадки, изготовленной из фосфористой бронзы. Наружный диаметр цилиндра охладителя составлял 8 мм, его длина — 81 мм, а теплообменник, к которому присоединялся на тепловой контакт объект охлаждения, — 10 мм. На штоке поршня охладителя устанавливался датчик положения, который давал сигнал об ограничении хода поршня.

Особенностью систем охлаждения, кроме малых размеров и конструктивных сложностей конструкции, являлось то, что рабочая полость машины, заполненная рабочим газом — гелием, не должна содержать никаких посторонних газов, которые будут оседать на холодной части регенератора, ухудшая теплообмен главного теплообменника системы. В первую очередь это влага, а также углекислота и пары более тяжелых веществ, в частности масел и полимеров. Удалить их сложно, а набрать очень легко, особенно учитывая развитую поверхность регенератора и малые сечения откачных трубопроводов. Особенно опасна влага, которая постоянно есть в воздухе и активно адсорбируется развитыми поверхностями машины при ее изготовлении и сборке.

Также сложным местом конструкции являются зазоры между поршнями и цилиндрами машин. Эти зазоры должны быть минимальными, но не должно быть касания подвижных деталей поршней стенок цилиндров, так как это вызывает лишние затраты потребляемой мощности, износ поверхностей и загрязнение рабочего объема продуктами износа. Эта задача особенно усложнялась тем, что система должна работать в широком температурном диапазоне окружающей среды от  $-50$  до  $+60$  °С, не говоря о том, что температура охлаждаемого устройства должна понижаться примерно от 300 до 75 К. При этом охлаждение должно идти быстрым темпом.

Для решения задачи обеспечения малых зазоров мы использовали проверенный нами вариант шариковых направляющих, который хотя и требует высокой точности изготовления деталей поршней и цилиндров, но дает положительный результат. В данном случае задача несколько упрощается тем, что шарики можно подбирать под размер изготовленного зазора. Материалы и износостойкие пок-

рытия приходилось выбирать с учетом диапазона рабочих температур и конкретных требований к рабочим условиям эксплуатации.

Пока ресурс работы машин исчислялся сотнями часов, можно было находить компромиссы в рамках обычных конструктивных решений. Но с увеличением ресурса до нескольких тысяч часов и ужесточением требований по весу и энергопотреблению пришлось принимать дополнительные меры по совершенствованию машин, по поиску новых материалов и покрытий, по поиску новых конструктивных решений. В опытном образце решение вопроса исключения примесей газов решалось выбором материалов и покрытий, промывкой спиртом всех деталей перед сборкой, а также увеличением времени откачки рабочей полости системы. Одновременно с откачкой проводился прогрев системы до 100... 110 °С и выше. Для вакуумирования системы использовались только безмасляные средства откачки с давлением на выходе до  $10^{-3}$ ... $10^{-5}$  Торр. Также принимались меры по увеличению проходного сечения каналов вакуумирования, обеспечивающих откачку регенератора и полостей, примыкающих к рабочей полости охладителя. Одновременно принимались меры по обезгаживанию трубопроводов, по которым напускался в систему гелий высокой чистоты.

Используя принятые решения, нам удалось пройти ресурс работы 30 тыс. часов и получить приемлемые результаты.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ОХЛАДИТЕЛЯ

Для обеспечения времени выхода на температурный режим меньше 5 мин мы ввели в блоке управления питанием функцию увеличения либо уменьшения тока питания на электрические катушки компрессора от температуры объекта, в пределах ограничения на потребляемую мощность. Кроме того, было принято начальное значение мощности на уровне 20 Вт. Все это обеспечило сокращение времени выхода на рабочий режим до 4.5 мин при  $T = 300$  К. График выхода охладителя на рабочий режим показан на рис. 2. На графике приведена также потребляемая мощность машины в процессе выхода на режим. Надо

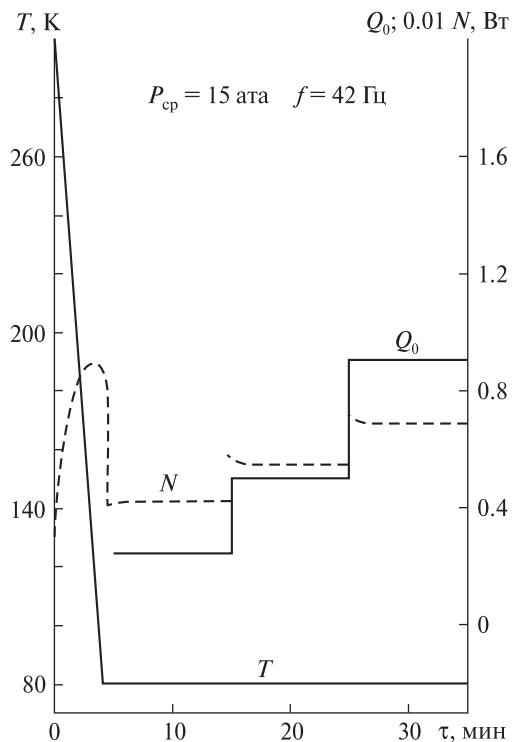


Рис. 2. Выход системы на режим:  $T$  — температура объекта,  $N$  — потребляемая мощность,  $Q_0$  — нагрузка объекта

учесть еще и тот факт, что в машине имеется запас по выходу на режим в виде лишней массы головки охладителя (донышко и стенки охладителя) порядка 2...2.5 г, который был сделан с учетом массы предполагаемого объекта охлаждения. Также на графике показан переход на повышенные мощности полезной нагрузки от 0.25 до 0.9 Вт. Графики даны при частоте 42 Гц, среднем давлении 15 ата и напряжении питания –27 В.

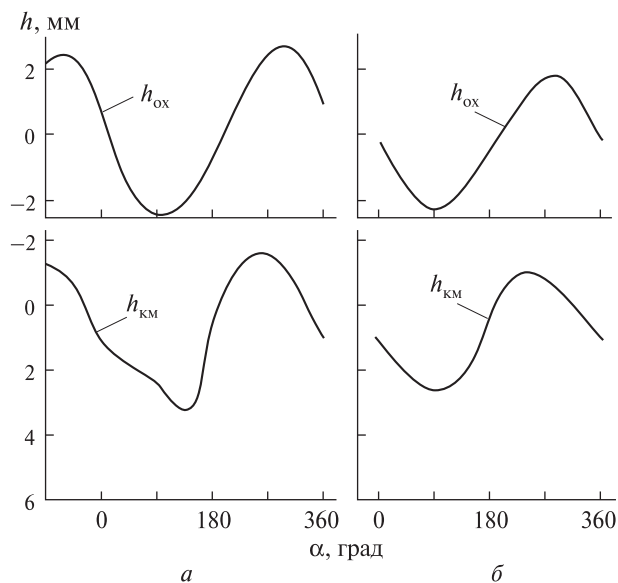
Особенностью охладителей Сплит-Стирлинг являлось то, что движение поршня охладителя и его угол сдвига относительно компрессорных поршней зависели от разности давлений в полости поршня и в объеме пружинного устройства, от гидравлического сопротивления соединительной трубки и регенератора и от резонансных характеристик системы. Поэтому приходилось строго согласовывать конструкцию машин и рабочую частоту системы охлаждения для получения нужной производительности и минимальной потребляемой мощности компрессора. Для

этого необходимо было согласовывать питание, подаваемое на силовые катушки компрессора, и резонансные характеристики компрессора и охладителя, чтобы при их совместной работе при рабочем давлении системы главная сила, движущая поршень охладителя, — разность усилий, действующая на площадь поршня и его шток — была максимальной и могла максимально использоваться в рабочем цикле машины.

Обычно определяющей частотой системы является резонансная частота охладителя, так как он определяет холодопроизводительность и температуру охлаждения системы. В нашем случае она равна 40...43 Гц при среднем давлении в системе 12...16 ата. Понижение или превышение этой частоты приводило к увеличению потребляемой мощности компрессором, что можно связать с тем, что система работает не в оптимальном режиме. При этом с повышением частоты система из режима обратного цикла Стирлинга переходит в цикл прямого получения работы с выделением тепла, поршень охладителя какое-то время пытается удержаться в режиме получения холода с учетом теплоемкости системы, а потом охладитель более резко повышает свою температуру.

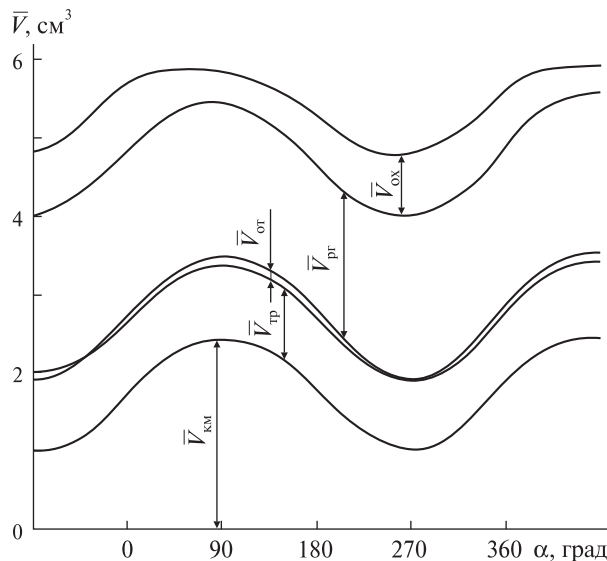
Перемещение поршней в значительной мере зависит от конструкции магнитной системы и токовых катушек компрессора, а также от электрического тока, подаваемого в них блоком питания во время охлаждения объекта и основной работы системы. С одной стороны, поршни не должны соударяться друг с другом и со стенками машины, а с другой — есть жесткие требования к временным характеристикам системы. В опытном образце охладителя для нормальной работы системы были установлены датчики температуры объекта охлаждения, а также положения поршней компрессора и охладителя, показания которых использовались в программах управления питанием силовых катушек компрессора.

По показаниям датчиков перемещения поршней можно судить о характере процессов, происходящих в системе охлаждения за один цикл. В частности, на рис. 3, а приведены осциллограммы перемещения компрессорных поршней и поршня охладителя при начальном охлаждении



**Рис. 3.** Перемещение поршней охладителя и компрессора:  $h_{\text{ox}}$  — перемещение поршня охладителя,  $h_{\text{км}}$  — перемещение поршня компрессора

машины (температура охладителя примерно 181 К, среднее давление 15 ата, частота 40.5 Гц), а на рис. 3, б — при выходе системы на рабочий режим. В частности, по изменению характера графиков движения компрессорного поршня в режиме охлаждения и движению поршня охладителя можно судить об увеличении холодной полости охладителя, о сохранении электрической мощности и о резком изменении направлении электрического тока в силовых катушках без изменения гидравлического сопротивления внешних линий. В тоже время движение поршня охладителя реагирует на эти изменения с некоторой задержкой из-за наличия сопротивления соединительного трубопровода. Характер хода компрессорных поршней изменяется при неизменной частоте, но с увеличением тепловой нагрузки на систему охлаждения. При этом исчезают волны на графике хода поршней компрессора, а весь график становится похож на синусоиду. Также с увеличением частоты эти отклонения уменьшаются, что может быть связано с приближением к резонансу компрессора и недостатком холода в системе, так как с дальнейшим увеличением частоты сдвигается положение максимума



**Рис. 4.** Приведенные объемы полостей опытного образца:  $V_{\text{км}}$ ,  $V_{\text{тр}}$ ,  $V_{\text{от}}$ ,  $V_{\text{пр}}$ ,  $V_{\text{ох}}$  — соответственно объемы компрессора, трубопровода, разделителя полостей, регенератора и охладителя

положения поршня охладителя и уменьшается холодопроизводительность системы.

На производительность системы охлаждения в определяющей степени сказывается правильность выбора размеров компрессора и охладителя с учетом мертвых объемов, не задействованных во время основной работы системы, эффективности регенератора, а также размеров соединительной трубки между компрессором и охладителем. На рис. 4 даны изменения (приведенные к температуре компрессора) рабочего объема полостей компрессорного цилиндра, соединительной трубки, регенератора, теплого и холодного объема охладителя за один цикл работы машины. Приведенные данные даны для частоты 40.5 Гц, среднего давления 15 ата, нагрузки 0.25 Вт. Угол сдвига поршней компрессора и охладителя определяется характеристиками системы. По этому графику можно корректировать конструкцию с точки зрения сокращения объемов мертвых полостей компрессора, соединительной трубки и регенератора, а также изменения режима питания силовых катушек компрессора. При этом необходимо учитывать гидравлическое сопротивление названных элементов машины и стоящие перед

ними задачи теплообмена, соединения частей машины и охлаждения объекта. В частности, может быть существенно уменьшен мертвый объем компрессора, который не используется при данной нагрузке. Значительный объем имеет соединительный трубопровод, но при данной длине его гидравлическое сопротивление не позволяет существенно увеличить проходной диаметр. Может быть уменьшен объем регенератора, диаметр которого был увеличен из-за производственных сложностей изготовления, но здесь нужно учитывать эффективность теплообмена и величину полезной нагрузки. И наконец, холодный объем рабочей полости охладителя — он значителен, но его размер диктуется временем выхода на рабочий режим и полезной нагрузкой. Конечно, он работает в противофазе с компрессором, но это объем, который производит холод, и его нужно совершенствовать.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования опытного образца охладителя типа Сплит-Стирлинг подтвердили правильность принятых системных и большинства конструктивных решений. Также были определены пути дальнейшего конструктивного усовершенствования системы охладителя. Так, для уменьшения резонансной частоты компрессора требуется увеличение веса его подвижных элементов, и поэтому рациональным является вопрос о повторном рассмотрении варианта конструкции с подвижными постоянными магнитами и неподвижными катушками. Такие изменения позволят отказаться от разборных фланцев, упростить конструкцию и существенно улучшить весогабаритные характеристики системы. Также такое решение позволит повысить надежность системы. Такое изменение системы требует пересмотра идеологии электропитания силовых катушек системы. Но изменение конструкции не снижает значения процессов, происходящих в самой машине, и их все равно нужно учитывать при новых разработках и эксплуатации существующих систем охлаждения.

1. *Справочник по физико-техническим основам криогеники* / Под ред. М. П. Малкова. — М.: Энергия, 1973. — 392 с.

*Стаття надійшла до редакції 19.02.14*

*С. О. Засуха, М. І. Лихоліт, О. Л. Макаров,  
Ю. О. Меленевський, В. Т. Архипов, В. Е. Шатіхін*

#### КРІООХОЛОДЖУВАЧ СПЛІТ-СТІРЛІНГ ДЛЯ ФОТОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Описано дослідний зразок охолоджувача типу Спліт-Стірлінг, розроблений, виготовлений і випробуваний Центром «Кріокосмос» спільно з українськими організаціями КП СП «Арсенал» та ДП КБ «Південне». Наводяться параметри кріоохолоджувача, з яких видно, що його характеристики залежать від резонансних характеристик компресора і охолоджувача, від співвідношення об'ємів порожнин машини, від тиску і частоти роботи машини. Параметри машини залежать також від параметрів напруги живлення (струму), теплового навантаження і температури охолодження об'єкта. Наводяться також особливості підготовки системи до роботи. Дослідження роботи дослідного зразка дозволяють визначити оптимальні шляхи його подальшого вдосконалення. Результати досліджень дадуть можливість споживачам і розробникам подібних охолоджувачів краще розуміти процеси, що протікають у машині.

*S. A. Zasuha, N. I. Lykholit, A. L. Makarov,  
Y. A. Melenevskiy, V. T. Arhipov, V. Ye. Shatikhin*

#### SPLIT-STIRLING CRYOCOOLER FOR PHOTO-RECEPTORS

We describe a prototype of the cooler-type Split-Stirling. The cooler is designed, manufactured and tested by the Centre "Cryocosmos", together with two Ukrainian organizations, namely, State-owned enterprise of a specialized instrumentation "Arsenal" and Design Bureau "Yuzhnoye". The cryocooler parameters are given which show that the cryocooler characteristics depend on the resonance characteristics of the compressor and cooler, on the ratio of void volumes for the machine, on the gas pressure and operation frequency of the machine, and on the parameters and shape of supply voltage (current). The machine parameters are also dependent upon the heat load and cooling temperature of the object. Some features of the system training to operation are considered. The study of the prototype enables one to determine the best way for its further improvement. The research results can give consumers and developers of such coolers a clearer insight into the processes taking place in the cooler.



### К 100-летию со дня рождения члена-корреспондента НАН Украины Николая Лукича ГОЛЕГО



15 июня 2014 года исполнилось столетие со дня рождения отечественного ученого, известного своими оригинальными исследованиями в области механики и машиностроения (триботехники), крупного специалиста в области процессов трения и износа деталей машин и фрейтинг-коррозии доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента Национальной академии наук Украины Николая Лукича Голего.

Н. Л. Голего родился на станции Христиновка Черкасской области. После окончания в 1938 году с отличием Киевского авиационного института был направлен на работу в город Харьков на завод 242 Гражданского воздушного флота

(ГВФ), где работал дефектовщиком, ведущим инженером, начальником моторного цеха.

В сентябре 1941 года вместе с заводом был эвакуирован в г. Алма-Ата, где работал начальником цеха. В 1942 году переведен в Актюбинск и назначен Главным инженером завода ГВФ. В 1944 году направлен в Днепропетровск для организации нового ремонтного завода 409 ГВФ. В ноябре 1948 года направлен в г. Киев для организации ремонтного завода 410, где проработал в должности директора до 1953 года.

В сентябре 1953 года Приказом начальника Главного управления ГВФ переведен в Киевский институт гражданского воздушного флота на должность заведующего вновь организуемой профилирующей кафедры технологии ремонта авиационной техники. В январе 1954 года был назначен ректором Киевского института ГВФ и работал в этой должности до 1975 года.

В 1954 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. В 1956 году ему присвоено звание доцента. В 1963 году защитил докторскую диссертацию на тему «Физико-химическая механика материалов в проблеме схватываний деталей узлов трения». В 1964 году ему присвоено звание профессора, а также почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники УССР». В 1967 году избран членом-корреспондентом Академии наук Украины.

Много сил и энергии было вложено Николаем Лукичем в дело обучения и воспитания молодого поколения. Из стен Киевского института инженеров гражданской авиации (КИИГА, Национальный авиационный университет — в на-

стоящее время) вышел целый ряд специалистов, которыми были подготовлены под его руководством и защищены кандидатские и докторские диссертации. Многие из них стали впоследствии известными учеными, руководящими работниками отраслей страны.

С 1977 по 2012 год он был директором Государственного предприятия «Научно-технический центр «Триботехника» Института технической механики Национальной академии наук Украины и Национального космического агентства Украины. Созданный им коллектив совместно с ГП «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К. Янгеля» принимает активное участие в решении проблем в области создания новейших образцов ракетно-космической техники, в решении проблем схватывания деталей узлов трения космической техники, в частнос-

ти проблемы выбора рациональных материалов пар трения токосъемных устройств космического базирования.

Н. Л. Голего — автор более 250 научных трудов, в том числе пяти монографий. Он был членом трех ученых Советов НАН Украины и КИИГА.

Заслуги Н. Л. Голего в развитии науки и новой техники неоднократно отмечались премиями и наградами. Награжден двумя орденами Ленина, орденом Октябрьской Революции, орденом Трудового Красного знамени, медалями. Н. Л. Голего являлся Почетным авиатором Российской Федерации.

Коллектив Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К. Янгеля» отдает дань уважения памяти этого видного ученого-механика и руководителя.

*А. Л. МАКАРОВ*



Збірник спогадів, присвячених Володиміру Григоровичу Сергєєву — видатному Головному конструктору і керівнику робіт зі створення систем керування: стратегічних ракет конструкції М. К. Янгеля, В. М. Челомея, В. Ф. Уткіна; космічних апаратів «Цілина»; транспортних кораблів постачання станцій «Салют»; орбітальних модулів станції «Мир»; ракет-носіїв серії «Космос», «Циклон-2», «Циклон-3», «Енергія».

40 статей та фотодокументи створюють портрет В. Г. Сергєєва:

- учасника другої світової війни (в вересні — листопаді 1939 р., з червня 1941 р. по вересень 1945 р.): кавалера

## НОВА КНИГА

**Сергєєв Владимир Григорьевич — Главный конструктор систем управления. К 100-летию со дня рождения /** Под общей редакцией Н. И. Вахно. — Харьков: ПАО «ХАРТРОН», 2014. — 448 с.

лера ордена Червоної Зірки (1944 р.) і чотирьох орденів Вітчизняної війни (1945, 1945, 1945, 1985), медалей «За взяття Кенігсберга» (1945 р.), «За перемогу над Німеччиною у Великій Вітчизняній війні 1941—1945 рр.» (1945 р.), «За перемогу над Японією» (1946 р.);

- одного з першопрохідців вітчизняного ракетобудування, який пройшов шлях від інженера-конструктора в московському НДІ-885 (з червня 1947 р.) до Генерального директора і Головного конструктора харківського НВО «Електроприлад» (по жовтень 1986 р.);

- двічі Героя Соціалістичної Праці (1961, 1976), лауреата Ленінської (1957 р.) і Державних премій СРСР (1967 р.) і УРСР (1979 р.), кавалера ордена Трудового Червоного Прапора (1959 р.), п'яти орденів Леніна (1961, 1966, 1974, 1976, 1984), орденів Жовтневої Революції (1971), «За заслуги» III ступеня (1999 р.), Богдана Хмельницького III ступеня (1999 р.), Ярослава Мудрого V ступеня (2004 р.);

- академіка АН УРСР (1982 р.), доктора технічних наук (1968 р.), лауреата премії ім. М. К. Янгеля АН УРСР (1981 р.);

- Почесного громадянина м. Харкова (1999 р.).

**АЛПАТОВ** Анатолій Петрович — очолює відділ системного аналізу та проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор технічних наук, професор. Заслужений діяч науки і техніки України.

Напрямок науки — системний аналіз, динаміка та керування космічними апаратами; магнітні системи керування; динаміка багатокомпонентних керованих механічних систем; теорія рухливого керування; проблема космічного сміття.

**АРХИПОВ** Володимир Тимофійович — начальник відділу Науково-технічного центру кріогенно-космічних технологій «Кріокосмос», кандидат технічних наук.

Напрямок науки — кріогенне приладобудування для космічної техніки.

**БАРАНОВ** Євген Юрійович — начальник комплексу системного проектування ракетно-космічних комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрямок науки — проектування бойових і космічних ракетних комплексів.

**БОМБАРДЕЛЛІ** Клаудіо — старший дослідник групи космічної динаміки при Технічному університеті Мадрида (Іспанія), доктор філософії.

Напрямок науки — космічна динаміка, аналіз місій, орбітальний рух і космічні зв'язки.

**ЗАКРЖЕВСЬКИЙ** Олександр Євгенійович — очолює відділ динаміки поліагрегатних систем Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — динаміка та керування космічними апаратами, теорія оптимального керування; теорія систем пружних тіл; динаміка розгортання складних пружних космічних систем; космічні зв'язки.

**ЗАСУХА** Сергій Олексійович — заступник голови Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

**КЛЮЄВА** Антоніна Ігорівна — аспірант Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — фізика космічних променів.

**ЛИХОЛІТ** Микола Іванович — директор-головний конструктор Казенного підприємства спеціального приладобудування «Арсенал», доктор технічних наук, професор, заслужений машинобудівник України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — оптико-електронне приладобудування для космічної та військової техніки.

**МАКАРОВ** Олександр Леонідович — головний конструктор-начальник конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів 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.

**МЕЛЕНЕВСЬКИЙ** Юрій Олександрович — директор-головний конструктор Науково-технічного центру кріогенно-космічних технологій «Кріокосмос».

Напрямок науки — кріогенне приладобудування для космічної техніки.

**ОСИНОВИЙ** Геннадій Геннадійович — начальник науково-технічного проектного відділу з розробки спеціальних ракетних систем.

Напрямок науки — системне проектування ракетних комплексів, проектна розробка спеціальних систем і вузлів ракет.

**ПИРОЖЕНКО** Олександр Володимирович — провідний науковий співробітник відділу системного аналізу та проблем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор технічних наук.

Напрямок науки — динаміка твердого тіла, збурений орбітальний рух і динаміка космічних систем, стабілізація та керування космічними апаратами, багатоелементними тросовими системами.

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

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

**ШИБЕЦЬКИЙ** Владислав Юрійович — асистент кафедри біотехніки та інженерії факультету біотехнології і

біотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Напрямок науки — динаміка бортової апаратури.

**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.

**ЧЕРЕМНИХ** Олег Костянтинович — завідувач відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — фізика ближнього космосу, фізика плазми.