



# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ  
НАУК УКРАЇНИ

Том 28  
4(137)  
2022

## SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

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

### ЗМІСТ

#### Моніторинг космічного простору і космічне сміття

*Беспалко І. А., Греков Л. Д., Пекарєв Д. В., Федорчук Д. Л.* Концепція інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки . . . . . 3

#### Динаміка та керування космічними апаратами

*Pirozhenko A. V., Maslova A. I., Vasyliiev V. V.* Analytical model of satellite motion in almost circular orbits under the influence of zonal harmonics of geopotential . . . . . 18

#### Космічні матеріали та технології

*Gristchak V. Z., Hryshchak D. V., Dyachenko N. M., Baburov V. V.* The influence of the Gaussian curvature sign of the compound shell structure's middle surface on local and overall buckling under combined loading . . . . . 31

#### Астрономія та астрофізика

*Голубаєв О. В., Горбаньов Ю. М., Шульга О. В., Андрєєв О. А., Бушувєв Ф. І., Відьмаченко А. П., Грудинін Б. О., Жилєєв Б. Є., Калюжний М. П., Козак П. М., Куліченко М. О., Малиновський Є. В., Мозгова А. М., Савчук С. Г., Стеклов О. Ф., Сумарук Ю. П., Янків-Вітківська Л. М.* Створення Української метеорної спостережної мережі: інструменти, методи обробки, спостережні можливості . . . . . 39

### CONTENTS

#### Space Environment Monitoring and Space Debris

*Bespalko I. A., Hrekov L. D., Pekariev D. V., Fedorchuk D. L.* The concept of an information system to provide the monitoring of space in order to increase military security. . . . . 3

#### Spacecraft Dynamics and Control

*Pirozhenko A. V., Maslova A. I., Vasyliiev V. V.* Analytical model of satellite motion in almost circular orbits under the influence of zonal harmonics of geopotential . . . . . 18

#### Space Materials and Technology

*Gristchak V. Z., Hryshchak D. V., Dyachenko N. M., Baburov V. V.* The influence of the Gaussian curvature sign of the compound shell structure's middle surface on local and overall buckling under combined loading . . . . . 31

#### Astronomy and Astrophysics

*Golubaev A. V., Gorbanev Yu. M., Shulga O. V., Andreev O. A., Bushuev F. I., Vidmachenko A. P., Hrudynin B. O., Zhilyaev B. E., Kaliuzhnyi M. P., Kozak P. M., Kulichenko M. O., Malynovskiy Ye. V., Mozgova A. M., Savchuk S. G., Steklov A. F., Sumaruk Yu. P., Yankiv-Vitkovska L. M.* Creation of Ukrainian meteor observation network: instruments, methods for processing, observation possibilities. . . . . 39

## Космічна геоінформатика та геодезія

*Фис М. М., Зазуляк П. М., Согор А. Р.* Потенціал сили тяжіння та його складова відцентрової сили всередині еліпсоїдальної планети . . . . . 71

## Історія космічних досліджень

*Яцків Я. С.* З історії космічних досліджень в Україні. 1. Виконання космічних досліджень станом на 1991 р. . . . . 78

## Space Geoinformatics and Geodesy

*Fys M. M., Zazuliak P. M., Sohor A. R.* Gravity potential and its component of centrifugal force inside the ellipsoidal planet . . . . . 71

## History of Space Research

*Yatskiv Ya. S.* From the history of space research in Ukraine. 1. The performance of space research as of 1991 year. . . . . 78

*На першій сторінці обкладинки — Організації-учасники Української метеорної спостережної мережі (див. статтю Голубаєв О. В. та ін. Створення Української метеорної спостережної мережі: інструменти, методи обробки, спостережні можливості, С. 39—70)*

**Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку наукових фахових видань України, в яких публікуються результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних, технічних, біологічних, геологічних та юридичних наук**

**Відповідальний секретар редакції О.В. КЛИМЕНКО**

**Адреса редакції:** 01030, Київ-30, вул. Володимирська, 54  
тел./факс (044) 526-47-63, ел. пошта: [reda@mao.kiev.ua](mailto:reda@mao.kiev.ua)  
Веб-сайт: [space-scitechnjournal.org.ua](http://space-scitechnjournal.org.ua)

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.  
Перереєстровано Міністерством юстиції України 21.11.2018 р.,  
Свідоцтво серія КВ № 23700-13540 ПР

---

Підписано до друку 05.09.2022. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон.  
Ум. друк. арк. 9,24. Обл.-вид. арк. 9,70. Тираж 50 прим. Зам. № 6699.

---

Видавець і виготовлювач ВД «Академперіодика» НАН України  
вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01024

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

<https://doi.org/10.15407/knit2022.04.003>

УДК 004.9:629.78

**І. А. БЕСПАЛКО**<sup>1</sup>, наук. співроб., канд. техн. наук

E-mail: biran198311@gmail.com

**Л. Д. ГРЕКОВ**<sup>2</sup>, наук. консультант, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.,

лауреат Державної премії в галузі науки і техніки

E-mail: leonid.grekov@gmail.com

**Д. В. ПЕКАРЕВ**<sup>3</sup>, голов. наук. співроб., канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

E-mail: dmvlpek@ukr.net

**Д. Л. ФЕДОРЧУК**<sup>1</sup>, нач. наук. центру, канд. техн. наук

E-mail: fedor4uk.d@gmail.com

<sup>1</sup> Житомирський військовий інститут ім. С. П. Корольова

Проспект Миру 22, Житомир, Україна, 10004

<sup>2</sup> Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче підприємство «Вектор»

вул. Звіринецька 63, Київ, Україна, 01014

<sup>3</sup> Секція прикладних проблем Президії Національної академії наук України

вул. Володимирська 54, Київ, Україна, 01030

## КОНЦЕПЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ВОЄННОЇ БЕЗПЕКИ

---

*Запропоновано концепцію інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки з урахуванням особливостей виконання завдань вітчизняними структурами сектору безпеки і оборони. В основу концепції покладено розроблення базової (відкритої) та спеціалізованих (адапованих до потреб визначених споживачів) підсистем з розподілом між ними загальних та спеціальних завдань з оцінки космічної обстановки.*

*Подано результати аналізу можливостей наявного у відкритому доступі програмного забезпечення, які можна використати для оцінки космічної обстановки як додатковий засіб. Розроблено функціональну модель інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору та проведено декомпозицію її основного функціонального блоку — «Загальна оцінка космічної обстановки».*

*Визначено основні програмні компоненти спеціалізованого програмно-алгоритмічного забезпечення загальної оцінки космічної обстановки: виявлення та супроводження космічних об'єктів, роботи з базою даних об'єктів космічної діяльності, моделювання і відображення космічної обстановки, а також окреслено їхні основні завдання. Розроблено структурну схему програмно-технічного комплексу загальної оцінки космічної обстановки.*

*Запропоновано подальші шляхи дослідження: конкретизація функціоналу компонентів програмно-алгоритмічного забезпечення загальної оцінки космічної обстановки, обґрунтування і розроблення структур баз даних космічних об'єктів та об'єктів космічної діяльності, створення відповідних програмно-технічних комплексів та перевірка адекватності використання у них математичних моделей, а також питання захисту інформації.*

**Ключові слова:** моніторинг космічного простору, оцінка космічної обстановки, космічна ситуаційна обізнаність, космічна діяльність, орбітальні космічні засоби, спеціалізоване програмно-алгоритмічне забезпечення.

---

Цитування: Беспалко І. А., Греков Л. Д., Пекарев Д. В., Федорчук Д. Л. Концепція інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки. *Космічна наука і технологія*. 2022. 28, № 4 (137). С. 3—17. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.003>

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БД	— база даних
ДКА	— Державне космічне агентство
ЗІД	— звітно-інформаційні документи
ЗС	— Збройні Сили
КА	— космічні апарати
КД	— космічна діяльність
КЗ	— космічні засоби
КІ	— координатна інформація
КО	— космічні об'єкти
КОБ	— космічна обстановка
КП	— командний пункт

КСО	— космічна ситуаційна обізнаність
НКІ	— некоординатна інформація
НЦУВКЗ	— Національний центр управління і випробувань космічних засобів
ПЗ	— програмне забезпечення
ПУ	— початкові умови
СКАКО	— Система контролю й аналізу космічної обстановки
СПАЗ	— спеціалізоване програмно-алгоритмічне забезпечення
СЦ	— ситуаційний центр
ЦКС	— Центр космічних спостережень

## ВСТУП

Сучасні виклики та загрози, що постали перед нашою державою, зумовлюють необхідність набуття достатніх оборонних спроможностей відповідно до Стратегії воєнної безпеки України [15]. На глобальному рівні одним з основних аспектів воєнної безпеки є зменшення невизначеності та непередбачуваності безпекового середовища, яке, зокрема, характеризується конкуренцією держав у сфері космічних технологій та мілітаризацією навколоземного космічного простору [15]. З точки зору використання противником космічного простору у військових цілях зазначене стосується своєчасного виявлення, запобігання та нейтралізації загроз національній безпеці, основою яких є упровадження у складові сектору безпеки і оборони України сучасних інформаційних та космічних технологій, зокрема шляхом здійснення моніторингу космічного простору з метою усвідомлення можливостей ворожих іноземних держав щодо проведення космічних операцій.

В Україні, як у космічній державі, що має відповідну наземну інфраструктуру, наукові та практичні напрацювання у створенні та застосуванні космічних систем і засобів, використовує та планує запуски космічних апаратів (КА), а також здійснює заходи з урахування космічної діяльності (КД) іноземних держав, яка може певним чином вплинути на національну безпеку, оцінювання загроз у космічній сфері з метою їхнього урахування та подальшої нейтралізації або зменшення наслідків є актуальним науковим завданням. Проте на шляху підвищення ефективності реалізації цього завдання в сучасних умо-

вах є низка питань та протиріч, які потребують вирішення.

Дослідження іноземних вчених у сфері моніторингу космічного простору не можуть у повній мірі врахувати національні особливості, а результати досліджень вітчизняних науковців наразі не вирішують більшості питань та протиріч.

З точки зору оцінювання загроз у космічній сфері дослідження в основному стосуються таких основних напрямів:

- розроблення документів, що визначають понятійний апарат, який використовується в Україні та інших космічних державах світу [3, 4, 23–25];
- аналізу нормативно-правових баз іноземних держав, впливу космічної сфери на сучасну науку, економіку та науково-технічний розвиток, розроблення космічних стратегій та оцінки ефективності КД, узагальнення та систематизації сучасного досвіду КД у сфері оборони, застосування сил і засобів її здійснення [2, 6, 14, 18];
- моделей аналізу космічної обстановки (КОБ) в Україні та інших державах, їхніх аспектів та завдань [7, 20], використання даних від Системи контролю й аналізу космічної обстановки (СКАКО) в інтересах Збройних Сил (ЗС) України, зокрема відображення КОБ на відповідних командних пунктах (КП) та ситуаційних центрах (СЦ) [13, 16];
- окремих аспектів оцінки КОБ: астероїдно-кометної небезпеки, проблем «космічного сміття» та «космічного тероризму», використання космічного простору з військовою метою (фізичний вплив на КА, інформаційна протидія тощо) [2, 19, 21, 22];

- автоматизованої оцінки (автоматизованого аналізу) окремих складових КОБ, створення відповідного спеціалізованого програмно-алгоритмічного забезпечення (СПАЗ), визначення його функціоналу і вирішуваних завдань, зокрема для потреб військового оператора національної СКАКО [8, 9, 11, 12].

Оцінювання КОБ як результат моніторингу космічного простору є складним процесом та потребує наявності відповідного СПАЗ.

Враховуючи аналіз опублікованих результатів досліджень, слід зазначити, що питанню автоматизації процесу оцінки КОБ з урахуванням особливостей КД в Україні приділялося недостатньо уваги.

Таким чином, метою статті є розроблення концепції інформаційної системи для забезпечення створення СПАЗ аналізу результатів моніторингу космічного простору в інтересах складових сектору безпеки і оборони держави.

## ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У російській федерації, яка є воєнним противником України, системно застосовуються космічні засоби (КЗ), що загрожують незалежності, державному суверенітету і територіальній цілісності України [15]. Запровадження об'єднаного керівництва з підготовки та ведення всеохоплюючої оборони України реалізується, зокрема, шляхом упровадження сучасних інформаційних і космічних технологій та автоматизацією управлінських процесів у силах оборони України [15]. Стосовно врахування КД ворожих держав у складових сектору безпеки і оборони України основними питаннями та протиріччями, які потребують вирішення, є:

1. Відсутність єдиної концепції інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки держави з урахуванням особливостей виконання завдань всіма складовими сектору безпеки і оборони.

Сучасний стан розв'язання завдання врахування КД ворожих держав, перш за все, характеризується намаганням окремих державних структур створити власне СПАЗ, яке окрім проведення спеціальних розрахунків та формування

специфічних результатів включає загальні операції і процедури, що передують цьому процесу, і, як наслідок, наявні у всіх подібних СПАЗ різних суб'єктів. Зазначене породжує дублювання функціоналу таких розробок, закупівлю зайвих обчислювальних засобів для проведення відповідних розрахунків, що призводить до розпорошення зусиль наукових працівників і програмістів та неефективного використання державних коштів.

Крім того, виконання однакових завдань у різних структурах призводить до неефективного задіяння їхнього персоналу та зниження ефективності праці, а відсутність уніфікації у підходах до виконання окремих процедур (використання тактико-технічних характеристик з різних джерел, індивідуальні підходи у моделюванні режимів роботи КЗ, визначення обмежень і припущень тощо) — до отримання різних результатів, зниження достовірності вихідної інформації та, як наслідок, прийняття помилкових управлінських рішень.

2. Підвищення ефективності реалізації завдання забезпечення інформацією моніторингу космічного простору осіб, які приймають управлінські рішення, з урахуванням особливостей та сучасного стану наземної космічної інфраструктури.

Національним джерелом для оцінки загроз у космічній сфері є інформація про КОБ, що отримується за допомогою СКАКО. В її структурі функціонують різні вимірювальні засоби, що здійснюють отримання координатної та некоординатної (фотометричної) інформації про космічні об'єкти (КО) та діючі КА. Проте деякі з них є застарілими та задіяні не в повному обсязі або взагалі вмикаються періодично під час проведення робіт з модернізації, як, наприклад, радіолокаційна станція 5Н86 Західного центру радіотехнічних спостережень у м. Мукачево. Астрономічні обсерваторії, що здатні, крім координатної, отримувати некоординатну (фотометричну) інформацію, яка використовується для з'ясування низки характеристик КА (функціональне призначення, орієнтація, розмір, матеріал поверхні, наявність корисного навантаження, енергетична потужність апаратури та режи-

ми її роботи, графік сканування поверхні Землі тощо), критично обмежені часом спостереження та погодними умовами. Всі засоби національної СКАКО розміщені на території України, що обмежує можливості як за кількістю вимірювань, враховуючи швидкий проліт КО над територією нашої держави, так і унеможлиблюють спостереження за всіма КО за рахунок особливостей їхніх орбіт. Крім того, відсутня взаємна узгодженість зазначених засобів, можливість якої тривалий час досліджувалась, але так і не була практично реалізована у повному обсязі.

Таким чином, використання як інформаційних джерел лише засобів національної СКАКО є вкрай недостатнім для якісного забезпечення результатами моніторингу космічного простору складових сектору безпеки і оборони держави.

Наразі окрім даних від національної СКАКО Центром космічних спостережень (ЦКС) Національного центру управління і випробувань космічних засобів (НЦУВКЗ) Державного космічного агентства (ДКА) України та іншими державними структурами, що потребують координатної та некоординатної інформації моніторингу космічного простору для виконання завдань, використовуються дані спеціалізованих інтернет-ресурсів: [www.space-track.org/](http://www.space-track.org/), [www.celestrak.com/NORAD/elements/](http://www.celestrak.com/NORAD/elements/), [www.space.skyrocket.de](http://www.space.skyrocket.de), [www.prismnet.com/](http://www.prismnet.com/), [www.spacelaunchschedule.com/launch-schedule/](http://www.spacelaunchschedule.com/launch-schedule/), [www.space.com/32286-space-calendar.html](http://www.space.com/32286-space-calendar.html), [www.spaceflightnow.com/launch-schedule/](http://www.spaceflightnow.com/launch-schedule/), [www.spacelaunchreport.com/](http://www.spacelaunchreport.com/), [www.lk.astronautilus.pl](http://www.lk.astronautilus.pl), [www.planet4589.org/space/log/satcat.html](http://www.planet4589.org/space/log/satcat.html), [www.avianews.info/grafik-zapuskov/](http://www.avianews.info/grafik-zapuskov/) та ін.

З 24.08.2021 року перелік додаткових джерел інформації моніторингу космічного простору розширився засобами Космічного Командування ЗС США (USSPACECOM), відповідні дані з яких можуть отримуватися згідно з Меморандумом про взаєморозуміння між Міністерством оборони Сполучених Штатів Америки та Державним космічним агентством України щодо співпраці у сфері безпеки космічних польотів і надання послуг та інформації з космічної ситуаційної обізнаності [10]. Відповідно до Меморандуму ДКА України може запитувати послуги

та інформацію з космічної ситуаційної обізнаності (КСО) від USSPACECOM стосовно оцінки зближення КО, підтримки запуску, підтримки сходження з орбіти і входження до атмосфери, підтримки з утилізації/завершення терміну служби КА, запобігання зіткнень, розв'язання аномалій, дослідження електромагнітних завад тощо (за окремими запитами та погодженням USSPACECOM) [10].

3. Наявність у науковому середовищі певних розбіжностей в розумінні термінології у космічній сфері.

У контексті дослідження основним терміном є КСО. За посиланням на стандарти НАТО цей термін трактується стосовно суто космічних операцій, зокрема щодо безпеки руху активних КА шляхом запобігання їхнього зіткнення з іншими КО [23, 24]. Проте у військовому стандарті, розміщеному на закритій сторінці інтернету, КСО розглядається ширше: її основою є спостереження, супроводження та ідентифікація КО, моніторинг зовнішніх умов у космічному просторі, розвідувальні дані щодо космічних можливостей противника та загрози використання ним КЗ [4]. Зазначене породжує низку непорозумінь під час теоретичних досліджень та їхньої практичної реалізації.

4. Наявність обмежень, пов'язаних із необхідністю обробки даних та створення звітно-інформаційних документів (ЗІД), що мають обмежену доступу (містять службову інформацію).

Відомості, що мають обмеження доступу, використовуються (отримуються чи з'являються) під час виконання спеціальних завдань. Такими завданнями можуть бути:

- виявлення фактів інспекції та фізичного впливу на КА;
- оповіщення про прольоти розвідувальних КА ворожих держав;
- інформаційне забезпечення протидії іноземним технічним розвідкам, що проводяться з космосу тощо.

Очевидно, що поєднання постійного доступу СПАЗ до спеціалізованих інтернет-ресурсів для забезпечення автоматичного/автоматизованого пошуку і оновлення даних та виконання спеціальних завдань у складових сектору безпеки і

оборони держави, під час яких використовується/отримується інформація з обмеженим доступом, є неприйнятним.

У роботі [11] було подано функціональну модель інформаційної системи забезпечення КСО складових сектору безпеки і оборони держави. Проте її побудову здійснено без врахування апаратних обмежень, що стосуються розділення інформації на відкриту і службову, та без забезпечення уникнення дублювання функціоналу програмного забезпечення (ПЗ) оцінки КОБ в різних державних структурах.

Таким чином, виникає необхідність розділення складових СПАЗ, що використовується для оброблення результатів моніторингу космічного простору на «відкриту» (базову) частину, яка за своїм функціоналом однакова для виконання всіх загальних завдань з оцінки КОБ і здебільшого призначена для оброблення вхідних даних від різних джерел (зокрема зі спеціалізованих інтернет-ресурсів) та моделювання руху КО (КА), та «закриту» (спеціальну) частину, призначену для виконання спеціальних завдань (вхідні дані, хід розв'язування та/або результати яких можуть містити інформацію з обмеженим доступом).

5. Фактична відсутність сучасної бази даних (БД) КО (головного каталогу КО).

Одним з основних завдань НЦУВКЗ щодо контролю та аналізу КОБ є ведення каталогу КО [5]. Проте відкритий доступ до вказаного каталогу на сайті НЦУВКЗ не організовано. Крім того, наявний каталог є обмеженим, що зумовлено як недостатньою кількістю та якістю вітчизняних вимірвальних засобів СКАКО, так і відсутністю сучасного СПАЗ. Наразі СПАЗ, що використовується у національній СКАКО, є застарілим, не відповідає сучасним вимогам, потребам споживачів (зокрема державних органів сектору безпеки і оборони) та потребує удосконалення.

Використання результатів моніторингу космічного простору під час часткового вирішення загальних та спеціальних завдань вітчизняними структурами сектору безпеки і оборони також можливе за допомогою наявних програмно-алгоритмічних комплексів та/або ПЗ, що є у інтернеті. Характеристики основних з них, розроблених іноземними фахівцями, надано в табл. 1.

Проте наявне у вільному доступі ПЗ має низку недоліків та особливостей:

- наявність лише демонстраційних версій (для окремих зразків ПЗ);
- недоступність програмного коду для аналізу та редагування;
- неможливість розрахунку часових інтервалів спостереження КА об'єктів (районів) на поверхні Землі (для більшості ПЗ);
- неможливість використання як вхідних даних інформації з обмеженим доступом;
- недостатні можливості з візуалізації КОБ (для більшості ПЗ);
- потреба в оновленні початкових умов (ПУ) для розрахунку руху КО лише з глобальної інформаційної мережі інтернет (для більшості ПЗ).

Таким чином, наявне ПЗ не у повній мірі відповідає потребам структур сектору безпеки і оборони держави, а необхідність забезпечення результатами моніторингу космічного простору осіб, які приймають рішення, вимагає розробки вітчизняного СПАЗ, що має відкритий програмний код та можливість оперативного вдосконалення відповідно до сучасних потреб визначених державних органів.

Виходячи з викладеного, з точки зору побудови концепції інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору доцільним є розділення системи на базову та спеціалізовані підсистеми та відповідно функціоналу СПАЗ оброблення результатів моніторингу космічного простору — на відкриту та спеціальні частини. Це, перш за все, забезпечить безперервність і автоматизацію збору необхідних даних з відкритих джерел та унеможливить витік конфіденційної, службової чи таємної інформації, що циркулюватиме виключно у спеціальних частинах ПЗ. З іншого боку, функціонал відкритої частини СПАЗ є однаковий для всіх складових сектору безпеки і оборони та має забезпечувати наявність уніфікованої вхідної інформації для його спеціальних частин.

З використанням сучасних принципів SADT-методології та відомих підходів до побудови функціональних моделей складних інформаційних систем [17] розроблено функціональну модель інформаційної системи для забезпечення

Таблиця 1. Характеристики основних програмно-алгоритмічних комплексів розрахунків положення та параметрів руху КА\*

Найменування програмного забезпечення	Розробник (країна)	Організація (фізична особа), яка використовує програмне забезпечення	Тип поширення	Стан розробки	Характеристика								
					формат вхідних даних	формат вихідних даних	моделювання (авто-пітми) розрахунку КА	відображення поточних параметрів КА	відображення траєкторії КА	побудова 3D-моделі	режим моделювання	можливість обміну інформацією	
WXTrack	Програміст Д. Тейлор (Шотландія)	Користувачі	УБ	Триває	TLE	Графічний, текстовий	SGP4/SDP4	+	+	+	+	+	+
Orbitron	Програміст С. Стофф (Польща)	Користувачі	Б	Зупинена	TLE	Графічний, текстовий	SGP4/SDP4	+	+	—	+	+	+
WinOrbit	Програміст К. Грегори (США)	Користувачі	Б	Зупинена	TLE	Графічний, текстовий	SGP4/SDP4	+	+	—	+	+	—
JSatTrak	Програміст Ш. Гано (США)	Користувачі	Б	Триває	TLE, DAT, TXT	Графічний, текстовий	SGP4/SDP4	+	+	+	+	+	+
AGI STK	Компанія "Analytical Graphics, Inc." (США)	Користувачі та спеціалісти	УБ	Триває	TCE, TLE	Графічний, текстовий	SGP4/SDP4/SGP8/SDP8	+	+	+	+	+	+
Collision Risk Assessment Tool	European Space Agency	European Space Agency	УБ	н/д	TLE	Графічний, текстовий	SGP4/SDP4	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
SSA Software Suite	Компанія "Analytical Graphics, Inc." (США)	Об'єднаний центр космічних операцій США (JSPOC)	3	Не може бути перевірено експериментальним шляхом у зв'язку з обмеженим доступом									
JMS UDOP Authoring Tool	Об'єднаний центр космічних операцій США (JSPOC)	Об'єднаний центр космічних операцій США (JSPOC)	3										
Testbed Environment for SSA	Ліверморська національна лабораторія ім. Є. Лоуренса (LLNL)	Система контролю космічного простору США (SSN)	3										

Примітка. УБ — умовно безкоштовне, Б — безкоштовне, 3 — закриті для доступу, н/д — немає даних, TLE — Two Line Elements, DAT — Data Files, TXT — Text Files, TCE — Two Line Elements is an ASCII text file





Рис. 1. Контекстна діаграма інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки

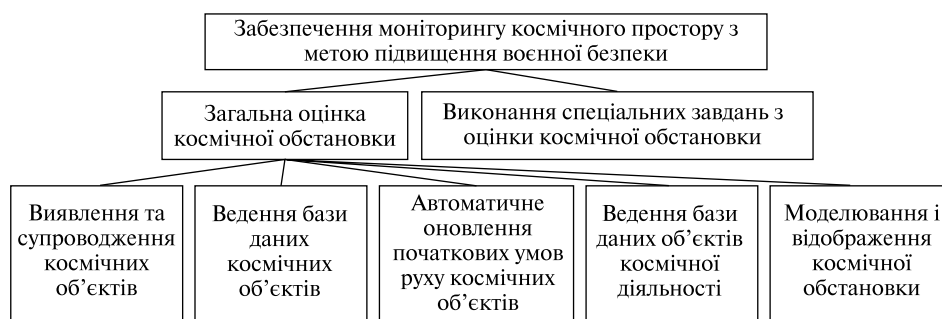


Рис. 2. Діаграма дерева вузлів функціональної моделі інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки

моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки, контекстна діаграма якої наведена на рис. 1.

На вхід системи мають надходити траєкторні виміри від вітчизняних засобів СКАКО, що перебувають у складі НЦУВКЗ ДКА України, астрономічних обсерваторій Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України тощо, а також координатної інформації (КІ) та некоординатної інформації (НКІ) про КО (КА) (переважно зі спеціалізованих інтернет-ресурсів).

Забезпечення виконання зазначеного завдання здійснюється за допомогою загальнодоступного спеціалізованого ПЗ для формування ЗІД та СПАЗ (спеціалізованих програмних компонентів), що забезпечує ведення баз даних, моделювання та відображення КОБ.

Подальша функціональна декомпозиція здійснюється відповідно до дерева вузлів функціональної моделі інформаційної системи (рис. 2).

Основна функція інформаційної системи поділяється на дві підфункції першого рівня: загальна оцінка КОБ та виконання спеціальних завдань з оцінки КОБ (рис. 3).

Блок «Виконання спеціальних завдань з оцінки космічної обстановки» стосується функціоналу частин СПАЗ державних структур — складових сектору безпеки і оборони, що використовується для розв'язання спеціальних задач, зокрема з використанням (отриманням) інформації з обмеженим доступом.

Вирішення завдання «Загальна оцінка космічної обстановки» (блок відкритої частини СПАЗ) вимагає, перш за все, володіння інформацією про орбітальні параметри руху КА, що виводяться та функціонують на орбітах, тактико-технічні характеристики їхніх бортових інформаційних комплексів, орбітальну побудову космічних систем у цілому та іншими даними щодо космічної інфраструктури та діяльності держав світу. Основними етапами цієї роботи є

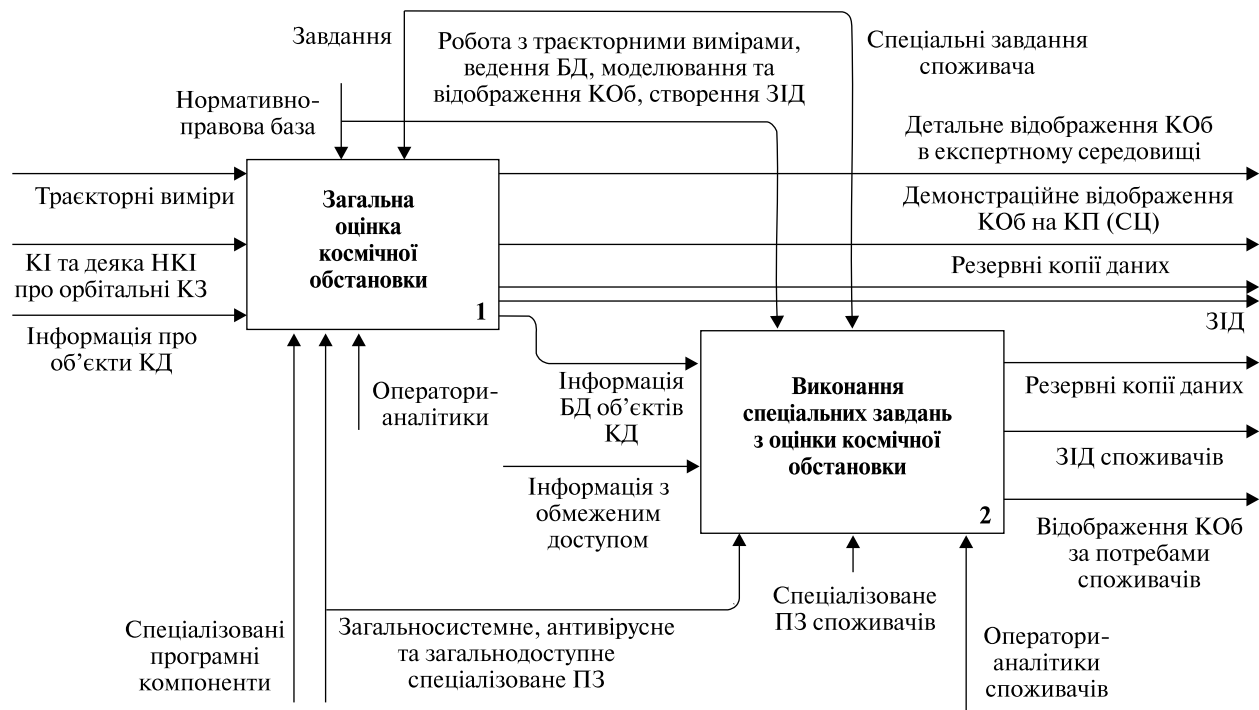


Рис. 3. Перший рівень функціональної декомпозиції інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки

ведення необхідних баз даних, здійснення відповідних оперативних-тактичних та балістичних розрахунків, візуалізація КОБ, створення формалізованих ЗІД, архівація ПУ та результатів моделювання (рис. 4).

Практична реалізація викладених теоретичних підходів до підфункції «Загальна оцінка космічної обстановки» полягає у забезпеченні виконання завдань за допомогою програмно-технічного комплексу в складі трьох програмних компонентів:

- виявлення та супровід КО;
- роботи з БД об'єктів КД (з окремою складовою автоматичного завантаження (оновлення) КІ та визначеної НКІ про КО (КА) зі спеціалізованих інтернет-ресурсів);
- моделювання і відображення КОБ (рис. 5).

Функціонал програмних компонентів зумовлений потребами споживачів у використанні засобів спостереження космічного простору, отриманні інформації щодо загальної оцінки КОБ, автоматизованої її обробки та відображення, да-

них про об'єкти космічної інфраструктури, створенні необхідних аналітичних документів тощо.

1. Компонент виявлення та супроводження КО має забезпечувати роботу з траєкторними вимірами від засобів спостереження та координатною і некоординатною інформацією про КО, ведення БД КО та головного каталогу КО, прогнозування параметрів руху КО, формування цілевказівок для наземних засобів спостереження та уточненого вектора параметрів руху КО, виявлення за результатами траєкторних вимірів нових КО, формування ПУ руху КО (КА) для подальшого моделювання КОБ, автоматизоване створення ЗІД.

Як основні завдання компонента виявлення та супроводження КО можна визначити:

- збереження, відображення та редагування траєкторних вимірів від засобів спостереження, їхніх характеристик, координатної та некоординатної інформації про КО;
- ідентифікація траєкторних вимірів за каталогом пріоритетних КО;

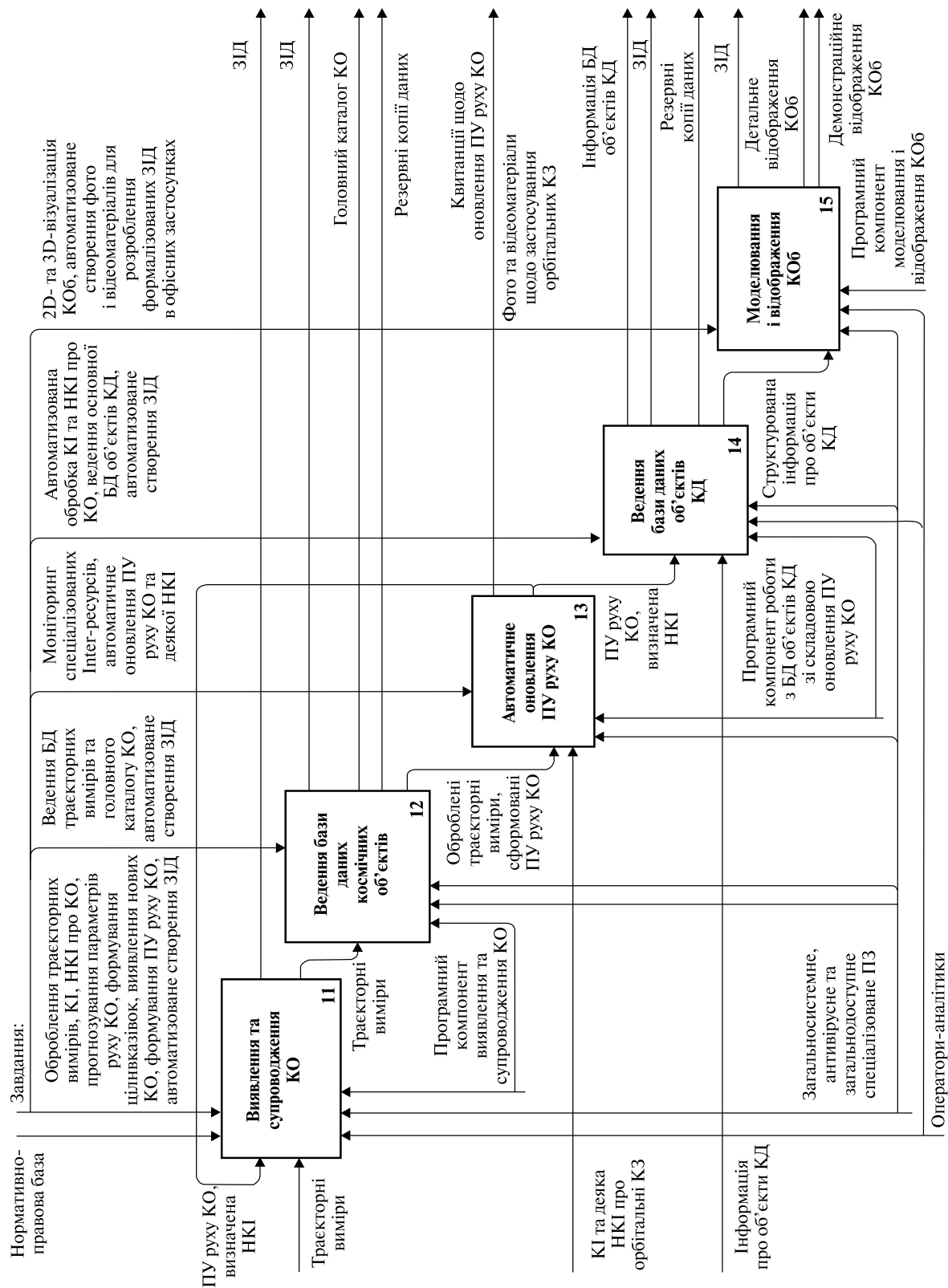


Рис. 4. Декомпозиція підфункції «Загальна оцінка космічної обстановки»

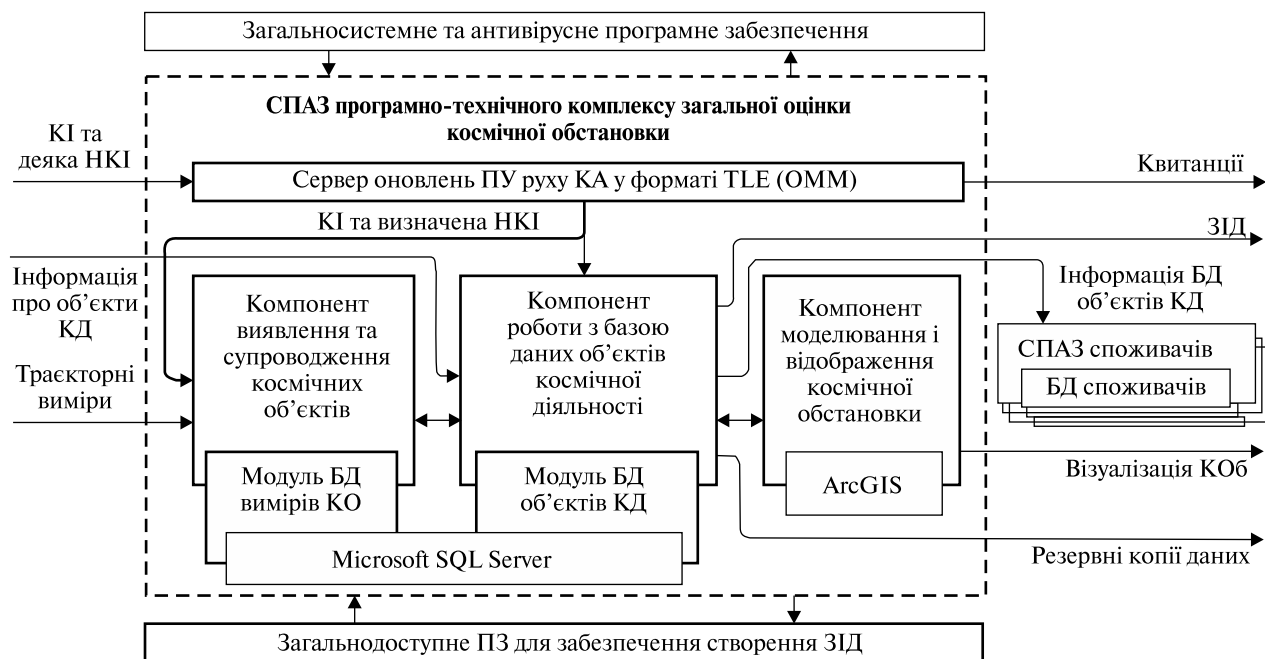


Рис. 5. Структурна схема програмно-технічного комплексу загальної оцінки космічної обстановки

- уточнення ПУ руху КО за ідентифікованими траєкторними вимірами за умови накопичення необхідного об'єму вимірювальної інформації;
- прогнозування параметрів руху КО;
- формування цілевказівок для наземних засобів спостереження;
- формування уточненого вектора параметрів руху КО з можливістю представлення даних у форматах Orbit Mean-Elements Message (ОММ) та Two Line Element (TLE);
- виявлення (за результатами траєкторних вимірів) КО, інформація про які відсутня у відкритих інтернет-ресурсах;
- планування супроводження визначених КО;
- автоматизоване створення ЗІД в офісних застосунках із подальшим їхнім збереженням та можливістю виведення на друк.

2. Компонент роботи з БД об'єктів КД має забезпечувати автоматичне завантаження (оновлення) координатної та визначеної некоординатної інформації про КО (КА) з основних спеціалізованих незалежних інтернет-ресурсів (за допомогою окремої складової програмного компонента та за умови попереднього створення облікових записів у визначених спеціалізованих

інтернет-ресурсах), автоматизовану її обробку, ведення БД об'єктів КД, автоматизоване створення формалізованих ЗІД.

Як основні завдання компонента роботи з БД об'єктів КД можна визначити:

- створення формалізованих запитів для отримання координатної та некоординатної інформації про КО (КА) від ЦКС НЦУВКЗ ДКА України;
- автоматичне завантаження (оновлення) КІ про КО (КА) від ЦКС НЦУВКЗ ДКА України;
- автоматичне завантаження (оновлення) КІ та визначеної НКІ про КО (КА) з основних спеціалізованих незалежних інтернет-ресурсів;
- автоматичне завантаження, оброблення та використання для створення ЗІД даних Стратегічного командування ЗС США у форматах ОММ та TLE;
- автоматичне завантаження НКІ про КА з інтернет-ресурсів шляхом застосування парсерів;
- ведення БД об'єктів КД з інформацією про космічні системи, їхні класи, КО (КА), ПУ їхнього руху у форматах TLE та ОММ, ракетно-носії, полігони запуску (космодроми), наземну космічну інфраструктуру, космічні держави (організації), із забезпеченням необхідного пошуку,

сортування, фільтрації та використання інформації БД об'єктів КД;

- адміністрування БД об'єктів КД щодо створення резервних копій та відновлення даних, дефрагментації таблиць даних, перевірки на наявність помилок тощо;

- автоматизоване відслідковування змін орбітальних параметрів визначених діючих КА з візуальним (звуковим) оповіщенням оператора-аналітика, створення таблиць маневрів та корекцій орбіт визначених КА;

- автоматизоване виявлення ознак імовірних інспекцій КА на геостаціонарній орбіті визначеними КА;

- автоматизована побудова згрупованих за визначеними оператором КО (КА) графіків змін орбітальних параметрів за довільний період часу (обмежений наявними у БД об'єктів КД початковими умовами руху КО (КА));

- автоматизоване створення формалізованих ЗІД (формулярів на космічні системи, КО (КА), ракети-носії, полігони запуску (космодроми), наземні станції прийому спеціальної інформації з бортів КА та управління КА) в офісних застосунках, їхнє збереження і виведення на друк.

3. Компонент моделювання і відображення КОБ має забезпечувати 2D- та 3D-візуалізацію КОБ в аналітичному (детальне відображення КОБ у експертному середовищі для забезпечення формулювання аналітичних висновків щодо застосування космічних систем і засобів та визначення загроз у сфері національної безпеки та оборони держави) та демонстраційному (інтерактивне відображення КОБ на КП (СЦ) для забезпечення КСО осіб, які приймають рішення) режимах, автоматизоване створення фото та відеоматеріалів для розроблення формалізованих ЗІД.

Основними завданнями компонента моделювання і відображення КОБ можна визначити:

- автоматичне завантаження, оброблення і використання ПУ руху КО (КА) у форматах ОММ та TLE для відображення КОБ у 2D- і 3D-режимах;

- візуалізація КОБ у 2D- та 3D-режимах в експертному середовищі (побудова зон дії КА розвідки та дистанційного зондування Землі (смуг розвідки (захоплення) з урахуванням гаранто-

ваної просторової розрізненності матеріалів космічного знімання [1]), відображення можливостей КА виявлення стартів балістичних ракет і ядерних вибухів, КА зв'язку, навігації, метеорологічних КА; побудова орбіт КА у 3D-режимі з урахуванням обертання Землі (площин орбіт КА); побудова карт з відображенням інтенсивності ведення спостереження (розвідки) обраних ділянок місцевості визначеним орбітальним угрупованням КА розвідки та дистанційного зондування Землі за довільний проміжок часу для визначення потенційних районів підвищеної уваги; відображення прольотів КА у зонах дії наземних засобів) з метою забезпечення формулювання аналітичних висновків щодо застосування космічних систем і засобів та визначення загроз у сфері національної безпеки та оборони держави;

- інтерактивна 2D- та 3D-візуалізація КОБ на КП (СЦ) за розробленими сценаріями (поточне (on-line) відображення можливостей застосування КА різного призначення над територією України та іншими районами земної поверхні; поточне (on-line) відображення можливостей застосування КА розвідки та дистанційного зондування Землі щодо спостереження обраних ділянок місцевості (довільних районів) земної поверхні з можливістю урахування (відображення) метеорологічної обстановки) для забезпечення КСО осіб, які приймають рішення;

- автоматизоване створення фото та відеоматеріалів для їхньої інтеграції у ЗІД інших компонентів.

Таким чином, запропоновані до розроблення програмні компоненти, що мають використовуватися для вирішення завдань загальної оцінки КОБ, повинні бути створені з урахуванням вимог щодо забезпечення можливості застосування результатів моніторингу космічного простору для підвищення воєнної безпеки, а саме:

- забезпечення оперативного зручного автоматичного, автоматизованого та ручного оновлення інформації в тематичних базах даних;

- наявність зручного інтерфейсу роботи з базами даних, забезпечення коригування й архівації (резервування) інформації БД;

- якісне 2D- та 3D-відображення КОБ та характеристик і можливостей наземної космічної

інфраструктури на різних картографічних основах у різних масштабах в ретроспективному, онлайн- та прогнозному режимах;

- можливість створення необхідних орбітальних угруповань КА за різними критеріями відбору з подальшим моделюванням руху КА з урахуванням можливостей їхніх бортових інформаційних комплексів, відображенням орбіт (трас) КА тощо;

- забезпечення аналізу орбітальних параметрів КО (КА);

- забезпечення можливості створення якісних ЗІД та виведення їх на друк;

- автоматичне створення архіву необхідних вхідних та вихідних даних (КІ та НКІ);

- забезпечення можливості інтеграції фото та відеоматеріалів у формалізовані ЗІД;

- розмежування доступу та логування роботи користувачів.

## ВИСНОВКИ

Основою концепції інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки є роз-

роблення базової (відкритої) та спеціалізованих (адапованих до потреб визначених структур сектору безпеки і оборони держави) підсистем з розподілом між ними загальних та спеціальних завдань з оцінки КОБ.

Структуру програмно-алгоритмічного забезпечення загальної оцінки КОБ базової (відкритої) підсистеми доцільно представити у складі трьох основних програмних компонентів: виявлення та супроводження КО, роботи з БД об'єктів КД (з окремою складовою автоматичного завантаження (оновлення) КІ та визначеної НКІ про КО (КА) зі спеціалізованих інтернет-ресурсів) та моделювання і відображення КОБ.

Подальшими шляхами дослідження можуть бути: конкретизація функціоналу компонентів програмно-алгоритмічного забезпечення загальної оцінки КОБ, обґрунтування і розроблення структур баз даних КО та об'єктів КД, створення відповідних програмно-технічних комплексів та перевірка адекватності використаних у них математичних моделей, а також питання захисту інформації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Беспалко І. А., Кравчик В. П., Пекарєв Д. В. Визначення максимального кута відхилення знімальної апаратури космічного апарата дистанційного зондування Землі при забезпеченні необхідної просторової розрізненості матеріалів космічного знімання. *Техн. інженерія*. 2019. № 2 (84). С. 61–69.
2. Випорханюк Д. М., Ковбасюк С. В. Основи космічної ситуаційної обізнаності (Space Situational Awareness, SSA). Іноземний і вітчизняний досвід космічної діяльності у сфері оборони: Монографія. Житомир: ЖВІ, 2018. 532 с.
3. Военный энциклопедический словарь: в 2 т. Редкол.: А. П. Горкин, В. А. Золотарев, В. М. Карев и др. М.: Большая Российская энциклопедия, «РИПОЛ КЛАССИК», 2001. Т. 1. 848 с.; Т. 2. 816 с.
4. ВСТ 01.048.001–2019 (01). Видання 1. Космічна діяльність у сфері оборони. Терміни та визначення. Київ, 2019. 43 с.
5. Завдання Національного центру управління і випробувань космічних засобів щодо контролю та аналізу космічної обстановки. URL: [https://spacelcenter.gov.ua/моніторинг\\_космічного\\_простору](https://spacelcenter.gov.ua/моніторинг_космічного_простору) (дата звернення 18.03.2021).
6. Іщенко Д. А., Пекарєв Д. В., Кондратюк С. А. Прогностичний аналіз космічної діяльності іноземних держав. *Зб. наук. праць ЖВІРЕ*. 2006. Вип. 10. С. 72–81.
7. Калюта А. Н. Глобальный мониторинг космической обстановки — важнейшее направление обеспечения военной безопасности Российской Федерации в воздушно-космической сфере. *Военная мысль*. 2017. № 9. С. 5–11.
8. Ковбасюк С. В., Пекарєв Д. В., Беспалко І. А. Принципи організаційної побудови та вимоги до функціональності систем оповіщення спеціального призначення. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2017. № 2 (29). С. 121–129.
9. Машков О. А., Іщенко Д. А., Пекарєв Д. В., Михалевич В. Е. Обґрунтування структури автоматизованого програмно-алгоритмічного комплексу прогнозування та виявлення кризових ситуацій за результатами аналізу космічної обстановки. *Моделювання та інформаційні технології*. 2004. Вип. 28. С. 35–42.
10. Меморандум про взаєморозуміння між Міністерством оборони Сполучених Штатів Америки та Державним космічним агентством України щодо співпраці у сфері безпеки космічних польотів і надання послуг та інформації з космічної ситуаційної обізнаності. 24 серпня 2021 р. 9 с.

11. Пекарев Д. В. Функціональна модель інформаційної системи забезпечення космічної ситуаційної обізнаності складових сектору безпеки і оборони держави. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2019. № 1 (34). С. 83—94.
12. Пекарев Д. В. Концептуальний підхід до врахування загроз у космічній сфері в інтересах безпеки та оборони держави. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2019. № 2 (35). С. 55—64.
13. Пекарев Д. В., Савчук А. В., Снецар В. І., Пашковський В. В., Давіденко С. В. Виявлення ознак підготовки орбітальних угруповань космічних апаратів до забезпечення бойових дій військ (сил) іноземних держав (на основі аналізу даних про космічну обстановку). *Військово-техн. зб. Акад. сухопутних військ*. 2011. № 1 (4). С. 135—139.
14. Пермяков О. Ю., Солонніков В. Г., Прибілев Ю. Б. та ін. *Використання інформаційних технологій та застосування космічних систем в інтересах військ (сил)*: Підручник. Київ: НУОУ, 2014. 208 с.
15. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України 25 березня 2021 року «Про Стратегію воєнної безпеки України»: Указ Президента України від 25.03.2021 № 121/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/121/2021#n9> (дата звернення: 18.03.2021).
16. Резников Ю. В., Кулагин К. К., Поляков А. В. Рекомендации по использованию системы контроля и анализа космической обстановки в интересах Вооруженных Сил Украины. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2014. № 3 (16). С. 161—163.
17. Сорока К. О. *Основи теорії систем і системного аналізу*: навч. посібн. Харків: Харків. Нац. акад. міськ. господарства, 2004. 291 с.
18. Федоров О. П. Космічна діяльність: підходи до розробки стратегії Why space for Ukraine?: Монографія. Київ: Наук. думка, 2019. 207 с. URL: <http://a-kosmos.com.ua/wp-content/uploads/2019/11/kniga-fedorov-2019.pdf> (дата звернення: 18.03.2021).
19. Фененко А. В. Конкуренция в космосе и международная безопасность. *Междунар. процессы*. 2008. 6, № 3. С. 26—41.
20. Хорольский П. Г. Концептуальная модель анализа космической обстановки. *Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій*. 2008. 12. С. 95—112.
21. Шкурат І. В. Глобальний тероризм: методичні підходи до вивчення. *Державне управління: теорія і практика*. 2005. № 2. URL: <http://www.academy.gov.ua/ej/ej2/txts/polprav/05sivmpv.pdf> (дата звернення: 18.03.2021).
22. Шустов Б. М., Рыхлова Л. В., Кулешов Ю. П. и др. Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты. *Астрон. вестник*. 2013. 47, № 4. С. 327—340.
23. DOD Dictionary of Military and Associated Terms. As of November 2021. 360 p. URL: [www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/pubs/dictionary.pdf](http://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/pubs/dictionary.pdf) (дата звернення: 18.03.2021).
24. Joint Publication 3-14. Space Operations. 10 April 2018. Incorporating Change 1. 26 October 2020. 96 p. URL: [https://irp.fas.org/doddir/dod/jp3\\_14.pdf](https://irp.fas.org/doddir/dod/jp3_14.pdf) (дата звернення: 18.03.2021).
25. NATO Standard AJP-3.3. Allied joint doctrine for air and space operations. Edition B. Version 1. Published by the NATO Standardization Office, April 2016. URL: [www.japcc.org](http://www.japcc.org) (дата звернення: 18.03.2021).

## REFERENCES

1. Bepalko I. A., Kravchuk V.P., Pekariev D. V. (2019). Determination of the maximum angle of deviation of the imaging equipment of the remote sensing satellite while ensuring the required spatial resolution of space imaging materials. *Techn. Eng.*, № 2 (84), 61—69 [in Ukrainian].
2. Viporkhaniuk D. M., Kovbasiuk S. V. (2018). *Basics of Space Situational Awareness. Foreign and domestic experience of space activities in security sector*: Monograph. Publishing by O. O. Evenok, 532 p. [in Ukrainian].
3. *Military encyclopedic dictionary*: In 2 vol. (2001). Ed. board: A. P. Gorkin, V. A. Zolotarev, V. M. Karev and others. M.: Great Russian Encyclopedia, “RIPOL CLASSIC”, Vol. 1, 848 p.; Vol. 2, 816 p. [in Russian].
4. Military standard VST 01.048.001 — 2019 (01) Space activities in defense. Terms and definitions. Edition 1. Kyiv, 2019. 43 p. [in Ukrainian].
5. The tasks of the National space facilities control and test center to monitoring and analysis of space situation. URL: <https://spacecenter.gov.ua/monitoring-kosmichnoho-prostoru?lang=en> (Last accessed: 18.03.2021) [in Ukrainian].
6. Ishchenko D. A., Pekariev D. V., Kondratyuk S. A. (2006). Prognostic analysis of space activity of foreign states. *Collection of scientific works of ZhVIRE*, № 10, 72—81 [in Ukrainian].
7. Kaliuta A. N. (2017). Global monitoring of the space situation is the most important direction in ensuring the military security of the Russian Federation in the aerospace sphere. *Military mission*, № 9, 5—11 [in Russian].
8. Kovbasjuk S. V., Pekariev D. V., Bepalko I. A. (2017). The principles of organizational construction and functionality requirements of warning system of special purpose. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, № 2 (29), 121—129 [in Ukrainian].

9. Mashkov O. A., Pekariev D. V., Mikhalevich V. E. (2004). Substantiation of the structure of the automated program-algorithmic complex of forecasting and detection of crisis situations by the results of the analysis of the space situation. *Modeling and information technologies*, № 28, 35–42 [in Ukrainian].
10. Memorandum of Understanding between the United States Department of Defense and the State Space Agency of Ukraine on cooperation in space flight safety and the provision of space situational awareness services and information (2021). 9 p. [in Ukrainian].
11. Pekariev D. V. (2019). Functional model of the information system for providing space situational awareness of the state security and defense sector components. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, № 1 (34), 83–94 [in Ukrainian].
12. Pekariev D. V. (2019). The conceptual approach to taking into account threats in the space sphere in the interests of security and defense of the state. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, № 2 (35), 55–64 [in Ukrainian].
13. Pekariev D. V., Savchuk A. V., Snetsar V. I., Pashkovsky V. V., Davidenko S. V. (2011). Identification of signs of preparation of orbital groups of spacecraft to ensure combat operations of troops (forces) of foreign states” (based on the analysis of data on the space situation). *Military-technical collection Academy of Land Forces*, № 1 (4), 135–139 [in Ukrainian].
14. Permyakov O. Yu., Solonnikov V. G., Pribylyev Yu. B. at all. (2014). *Using information technology and space systems in the interests of army (forces)*: textbook. Kyiv: Publ. by the National Defence University of Ukraine, 208 p. [in Ukrainian].
15. On the decision of The National Security and Defense Council of Ukraine 25 March 2021 «On the Military Security Strategy of Ukraine»: Decree of the President of Ukraine 25.03.2021 № 121/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/121/2021#n9> (Last accessed: 18.03.2021) [in Ukrainian].
16. Reznikov U. V., Kulagin K. K., Polyakov A. V. (2014). The recommendations on the use of a system of control and analysis of the space situation in the interests of the Ukrainian Armed Forces. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, № 3(16), 161–163 [in Ukrainian].
17. Soroka K. O. (2004). *Fundamentals of systems theory and system analysis: Tutorial*. Kharkiv: Publ. by Kharkiv National Academy of Municipal Economy, 291 p. [in Ukrainian].
18. Fedorov O. P. (2019). *Space activities: approaches to developing a strategy Why space for Ukraine?*: Monograph. Kyiv: Naukova dumka, 207 p. URL: <http://a-kosmos.com.ua/wp-content/uploads/2019/11/kniga-fedorov-2019.pdf> (Last accessed: 18.03.2021) [in Ukrainian].
19. Fenenko A. V. (2008). Space competition and international security. *Int. processes*, 6, № 3, 26–41 [in Russian].
20. Khorolsky P. G. (2008). Conceptual model of the space situation analysis. *Actual problems of automation and information technologies*, 12, 95–112 [in Russian].
21. Shkurat I. V. (2005). Global Terrorism: Methodological Approaches to Study. *Public Administration: Theory and Practice*, № 2. URL: <http://www.academy.gov.ua/ej/ej2/txts/polprav/05sivmpv.pdf> (Last accessed: 18.03.2021) [in Ukrainian].
22. Shustov B. M., Rykhlova L. V., Kuleshov Yu. P. at all. (2013). The concept of a system of countering space threats: astronomical aspects. *Astron. Gazette*, 47, № 4, 327–340 [in Russian].
23. DOD Dictionary of Military and Associated Terms. As of November 2021, 360 p. URL: [www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/pubs/dictionary.pdf](http://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/pubs/dictionary.pdf) (Last accessed: 18.03.2021) [in English].
24. Joint Publication 3-14. Space Operations. 10 April 2018. Incorporating Change 1. 26 October 2020. 96 p. URL: [https://irp.fas.org/doddir/dod/jp3\\_14.pdf](https://irp.fas.org/doddir/dod/jp3_14.pdf) (Last accessed: 18.03.2021) [in English].
25. NATO Standard AJP-3.3, Allied joint doctrine for air and space operations. Edition B. Version 1. Published by the NATO Standardization Office, April 2016. URL: [www.japcc.org](http://www.japcc.org). (Last accessed: 18.03.2021) [in English].

Стаття надійшла до редакції 18.03.2021

Після доопрацювання 18.03.2022

Прийнято до друку 12.05.2022

Received 18.03.2021

Revised 18.03.2022

Accepted 12.05.2022



*I. A. Bepalko*<sup>1</sup>, researcher of scientific center, Candidate of Technical Sciences

E-mail: biran198311@gmail.com

*L. D. Hrekov*<sup>2</sup>, scientific consultant “SPE “Vector”, Doctor of Technical Sciences, Senior researcher, Laureate of the State Prize in Science and Technology

E-mail: leonid.grekov@gmail.com

*D. V. Pekariev*<sup>3</sup>, chief researcher, Candidate of Technical Sciences, Senior researcher

E-mail: dmvlpek@ukr.net

*D. L. Fedorchuk*<sup>1</sup>, chief of scientific center, Candidate of Technical Sciences

E-mail: fedor4uk.d@gmail.com

<sup>1</sup> Zhytomyr Military Institute named by SP Korolyova

22, Mira Ave., Zhytomyr, 10004 Ukraine

<sup>2</sup> Limited Liability Company “Scientific and Productive Enterprise “Vector”

63, Zvirynetska st., Kyiv, 01014 Ukraine

<sup>3</sup> Section for Applied Problems National Academy of Science of Ukraine

54, Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01030

#### THE CONCEPT OF AN INFORMATION SYSTEM TO PROVIDE THE MONITORING OF SPACE IN ORDER TO INCREASE MILITARY SECURITY

The concept of an information system to provide the monitoring of space in order to increase military security is proposed with the accounted-for peculiarities of solving problems by the domestic structures of the security and defense sector. The concept is based on the separation of the functionality of open and specialized parts of the algorithm and software support for analyzing the space situation with the attainment of their compatibility.

The results of the capability analysis of the publicly available software, which can be used for the evaluation of the space situation as an additional means, are presented. The functional model of the information system to provide the monitoring of space was developed, and a decomposition of its main functional block — a general assessment of the space situation has been carried out.

The main software components of the algorithm and software support for the overall estimating of the space situation are determined: detection and monitoring of space objects, maintenance of the database of space objects, modeling and display of the space situation, and their main tasks are outlined. The structural scheme of the software and hardware complex of the general estimation of space situation is developed.

Further ways of research are offered: concretization of the functionality of the components of the algorithms and software support of the general estimation of the space situation, substantiation and development of databases’ structures of space objects and objects of space activity, creation of the relevant software and hardware complexes and check of the adequacy of the used mathematical models, as well as issues of information security.

**Keywords:** monitoring of space, estimation of the space situation, space situational awareness, space activities, orbital spacecraft, specialized algorithms and software support.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.04.018>  
UDC 629.78

**A. V. PIROZHENKO**<sup>1</sup>, Leading Researcher, Doctor of Physical and Mathematical Sciences  
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5240-8604>  
E-mail: alex.pirozhenko@ukr.net

**A. I. MASLOVA**<sup>1</sup>, Senior Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences  
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2115-0847>  
E-mail: maslova.a.i@ukr.net

**V. V. VASYLIEV**<sup>2</sup>, Candidate of Technical Sciences  
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5211-9164>  
E-mail: vladimir.vasiliev@eos.com

<sup>1</sup> Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine  
15 Leshko-Popel St., Dnipro, 49005 Ukraine

<sup>2</sup> Earth Observing System Data Analytics  
1906 El Camino Real, Suite 201, Menlo Park, CA 94027, USA

## **ANALYTICAL MODEL OF SATELLITE MOTION IN ALMOST CIRCULAR ORBITS UNDER THE INFLUENCE OF ZONAL HARMONICS OF GEOPOTENTIAL**

---

*The article deals with the movement of satellites in low near-circular orbits of the Earth. An analytical model is constructed, which consists of formulas describing the change of the osculating elements and averaged equations. An algorithm for constructing a second approximation of the influence of zonal harmonics of the geopotential on the movement of satellites in almost circular orbits is presented. For the second and third zonal harmonics, formulas are given for the osculating and average elements describing the motion of the satellite in the second approximation in small parameters. The introduction of special variables for almost circular orbits made it possible to significantly simplify the procedure for constructing the second approximation of the influence of zonal harmonics. The article provides a justification for the accuracy of the analytical model for the considered orbits. The constructed model of changes in the average elements of the orbit describes the basic principles of motion. With a sufficiently high accuracy, this model describes the changes in the average elements of the orbit with simple analytical formulas and is convenient for analyzing the properties of orbits and pre-selecting a reference orbit for a specific mission.*

**Keywords:** analytical model, almost circular orbits, zonal harmonics, average elements, laws of motion.

---

### **INTRODUCTION**

The article deals with the movement of satellites in low and very low, almost circular orbits of the Earth. The focus is on orbits with altitudes from 400 to 800 km, although the results obtained can be extended to other low orbits. An almost circular orbit is understood as an orbit for which the changes in radius during one revolution of orbital motion do not exceed

tenths of a percent. It is assumed that the inclination of the orbits is not small. Such a choice of orbits is determined by the interest in commercial, fairly light Earth remote sensing (ERS) satellites.

The choice of a reference orbit — an idealized trajectory in the vicinity of which the satellite will move is a necessary and important task of effective satellite mission planning. The requirements for the reference

Цитування: Pirozhenko A. V., Maslova A. I., Vasyliiev V. V. Analytical model of satellite motion in almost circular orbits under the influence of zonal harmonics of geopotential. *Space Science and Technology*. 2022. **28**, № 4 (137). P. 18—30. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.018>

orbit are, of course, contradictory: it should also give high accuracy in predicting movement and be simple enough to allow for its effective selection. It is clear that the rational choice of the reference orbit should be based on knowledge of the basic principles of the perturbed motion of the satellite.

Methods of numerical integration of equations of motion, the use of which is very effective in many problems of dynamics, are ineffective in the task of determining the basic principles of motion. Therefore, from the very beginning of space exploration, analytical theories of the motion of satellites in near-Earth orbits have been created [2, 11]. Work on the development of analytical theories of satellite motion has never stopped (see, for example, [1, 3–6, 8, 17]).

The Simplified General Perturbation (SGP) model series occupies a special position among the analytical models of satellite motion. These models were developed by U.S. Air Force for the purpose of operational monitoring of changes in near-Earth space. The SGP models use average orbital elements, whose values are obtained using a special procedure for removing short-period variations [10]. SGP models have been developed over decades [17] and are now widely used [7, 15].

The difference between the gravitational field of the Earth and the Newtonian central field has the main disturbing effect on the movement of the satellite in low Earth orbits. The main difference between the Earth's gravitational field and the Newtonian one is described by low-order zonal harmonics. At the same time, the effect on the satellite of disturbances from these harmonics does not depend on the rotation of the Earth. Thus, the study of the influence of zonal harmonics on satellite motion makes it possible to make significant progress in determining the basic principles of satellite motion, whilst appearing to be one of the simplest tasks in the study of the influence of external disturbances on satellite motion.

To date, many effective studies have been devoted to the influence of zonal harmonics of the geopotential on the motion of the satellite (see, for example, [1–6, 8, 11, 17]). Therefore, the question arises: why do we need another study? The answer to this question consists of several parts. Firstly, another study will not significantly change the total number of such studies. And the use of new variables [13, 14] describ-

ing the motion of the satellite will allow us to see the regularities of motion from a slightly different angle, which can expand our knowledge. Secondly, considering a rather narrow class of orbits together with the special variables introduced for this class made it possible, it seems, to significantly simplify the procedure for constructing a second approximation of the influence of zonal harmonics. Thirdly, the analytical models proposed in the article describe the motion of the satellite depending on the argument of the latitude of the orbit. This, in contrast to models using the mean anomaly or a combination of it, in some cases, seems more convenient. Fourthly, in the available publications on the issue under consideration, it is difficult to analyze the relationship between the so-called mean elements, briefly describing the basic principles of motion and the osculating elements of the orbit. For example, in the monograph [17], a lot of attention is paid to this problem. But among the extensive and very practical general tips for solving this problem, the following phrases are particularly memorable: "Everything has to be consistent!" and "Unfortunately, you won't always find this level of detail." In [16], in the same connection, it is noted that "...the older analytical theories often do not deliver the required accuracy, and the implementation of the newer theories requires access to the internal documentation of other space agencies or journal papers of limited access..." From this, we can conclude that the solution to the problem of the connection between the mean elements and the osculating elements of the orbit requires additional development.

Thus, the construction of an analytical model of the influence of zonal harmonics on the movement of satellites in low Earth orbits is an important task for designing the orbits of remote sensing satellites, and its solution requires additional research. The article proposes an algorithm for constructing an analytical model and formulas for osculating and mean elements describing the motion of the satellite in the second approximation in small parameters under the influence of zonal harmonics of the geopotential.

#### **PROBLEM STATEMENT**

The potential of the Earth's gravitational field can be described using a series expansion in spherical functions

$$U = \frac{\mu}{R} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{R_E}{R} \right)^n \left( C_{n0} P_n(\sin \delta) + \sum_{m=1}^n P_{nm}(\sin \delta) (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \right) \right], \quad (1)$$

where  $\mu$  is gravitational constant of the Earth;  $R$  is the distance from the center of the Earth to the considered point in space with geocentric latitude  $\delta$  and longitude  $\lambda$  in the coordinate system associated with the Earth;  $R_E$  is the average equatorial radius of the Earth;  $C_{n0}$ ,  $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$  are dimensionless coefficients depending on the distribution of the Earth's masses;  $P_n(\sin \delta)$  are Legendre polynomials of order  $n$ ;  $P_{nm}(\sin \delta)$  are associated Legendre functions of order  $n$  and index  $m$ .

The members of expression (1) containing  $P_n(\sin \delta)$  are called the second, third, etc. zonal harmonics, and the terms containing  $P_{nm}(\sin \delta)$  are sectorial (at  $n = m$ ) and tesseral (at  $0 < m < n$ ) harmonics. The geometrical meaning harmonics is detailed in [17].

It is known that the main changes in the motion parameters of satellites in low orbits are caused by the influence of zonal harmonics. Moreover, harmonics of a lower order have a more significant influence, the magnitude of which is determined by the coefficients  $C_{n0}$ :  $C_{20} \approx -1.0826 \cdot 10^{-3}$ ,  $C_{30} \approx 2.5324 \cdot 10^{-6}$ ,  $C_{40} \approx 1.6199 \cdot 10^{-6}$ ,  $C_{50} \approx 2.2775 \cdot 10^{-7}$  [17].

To describe the motion, we will use a special form of equations for close to circular orbits [13, 14]. This form of equations describes the deviation of the satellite trajectory from the circular unperturbed orbit. For this, dimensionless variables  $b_1, b_2, \gamma$  are introduced, associated with the current position and speed of the satellite by the relations

$$R = R_0(1 + b_1), \quad \dot{R} = b_2 \sqrt{\mu/R_0}, \quad p = R_0(1 + \gamma),$$

where  $R_0$  is the radius of an undisturbed circular comparison orbit,  $p$  is the focal parameter of the satellite orbit.

The satellite motion equations can be written as

$$\begin{aligned} i' &= z \cos u F_n^*, \quad \Omega' = z \frac{\sin u}{\sin i} F_n^*, \\ \Delta u' &= \left( \frac{s^{1/2}}{z^2} - 1 \right) - \Omega' \cos i, \quad b_1' = b_2, \\ b_2' &= \frac{\gamma - b_1}{z^3} + F_r^*, \quad \gamma' = 2zsF_\tau^*, \end{aligned} \quad (2)$$

where the prime denotes the derivative with respect to  $\tilde{u}$ ,  $\tilde{u}$  is the argument of the latitude of the unperturbed orbit,

$$\dot{\tilde{u}} = \sqrt{\frac{\mu}{R_0^3}};$$

$i, \Omega, u$  are the inclination, the longitude of the ascending node, and the argument of the latitude of the satellite's orbit, respectively;  $z = 1 + b_1$  is the dimensionless radius of the orbit equal to the ratio of the radius of the orbit to the comparison orbit radius,  $s = 1 + \gamma$  is the dimensionless focal parameter of the orbit equal to the ratio of the focal parameter of the orbit to the focal parameter of the comparison orbit;

$$\Delta u = u - \tilde{u}; \quad F_r^* = \frac{R_0^2}{\mu} F_r, \quad F_{\tau,n}^* = \frac{R_0^2}{\mu} s^{-1/2} F_{\tau,n}, \quad F_r, F_\tau, F_n$$

are radial, transversal, and normal accelerations respectively;

$$\frac{\mu}{R_0^2}$$

is the acceleration of free fall for  $R_0$ .

The accelerations from the second zonal harmonic are three orders of magnitude higher than the rest of the disturbing accelerations. To describe its influence, we introduce a small parameter

$$\varepsilon = -\frac{3}{2} C_{20} \frac{R_E^2}{R_0^2}$$

(for  $R_0 = 7000$  km,  $\varepsilon = 1.35 \cdot 10^{-3}$ ). We will consider motion in orbits close to circular in the sense that the initial values of the parameters  $b_1, b_2, \gamma$  are small quantities, the order of which is equal to or greater than the order of smallness of the quantity  $\varepsilon$ .

The task is to construct an analytical model with reasonable (required for the orbits under consideration) accuracy describing the change in satellite motion under the influence of zonal harmonics of geopotential.

#### DETERMINATION OF THE REQUIREMENTS FOR THE ACCURACY OF THE ANALYTICAL MODEL

The qualitative requirement for the analytical model in its description consists of the basic principles of satellite motion: the model should describe secular and long-period movements. The model should also allow analyzing the properties of orbits, in particular, their stability. It is desirable that the model includes

fairly simple ratios that allow the choice of the satellite's reference orbit.

The constructed first approximation of the influence of the second zonal harmonic [14] shows that it does not allow one to judge the stability of the shape of the orbits. At the same time, it is known that the analysis of the influence of the second and third zonal harmonics makes it possible to determine stable, so-called frozen orbits. The analysis of the influence of higher-order zonal harmonics is incorrect without constructing a second approximation of the influence of the second zonal harmonic. Thus, the study of the regularities of the influence of zonal harmonics and the analysis of the stability of the orbital shapes requires the construction of a second approximation of the influence of the second zonal harmonic of the geopotential.

Consider the quantitative requirements for the accuracy of the analytical model. The first approximation of the solution of the equations of satellite motion with respect to a small parameter  $\varepsilon$  has an error

of the order of  $10^{-6}u$ , where  $u$  is the argument of latitude. We will assume that the accuracy is determined by values an order of magnitude lower, i.e., in the case under consideration, the accuracy is about  $10^{-5}u$ . Consequently, the expected accuracy of the first approximation in the interval of two orbital loops will be of the order of  $10^{-4}$ , and in the interval of 20 orbits — of the order of  $10^{-3}$ . Taking into account that the radius of the considered orbits is less than 7000 km, we find that the expected accuracy of the first approximation is about 700 m for two orbits and 7 km for 20 orbits. This accuracy does not seem to be sufficient.

To determine the sufficient accuracy of analytical approximations of the influence of zonal harmonics on the satellite's motion, let us consider estimates of the influence of various perturbations on the satellite's motion in the considered orbits (Figure 1, Table 1).

The second approximation from the second zonal harmonic has an error of the order of  $\varepsilon^3u \approx 10^{-9}u$ .

Table 1. Analysis of the influence of various disturbing factors on the satellite motion [12]

Component of accelerations	Order of magnitude of disturbances (m/s <sup>2</sup> )	
	Orbits of altitude of 19000...20000 km (GLONASS, GPS)	Low orbits of altitude 350...400 km (ISS)
Central field of the Earth	0.61	8.8
Effect of Earth flattening (harmonic $2 \times 0$ )	$10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-2}$
Effect of harmonics of an order higher than $2 \times 0$	$2 \times 10^{-7}$	$10^{-5}$
Effect of harmonics of an order higher than $8 \times 8$	$10^{-10}$	$4 \times 10^{-7}$
Effect of harmonics of an order higher than $36 \times 36$	0	$10^{-7}$
Effect of harmonics of an order higher than $72 \times 72$	0	$10^{-8}$
Earth's atmosphere	0	$10^{-6}$
Lunar gravity	$4 \times 10^{-6}$	$10^{-6}$
Displacement of Earth's pole from Z-axis of the Geocentric Coordinate System (GCS)	$10^{-6}$	$3 \times 10^{-7}$
Solar gravity	$10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-7}$
Forces of light pressure from the Sun	$10^{-7}$ (GPS)	$6 \times 10^{-8}$ (ISS)
Precession and nutation of Earth's axis of rotation	$2.5 \times 10^{-8}$	$6 \times 10^{-8}$
Gravitational disturbances caused by the change of the Earth's shape due to tidal effects on the Earth of the Moon and the Sun	$2 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-7}$
Nonuniformity of Earth rotation	$3 \times 10^{-9}$	$7 \times 10^{-9}$
Change of Earth's shape due to pole displacement	$10^{-11}$	$2 \times 10^{-9}$
Forces of light pressure from the Earth	$1.5 \times 10^{-9}$ (GPS)	$4 \times 10^{-9}$ (ISS)
Forces caused by light and heat radiation of SC	$1.4 \times 10^{-9}$	$10^{-9}$
Gravitational disturbances from Venus	$1.1 \times 10^{-10}$	$3 \times 10^{-11}$

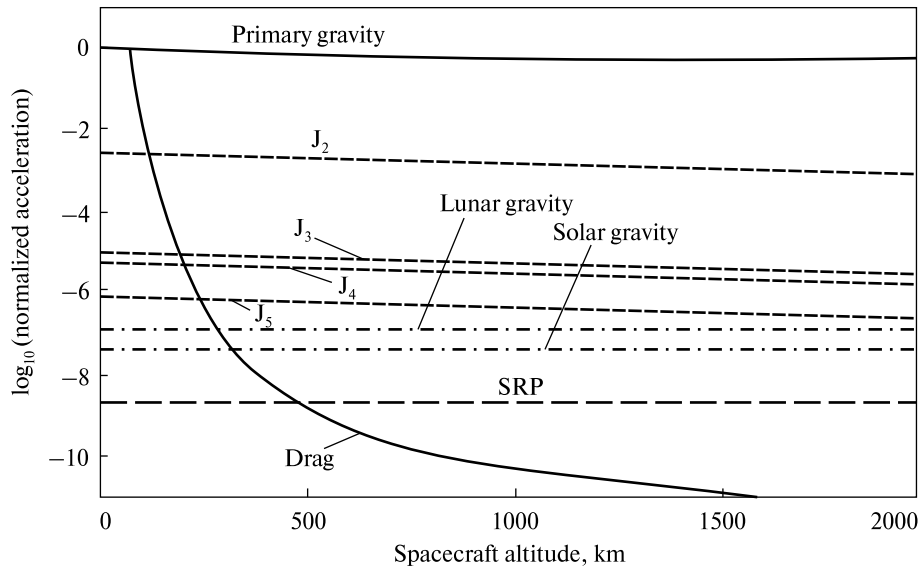


Figure 1. Comparison of various disturbing accelerations in low Earth orbits [9]

Taking into account that the coefficients of the remaining zonal harmonics are at least three orders of magnitude smaller than the coefficient of the second zonal harmonic (i.e., they have the order of the square of the coefficient of the second zonal harmonic and higher), the first approximation of their influence will have an error of a higher order of smallness than the second approximation from the second zonal harmonic. Consequently, the accuracy of the analytical model, including the second approximation from the second zonal harmonic and the first approximations from the remaining zonal harmonics, will be of the order of  $10^{-8}u$ .

The influence of the rest of the disturbing factors on the satellite's motion in the considered orbits can be estimated by the formula

$$\frac{W}{g_0}u,$$

where  $W$  is the acceleration of the satellite due to this effect, and

$$g_0 = \frac{\mu}{R_0^2}$$

is the acceleration of gravity for a given altitude. From the third column of Table 1, it is easy to see that the effects of aerodynamics and lunar gravity are an order of magnitude superior to the accuracy of the second approximation of the influence of the second zonal harmonic, and many other factors have

an effect comparable to the accuracy of the second approximation.

The accuracy achieved when constructing the second approximation of the effect of the second zonal harmonic on the satellite's motion  $10^{-8}u$  with an orbit radius of less than 7000 km ensures the accuracy of estimating the satellite's position on two turns of approximately 0.7 m and 7 m on twenty turns. Calculations of the motions of satellites and their comparison with measurements of these motions show that such accuracy of the analytical assessment of the influence of zonal harmonics is quite sufficient (the effect of tidal effects has comparable changes in the motions of satellites in low orbits).

Thus, the construction of the second approximation of the influence of the second zonal harmonic and the first approximations of the influence of the higher-order zonal harmonics provides sufficient accuracy for assessing these influences. Constructing approximations of a higher order has no practical meaning because of the effects of other disturbing forces.

#### CONSTRUCTION OF THE SECOND APPROXIMATION OF THE INFLUENCE OF THE SECOND ZONAL HARMONIC

The disturbing accelerations from the action of the second zonal harmonic have the form

$$\begin{aligned}
 F_r &= -\frac{3C_{20}\mu R_E^2}{2R^4}(3\sin^2 u \sin^2 i - 1), \\
 F_\tau &= \frac{3C_{20}\mu R_E^2}{2R^4} \sin 2u \sin^2 i, \\
 F_n &= \frac{3C_{20}\mu R_E^2}{2R^4} \sin u \sin 2i.
 \end{aligned} \quad (3)$$

Passing in (2) to differentiation with respect to  $u$ , we obtain

$$\begin{aligned}
 i' &= zw \cos u F_n^*, \quad \Omega' = zw \frac{\sin u}{\sin i} F_n^*, \\
 \Delta u' &= w \left( \frac{s^{1/2}}{z^2} - 1 \right) - \Omega' \cos i, \quad b_1' = w b_2', \\
 b_2' &= w \frac{\gamma - b_1}{z^3} + w F_r^*, \quad \gamma' = 2wzs F_\tau^*
 \end{aligned} \quad (4)$$

where, as in (2)

$$\begin{aligned}
 F_{\tau,n}^* &= \frac{R_0^2}{\mu} s^{-1/2} F_{\tau,n}, \quad F_r^* = \frac{R_0^2}{\mu} F_r, \\
 w &= \left( \frac{s^{1/2}}{z^2} - z \operatorname{ctg} i \sin u F_n^* \right)^{-1},
 \end{aligned}$$

but the prime denotes the derivative with respect to  $u$ .

Substituting accelerations (3) into (4) we obtain

$$\begin{aligned}
 i' &= -\frac{\varepsilon}{2} \frac{w}{z^3 s^{1/2}} \sin 2u \sin 2i, \\
 \Omega' &= -2\varepsilon \frac{w}{z^3 s^{1/2}} \cos i \sin^2 u, \\
 \Delta u' &= w \left( \frac{s^{1/2}}{z^2} - 1 \right) - \Omega' \cos i, \\
 \gamma' &= -2\varepsilon w \frac{s^{1/2}}{z^3} \sin^2 i \sin 2u, \\
 b_1' &= w b_2',
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$b_2' = w \frac{\gamma - b_1}{z^3} + \varepsilon \frac{w}{z^4} (3\sin^2 i \sin^2 u - 1),$$

where

$$w = \left( \frac{s^{1/2}}{z^2} + 2\varepsilon \frac{1}{s^{1/2} z^3} \cos^2 i \sin^2 u \right)^{-1}.$$

Since we are considering an almost circular orbit and  $b_1, b_2, \gamma$  are small quantities, then, taking into account that with the preservation of only terms

of the first order of smallness  $w \approx 1 - 0.5\gamma + 2b_1 - 2\varepsilon \cos^2 i \sin^2 u$ , in the first approximation the equations with differentiation with respect to  $u$  coincide with the equations for differentiation with respect to  $\tilde{u}$ .

We will assume that at the initial moment of time  $u = \tilde{u} = 0$ , i.e. the trajectory “starts” at the ascending node of the orbit. Then the solutions of equations (5) for  $i, \Omega, \gamma$  in the first approximation with respect to small parameters have the form [14]

$$\begin{aligned}
 i &= i_0 + \Delta i_2 = i_0 + \frac{\varepsilon}{4} \sin 2i_0 (\cos 2u - 1), \\
 \Omega &= \Omega_0 + \Delta \Omega_2 = \Omega_0 - \frac{\varepsilon}{2} \cos i_0 (2u - \sin 2u), \\
 \gamma &= \gamma_0 + \Delta \gamma_2 = \gamma_0 + \varepsilon \sin^2 i_0 (\cos 2u - 1),
 \end{aligned} \quad (6)$$

where the subscript “0” denotes the initial values of the variables, and the subscript “2” denotes the terms describing, in the first approximation, changes in motion under the influence of the second zonal harmonic.

We write the equation for the change of  $b_1$  in the form [14]

$$b_1'' + b_1 = -\frac{\varepsilon}{2} \sin^2 i_0 \cos 2u + \gamma_0 + \varepsilon \left( \frac{1}{2} \sin^2 i_0 - 1 \right). \quad (7)$$

Taking

$$\gamma_0 = \varepsilon \left( 1 - \frac{1}{2} \sin^2 i_0 \right), \quad (8)$$

we obtain that equation (7) describes harmonic oscillations relative to the zero position. Condition (8) is not a restriction on the values of the focal parameter (transverse satellite velocity) due to the absence of restrictions on the radius of the comparison orbit  $R_0$ .

Then the equation describing the change in  $b_1$  takes the form

$$b_1'' + b_1 = -\frac{\varepsilon}{2} \sin^2 i_0 \cos 2u.$$

We write its solution in the form

$$\begin{aligned}
 b_1 &= b_0 \cos u + b_0' \sin u + \frac{d}{3} (\cos 2u - \cos u) = \\
 &= A_0 \cos(u - \alpha_0) + \frac{d}{3} (\cos 2u - \cos u),
 \end{aligned}$$

where

$$d = \frac{\varepsilon}{2} \sin^2 i_0;$$

$A_0, \alpha_0$  are the amplitude and phase shift of natural oscillations,  $d/3$  is the amplitude of forced oscillations.

Let us construct a solution to equations (5) in the second approximation in small parameters. To do this, we introduce new variables:  $i = i_l + i_{sq}$ ,  $\gamma = \gamma_l + \gamma_{sq}$ ,  $\Omega = \Omega_l + \Omega_{sq}$ , where the indices “ $l$ ” and “ $sq$ ” denote the components of the solution of equations (5), proportional to the first and second degrees of smallness, respectively.

To describe the changes in  $b_1, b_2$ , we introduce new variables  $A, \alpha$  as follows

$$b_1 = A \cos(u - \alpha) + \frac{d}{3}(\cos 2u - \cos u),$$

$$b_2 = -A \sin(u - \alpha) + \frac{d}{3}(\sin u - 2 \sin 2u).$$

Then the changes in  $A, \alpha$ , are described by the equations

$$A' = -\frac{d}{3}[2 \cos 2u \sin(u - \alpha) - 2 \sin(u + \alpha) + \sin \alpha] + b_{1r} \cos(u - \alpha) - b_{2r} \sin(u - \alpha),$$

$$A\alpha' = A + \frac{d}{3}[2 \cos 2u \cos(u - \alpha) + 2 \cos(u + \alpha) - \cos \alpha] + b_{1r} \sin(u - \alpha) + b_{2r} \cos(u - \alpha),$$

where  $b_{1r}, b_{2r}$  are the right-hand sides of the corresponding equations (5).

Since the second approximation is being sought, it is sufficient to express  $w$  in the first approximation. Substituting solutions (6) and (8) for  $\gamma$  into the expression for  $w$ , we obtain

$$w \approx 1 + 2b_1 - 0.5\varepsilon(3 - 3.5 \sin i) + \varepsilon(1 - 1.5 \sin^2 i) \cos 2u.$$

We substitute the introduced variables into equations (5) and transform them, discarding the terms of the equations of the third and higher order of smallness. After rather cumbersome, but not complicated transformations, it is possible to obtain expressions for the terms  $\Delta x_{22}$ , where  $x = \{i, \Omega, \gamma, A, \alpha\}$ , describing the change in the parameters of the orbit under the action of the second zonal harmonic of the geopotential in the second approximation. These expressions are given in Appendix.

We note that to construct approximations for  $A$  and  $\alpha$ , it is more convenient to use the equations in the following form

$$A' = b_{1r} \cos(u - \alpha) - b_{2r} \sin(u - \alpha) - b_2 \cos(u - \alpha) - b_1 \sin(u - \alpha) - d \cos 2u \sin(u - \alpha), \quad (9)$$

$$A\alpha' = b_{1r} \sin(u - \alpha) + b_{2r} \cos(u - \alpha) - b_2 \sin(u - \alpha) + b_1 \cos(u - \alpha) + d \cos 2u \cos(u - \alpha). \quad (10)$$

Note also that the cumbersomeness of the formulas, especially for  $A$  and  $\alpha$ , makes it desirable to verify them. To carry out such a check, differential equations were written out in the most general form, with only linear and quadratic terms preserved on their right-hand side. The verification of the approximation formulas was carried out by comparing these formulas with the results of the numerical integration of the obtained differential equations.

#### CONSTRUCTION OF THE FIRST APPROXIMATION OF THE INFLUENCE OF THE THIRD ZONAL HARMONIC

Since the zonal harmonics coefficients  $C_{n0}$  at  $n > 2$  have an order of smallness equal to the square of the second zonal harmonic coefficient and higher, then, for the considered model accuracy, it is sufficient to take into account their influence only in the first approximation. Taking into account the algorithm for constructing a second approximation of the influence of the second zonal harmonic, it is not difficult to understand that the influence of higher-order zonal harmonics will be described by additional terms that can be obtained independently of the influence of other zonal harmonics. Then, taking into account the influence of  $n$  zonal harmonics, the orbital parameters will be described as follows

$$x = x_0 + \Delta x_2 + \Delta x_{22} + \Delta x_3 + \dots + \Delta x_n, \quad (11)$$

where  $x = \{i, \Omega, \gamma, A, \alpha\}$  is the orbital parameter;  $x_0$  is its initial value;  $\Delta x_2$  are the terms describing the influence of the second zonal harmonic in the first approximation;  $\Delta x_{22}$  are the terms describing the influence of the second zonal harmonic in the second approximation;  $\Delta x_3$  are the terms describing the influence of the third zonal harmonic in the first approximation, etc.

Taking into account the limited volume of the article, and the uniformity of the procedures, we present formulas only for the third zonal harmonic.



The disturbing accelerations of the third zonal harmonic have the form

$$F_r = -2 \frac{C_{30} \mu R_E^3}{R^5} (5 \sin^2 u \sin^2 i - 3) \sin u \sin i,$$

$$F_\tau = \frac{C_{30} \mu R_E^3}{2R^5} (15 \sin^2 u \sin^2 i - 3) \cos u \sin i,$$

$$F_n = \frac{C_{30} \mu R_E^3}{2R^5} (15 \sin^2 u \sin^2 i - 3) \cos i.$$

Substituting these accelerations into equations (4) and linearizing the equations, it is easy to obtain formulas for additional terms describing the influence of the third zonal harmonic

$$\begin{aligned} \Delta i_3 &= \frac{1}{2} \varepsilon_3 \cos i_0 \sin u (5 \sin^2 i_0 \sin^2 u - 3), \\ \Delta \Omega_3 &= 1 \frac{1}{2} \varepsilon_3 \operatorname{ctg} i_0 \times \\ &\times \left[ 5 \sin^2 i_0 \left( \frac{2}{3} - \cos u + \frac{1}{3} \cos^3 u \right) + \cos u - 1 \right], \\ \Delta \gamma_3 &= \varepsilon_3 \sin i_0 \sin u (5 \sin^2 i_0 \sin^2 u - 3), \\ \Delta A_3 &= \varepsilon_3 \sin i_0 \left\{ \frac{3}{4} \sin \alpha_0 \left( 1 - \frac{5}{8} \sin^2 i_0 \right) + \right. \\ &\quad \left. - \frac{3}{4} \left( 1 - \frac{1}{4} \sin^2 i_0 - 1 \right) \sin(2u - \alpha_0) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{5}{16} \sin^2 i_0 \left[ \sin(2u + \alpha_0) - \frac{1}{2} \sin(4u - \alpha_0) \right] \right\}, \\ \Delta A_3 &= \varepsilon_3 \sin i_0 \left\{ \frac{3}{4} \sin \alpha_0 \left( 1 - \frac{5}{8} \sin^2 i_0 \right) + \right. \\ &\quad \left. + 1 \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{4} \sin^2 i_0 - 1 \right) \cos \alpha_0 \cdot u - \right. \\ &\quad \left. - \frac{3}{4} \left( 1 - \frac{1}{4} \sin^2 i_0 - 1 \right) \sin(2u - \alpha_0) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{5}{16} \sin^2 i_0 \left[ \sin(2u + \alpha_0) - \frac{1}{2} \sin(4u - \alpha_0) \right] \right\}, \\ \Delta \alpha_3 &= \frac{\varepsilon_3}{A_0} \sin i_0 \left\{ \frac{3}{4} \cos \alpha_0 \left( 1 - \frac{5}{8} \sin^2 i_0 \right) - \right. \\ &\quad \left. - 1 \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{4} \sin^2 i_0 - 1 \right) \sin \alpha_0 \cdot u + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3}{4} \left( 1 - \frac{1}{4} \sin^2 i_0 - 1 \right) \cos(2u - \alpha_0) - \right. \end{aligned}$$

$$\left. - \frac{5}{16} \sin^2 i_0 \left[ \cos(2u + \alpha_0) + \frac{1}{2} \cos(4u - \alpha_0) \right] \right\}.$$

Here, as before, we assume that at the initial moment of time  $u = 0$ ,

$$\varepsilon_3 = \frac{C_{30} R_E^3}{R_0^3}$$

formulas for  $A$  and  $\alpha$  are obtained using equations (9), (10).

Note that the obtained expressions show that the effect of the third zonal harmonic leads to a systemic change only in the shape of the orbit ( $\alpha$  and  $A$ ). The rest of the parameters are subject to only periodic fluctuations.

#### NUMERICAL ESTIMATES OF THE MODEL'S ACCURACY

Numerical integration of the equations of orbital motion confirms the above estimates of the accuracy of the analytical formulas. Figure 2 shows the difference  $\Delta x = x_{num} - x_{an}$ , where  $x = \{i, \Omega, \gamma, A, \alpha\}$ ;  $x_{num}$  is the value of the parameter obtained by numerical integration of the equations of orbital motion;  $x_{an}$  is the value of the parameter obtained using the constructed analytical approximations in accordance with formula (11). The calculations were carried out taking into account the effect of the second and third zonal harmonics for the following initial conditions:

$$R_0 = R_{sr} + 507 \text{ km}, \quad R_{sr} = 6371 \text{ km}, \quad i_0 = 97.4^\circ,$$

$$\Omega_0 = 183.3^\circ, \quad b_{10} = -4.8 \cdot 10^{-4}, \quad b_{20} = -0.00126$$

$$(A_0 \approx 0.00135, \quad \alpha_0 \approx 249.12^\circ), \quad u_0 = 0.$$

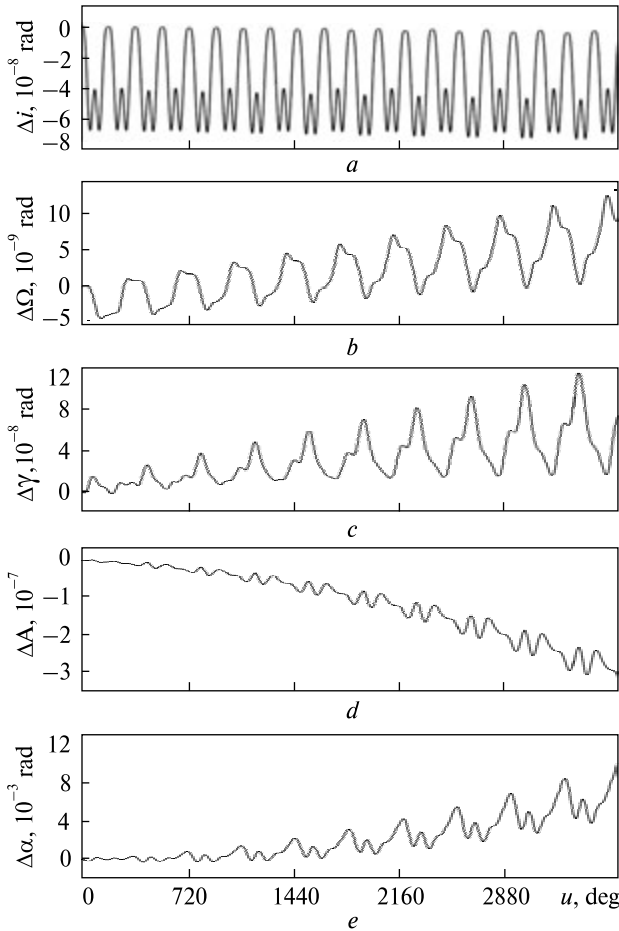
#### AVERAGED EQUATIONS

We obtain the averaged equations by applying the averaging operator

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(u) du$$

to the right-hand sides of differential equations (4), taking into account (9), (10), in which terms not higher than the second order of smallness are preserved.

The equations averaged over  $u$ , taking into account the second and third harmonics, have the form



**Figure 2.** Difference in inclination (a), in longitude of the ascending node (b), in the description of the relative focal parameter  $\gamma$  (c), in the description of the amplitude of the change in the relative radius of the orbit (d), in the description of the phase of oscillations of the orbital radius (apogee argument) (e)

$$\begin{aligned} \bar{i}' &= 0, \quad \bar{\gamma}' = 0, \\ \bar{\Omega}' &= -\varepsilon \cos \bar{i} + \varepsilon \cos \bar{i} \left( 2\frac{1}{2}\varepsilon - 8\frac{2}{3}d \right), \\ \bar{A}\bar{\alpha}' &= -C \sin \bar{\alpha} - \bar{A}G + \frac{d}{3}G \cos \bar{\alpha}, \\ \bar{A}' &= C \cos \bar{\alpha} + \frac{d}{3}G \sin \bar{\alpha}, \end{aligned} \quad (12)$$

where the “hat” denotes the average values;

$$G = 5d - 2\varepsilon;$$

$$C = 1 - \frac{1}{2}\varepsilon_3 \sin \bar{i} \left( 1 - \frac{1}{4}\sin^2 \bar{i} - 1 \right).$$

It is clear that the right-hand sides of equations (12) fully correspond to the linear terms of the previously constructed approximations.

Note that the use of averaged equations is correct when  $G$  has order  $\varepsilon$  and  $C$  has order  $\varepsilon^2$ . The case when  $G$  and  $C$  have higher orders of smallness  $\varepsilon^2$  and  $\varepsilon^3$ , respectively, requires additional research. Further, orbits for which  $\sin^2 i_0 \approx 0.8$  are not considered.

To use the averaged equations in constructing a long-term forecast of satellite movements, it is necessary to determine the initial conditions for the averaged equations. Unfortunately, the averaging method does not allow this to be done. Calculations show that accepting the initial conditions equal to the initial conditions of the initial equations leads to significant errors. The combination of the averaging method with the constructed analytical approximations makes it easy to solve this problem. In accordance with the logic of the averaging method, we require that high-frequency oscillations be carried out relative to the average solution with zero mean. Then the initial conditions for the averaged equations are determined by the free terms of the expansions. For example, the initial value for  $\bar{i}$  is

$$\begin{aligned} \bar{i}_0 &= i_0 - \frac{\varepsilon}{4} \sin 2i_0 + \\ &+ \varepsilon \sin 2i_0 \left\{ \frac{1}{48} \left( 29\varepsilon - 84\frac{1}{3}d \right) + \frac{1}{3}A_0 \cos \alpha_0 \right\}. \end{aligned}$$

The solutions of the averaged equations constructed with such initial conditions show good agreement with the solutions of the original equations. So, the difference between  $\Omega$  and  $\bar{\Omega}$  for the same initial conditions as in the construction of Figures 2 does not exceed  $2.5 \cdot 10^{-4}$  deg. per 1000 satellite orbital turns. Under the same initial conditions, but  $i_0 = 45^\circ$ , this difference does not exceed  $2 \cdot 10^{-3}$  deg. for 1000 turns. Note that the deviations between  $\bar{\Omega}$  and mean  $\Omega$  grow linearly with time. This growth is apparently associated with unaccounted for accelerations from the second zonal harmonic (see Figure 2, b). The linear nature of the deviations of  $\bar{\Omega}$  from the mean  $\Omega$  allows them to be reduced, if this is required by the task.

Figure 3 shows the changes in the amplitudes  $A, \bar{A}$  and phase shifts (apogee arguments)  $\alpha, \bar{\alpha}$  of

the initial (2) and averaged equations for 1000 satellite orbits. The initial conditions of motion are the same as for Figures 2. The solutions of the complete equations are shown in the figure by the solid line; the solutions of the averaged equations are shown by the circles. The difference between  $\alpha$  and  $\bar{\alpha}$  for 1000 turns is less than  $0.2^\circ$ , between  $A$  and  $\bar{A}$  less than  $2.5 \cdot 10^{-6}$ .

Equations (12) are easy to integrate. Let us construct a solution for  $\bar{A}$  and  $\bar{\alpha}$ . We introduce new variables  $\lambda = \bar{A} \cos \bar{\alpha}$ ,  $h = \bar{A} \sin \bar{\alpha}$ . The change in these variables is described by the equations

$$\begin{aligned} \lambda' &= \bar{A}' \cos \bar{\alpha} - \bar{A} \bar{\alpha}' \sin \bar{\alpha} = \\ &= \bar{A} G \sin \bar{\alpha} + C = Gh + C, \\ h' &= \bar{A}' \sin \bar{\alpha} + \bar{A} \bar{\alpha}' \cos \bar{\alpha} = \\ &= \frac{d}{3} G - \bar{A} G \cos \bar{\alpha} = \frac{d}{3} G - G\lambda. \end{aligned}$$

Or compactly

$$\begin{aligned} \lambda' &= Gh + C, \\ h' &= \frac{d}{3} G - G\lambda. \end{aligned} \quad (13)$$

The solution of equations (13) for  $G > 0$  and  $G < 0$  can be written in the form

$$\begin{aligned} \bar{A} \sin \bar{\alpha} &= - \left( \bar{A}_0 \cos \bar{\alpha}_0 - \frac{d}{3} \right) \sin Gu + \\ &+ \left( \bar{A}_0 \sin \bar{\alpha}_0 + \frac{C}{G} \right) \cos Gu - \frac{C}{G}, \\ \bar{A} \cos \bar{\alpha} &= \frac{d}{3} + \left( \bar{A}_0 \cos \bar{\alpha}_0 - \frac{d}{3} \right) \cos Gu + \\ &+ \left( \bar{A}_0 \sin \bar{\alpha}_0 + \frac{C}{G} \right) \sin Gu, \end{aligned} \quad (14)$$

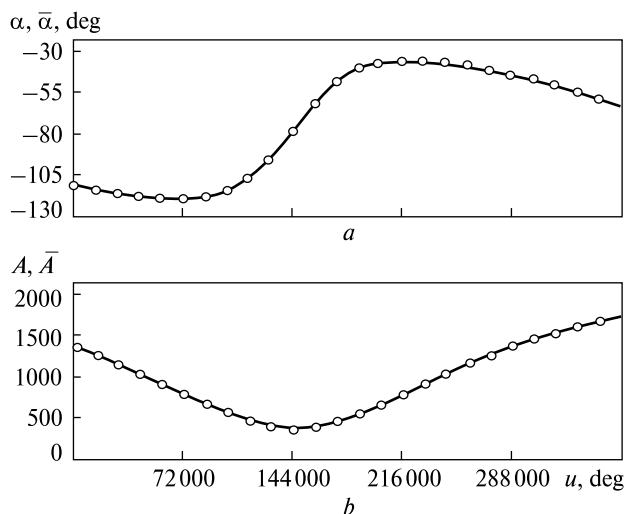
where  $\bar{A}_0, \bar{\alpha}_0$  are the initial conditions of the averaged equations.

It follows from (14) that motion has a unique equilibrium position, which is determined by the equalities

$$\bar{A}_0 \sin \bar{\alpha}_0 = -\frac{C}{G}, \quad \bar{A}_0 \cos \bar{\alpha}_0 = \frac{d}{3}.$$

And this equilibrium position is stable.

Thus, the averaged equations describe the basic principles of satellite motion by simple ratios. Having a sufficiently high accuracy, these equations allow



**Figure 3.** Solutions of the initial (2) and averaged equations for the amplitude and phase shift in the oscillations of the orbit radius

analyzing the properties of the orbits and making a preliminary choice of the parameters of the reference orbit for the satellite mission.

The combination of solutions of the averaged equations and formulas of the second approximation makes it possible to construct relations for the long-term prediction of satellite motions. For this, in the obtained formulas of the second approximation, it is necessary to replace the free and linear terms with the corresponding solutions of the averaged equations, and replace the initial values in the formulas of the second approximation with “initial” values that correspond to the current values of the average elements.

## CONCLUSIONS

1. The constructed analytical model of the second approximation in small parameters describes with sufficient accuracy short-period changes in the motion of satellites in low, almost circular orbits under the influence of the second and third zonal harmonics of the geopotential.

2. The proposed algorithm for constructing the second approximation of the influence of the zonal harmonics of the geopotential on the motion of satellites in almost circular orbits, despite the cumbersome formulas, is mathematically simple. It consists of schemes for constructing the second approximation of the influence of the second zonal harmonic

and the first approximations of the influence of higher order zonal harmonics. The algorithm allows one to easily take into account the influence of any number of zonal harmonics.

3. The constructed model of changes in the average elements of the orbit describes the basic principles of motion. Having a sufficiently high accuracy, the model describes the changes in the average elements with simple analytical formulas. The proposed model is convenient for analyzing the properties of orbits and the preliminary selection of a reference orbit for a specific mission.

APPENDIX

$$\begin{aligned} \Delta i_{22} &= \varepsilon \sin 2i_0 \left[ \frac{1}{48} \left( 29\varepsilon - 84 \frac{1}{3} d \right) + \frac{1}{3} A_0 \cos \alpha_0 - \right. \\ & - \frac{1}{4} A_0 \cos(u + \alpha_0) + \frac{1}{12} d \cos u + \left( 2d - \frac{11}{16} \varepsilon \right) \cos 2u + \\ & \left. + \frac{1}{36} d \cos 3u - \frac{1}{12} A_0 \cos(3u - \alpha_0) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{16} \left( \varepsilon - 4 \frac{1}{3} d \right) \cos 4u + \frac{1}{48} (\varepsilon - 4d) \cos 6u \right], \\ \Delta \Omega_{22} &= \varepsilon \cos i_0 \left[ 1 \frac{1}{3} A_0 \sin \alpha_0 + \left( 2 \frac{1}{2} \varepsilon - 8 \frac{2}{3} d \right) u - \right. \\ & - \frac{1}{6} d \sin u + A_0 \sin(u - \alpha_0) - \frac{1}{2} A_0 \sin(u - \alpha_0) + \\ & \left. + \left( 5 \frac{2}{3} d - 1 \frac{1}{2} \varepsilon \right) \sin 2u + \frac{1}{18} d \sin 3u - \right. \\ & \left. - \frac{1}{6} A \sin(3u - \alpha_0) + \left( \frac{1}{8} \varepsilon - \frac{2}{3} d \right) \sin 4u \right], \\ \Delta \gamma_{22} &= 2 \frac{2}{3} A_0 d \cos \alpha_0 + 3d\varepsilon - 6 \frac{13}{18} d^2 + \frac{2}{3} d^2 \cos u - \\ & - 2A_0 d \cos(u + \alpha_0) + 4d(2d - \varepsilon) \cos 2u + \frac{2}{9} d^2 \cos 3u - \\ & - \frac{2}{3} A_0 d \cos(3u - \alpha_0) + d \left( \varepsilon - 2 \frac{1}{6} d \right) \cos 4u, \\ \Delta A_{22} &= -A_0 d - \left( \frac{3}{4} A_0^2 - 4 \frac{7}{36} d\varepsilon + 9 \frac{7}{12} d^2 \right) \cos \alpha_0 - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{4} A_0 \left( \varepsilon + 2 \frac{1}{3} d \right) \cos 2\alpha_0 - \frac{1}{4} A_0^2 \cos 3\alpha_0 + \\ & + d \sin \alpha_0 \left( 1 \frac{2}{3} d - \frac{2}{3} \varepsilon \right) u + A_0 d \cos u + \\ & + \left( \frac{3}{4} A_0^2 - 2 \frac{1}{6} d\varepsilon + 5 \frac{1}{18} d^2 \right) \cos(u - \alpha_0) + \\ & + \left( 6 \frac{1}{36} d^2 - 2 \frac{2}{3} d\varepsilon \right) \cos(u + \alpha_0) + 1 \frac{1}{6} A_0 d \cos(u - 2\alpha_0) + \\ & + \frac{1}{4} A_0 (\varepsilon - 3d) \cos(2u - 2\alpha_0) - \frac{1}{18} d^2 \cos(2u - \alpha_0) + \\ & + \frac{1}{12} d \left( 3 \frac{2}{3} d - \varepsilon \right) \cos(2u + \alpha_0) + \\ & + \frac{1}{9} d \left( 5\varepsilon - 10 \frac{3}{4} d \right) \cos(3u - \alpha_0) + \\ & + \frac{1}{2} d \left( \frac{1}{2} \varepsilon - 1 \frac{4}{9} d \right) \cos(3u + \alpha_0) - \\ & - \frac{1}{6} A_0 d \cos(3u - 2\alpha_0) + \frac{1}{4} A_0^2 \cos(3u - 3\alpha_0) - \\ & - \frac{1}{9} d^2 \cos(4u - \alpha_0) + \frac{1}{3} A_0 d \cos(4u - 2\alpha_0) + \\ & + \frac{1}{6} d \left( 1 \frac{2}{3} d - \frac{1}{2} \varepsilon \right) \cos(5u - \alpha_0), \\ \Delta \alpha_{22} &= \left[ \frac{1}{4} A_0 + \frac{d}{A_0} \left( 9 \frac{7}{12} d - 4 \frac{7}{36} \varepsilon \right) \right] \sin \alpha_0 + \\ & + \frac{1}{4} \left( \varepsilon + 2 \frac{1}{3} d \right) \sin 2\alpha_0 + \frac{1}{4} A_0 \sin 3\alpha_0 + \\ & + \left[ 2\varepsilon - 5d + \frac{1}{3} \frac{d}{A_0} \cos \alpha_0 (5d - 2\varepsilon) \right] u - \\ & - \frac{d}{3} \left( 1 + \frac{2}{3} \frac{d}{A_0} \cos \alpha_0 \right) \sin u + \\ & + \left[ \frac{1}{4} A_0 + 3 \frac{1}{3} d \cos \alpha_0 + \frac{d}{A_0} \left( 5 \frac{1}{6} d - 2 \frac{1}{6} \varepsilon \right) \right] \sin(u - \alpha_0) + \\ & + \frac{1}{3} \frac{d}{A_0} \left( 8\varepsilon - 17 \frac{3}{4} d \right) \sin(u + \alpha_0) - \frac{1}{2} d \sin(u - 2\alpha_0) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[ -\frac{1}{2}\varepsilon + 1\frac{5}{6}d + \frac{d}{A_0} \cos \alpha_0 \left( -\frac{17}{18}d + \frac{1}{6}\varepsilon \right) \right] \sin 2u + \\
& + \frac{1}{12} \frac{d}{A_0} (5d - \varepsilon) \sin(2u - \alpha_0) + \frac{1}{6} \frac{d^2}{A_0^2} \sin(2u + \alpha_0) + \\
& \quad + \frac{1}{4} (\varepsilon - 3d) \sin(2u - 2\alpha_0) + \\
& \quad + \frac{d}{A_0} \left( -1\frac{7}{36}d + \frac{5}{9}\varepsilon \right) \sin(3u - \alpha_0) + \\
& \quad + \frac{d}{A_0} \left( \frac{13}{18}d - \frac{1}{4}\varepsilon \right) \sin(3u + \alpha_0) - \\
& \quad - \frac{1}{6} d \sin(3u - 2\alpha_0) + \frac{1}{4} A_0 \sin(3u - 3\alpha_0) - \\
& \quad - \frac{1}{9} \frac{d^2}{A_0} \sin(4u - \alpha_0) + \frac{1}{3} d \sin(4u - 2\alpha_0) + \\
& \quad + \frac{d}{A_0} \left( \frac{5}{18}d - \frac{1}{12}\varepsilon \right) \sin(5u - \alpha_0).
\end{aligned}$$

## REFERENCES

1. Beutler G. (2005). *Methods of celestial mechanics. Vol. II: Application to planetary system geodynamics and satellite geodesy*. Berlin: Springer. ISBN 3-540-40750-2.
2. Brouwer D. (1959). Solution of the problem of artificial satellite theory without drag. *Astron. J.*, **64**, 378–396. doi.org/10.1086/107958.
3. Cook R. A. (1992). *The long-term behavior of near-circular orbits in a zonal gravity field*. Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference (Durango, CO, August 19–22, 1991), 2205–2221.
4. Cutting E. E., Frautnick J. C., Born G. H. (1978). Orbit analysis for Seasat-A. *J. Astronautical Sci.*, **26**, 315–342.
5. Deprit A. (1981). The elimination of the parallax in satellite theory. *Celestial mechanics*, **24**, 111–153. doi.org/10.1007/BF01229192.
6. Di Carlo M., Graça Marto S. D., Vasile M. (2021). Extended analytical formulae for the perturbed Keplerian motion under low-thrust acceleration and orbital perturbations. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, **133**, 1–39. doi.org/10.1007/s10569-021-10007-x.
7. Dong W., Chang-yin Z. (2010). An Accuracy Analysis of the SGP4/SDP4 Model. *Chinese Astron. and Astrophys.*, **34** (1), 69–76. doi.org/10.1016/j.chinastron.2009.12.009.
8. El'yasberg P. E. (1965). *Introduction to the theory of flight of artificial earth satellites*. Moscow: Nauka [in Russian].
9. Fortescue P. W., Stark J. P., Swinerd G. G. (2011). *Spacecraft systems engineering*. 4th Edition. Wiley and Sons, Inc. ISBN:9780470750124.
10. Hoots F. R., Roehrich R. L. (1980). Models for Propagation of NORAD Element Sets. Spacetrack Report № 3. U.S. Air Force: Aerospace Defense Command. URL: <https://www.celestrak.com/NORAD/documentation/spacetrk.pdf> (Last accessed: 17.01.2022).
11. Kozai Y. (1959). The motion of a close earth satellite. *Astron. J.*, **64**, 367–377. doi.org/10.1086/107957.
12. Markov Y. G., Mikhailov M. V., Perepelkin V. V., Pochukaev V. N., Rozhkov S. N., Semenov A. S. (2016). Analysis of the effect of various disturbing factors on high-precision forecasts of spacecraft orbits. *Cosmic Res.*, **54**, 155–163. DOI: 10.1134/S0010952515060015.
13. Pirozhenko A. V., Maslova A. I., Khramov D. A., Volosheniuk O. L., Mischenko A. V. (2020). Development of a new form of equations of disturbed motion of a satellite in nearly circular orbits. *Eastern-European J. Enterprise Technol.*, **4** (5/106), 70–77. doi.org/10.15587/1729-4061.2020.207671.
14. Pirozhenko A. V., Maslova A. I., Vasilyev V. V. (2019). About the influence of second zonal harmonic on the motion of satellite in almost circular orbits. *Space Science and Technology*, **25** (2), 3–11. doi.org/10.15407/knit2019.02.003
15. San-Juan J. F., Pérez I., San-Martín M., Vergara E. P. (2017). Hybrid SGP4 orbit propagator. *Acta Astronautica*, **137**, 254–260. doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.04.015.
16. Spiridonova S., Kirschner M., Hugentobler U. (2014). *Precise mean orbital elements determination for LEO monitoring and maintenance*. URL: [https://elib.dlr.de/103814/1/Spiridonova\\_ISSFD\\_2014\\_upd.pdf](https://elib.dlr.de/103814/1/Spiridonova_ISSFD_2014_upd.pdf) (Last accessed: 17.01.2022).
17. Vallado D. A. (2013). *Fundamentals of astrodynamics and applications*. 4th edition. Microcosm Press. ISBN: 978-11881883180.

Стаття надійшла до редакції 17.01.2022  
Після доопрацювання 28.04.2022  
Прийнято до друку 02.05.2022

Received 17.01.2022  
Revised 28.04.2022  
Accepted 02.05.2022

О. В. Пироженко<sup>1</sup>, пров. наук. співроб., д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5240-8604>

E-mail: alex.pirozhenko@ukr.net

А. І. Маслова<sup>1</sup>, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2115-0847>

E-mail: maslova.a.i@ukr.net

В. В. Васильєв<sup>2</sup>, голов. дир. з техн. питань Компанії EOS Data Analytics Ukraine

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5211-9164>

E-mail: vladimir.vasiliev@eos.com

<sup>1</sup> Інститут технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України  
вул. Лешка-Попеля, 15, Дніпро, Україна, 49005

<sup>2</sup> Компанія EOS Data Analytics

1906 El Camino Real, Suite 201, Menlo Park, CA 94027, США

#### АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ СУПУТНИКА НА МАЙЖЕ КОЛОВИХ ОРБИТАХ ПІД ВПЛИВОМ ЗОНАЛЬНИХ ГАРМОНІК ГЕОПОТЕНЦІАЛУ

Розглядається рух супутників на низьких майже колових орбітах Землі. Побудовано аналітичну модель, яка складається з формул, що описують зміну оскулюючих елементів орбіти, та осереднених рівнянь. Наведено алгоритм побудови другого наближення впливу зональних гармонік геопотенціалу на рух супутників по майже колових орбітах. Для другої та третьої зональних гармонік наведено формули для оскулюючих та середніх елементів, що описують рух супутника у другому наближенні за малими параметрами. Введення спеціальних змінних для майже колових орбіт дозволило значно спростити процедуру побудови другого наближення впливу зональних гармонік. Дано обґрунтування точності аналітичної моделі для аналізованих орбіт. Побудована модель зміни середніх елементів орбіти описує основні закономірності руху. Маючи досить високу точність, ця модель описує зміни середніх елементів орбіти простими аналітичними формулами і зручна для аналізу властивостей орбіт та попереднього вибору опорної орбіти для конкретної місії.

**Ключові слова:** аналітична модель, майже колові орбіти, зональні гармоніки, середні елементи, закономірності руху.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.04.031>  
UDC 539.3

**V. Z. GRISTCHAK**<sup>1</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8685-3191>

E-mail: [grk@znu.edu.ua](mailto:grk@znu.edu.ua)

**D. V. HRYSHCHAK**<sup>2</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6474-6926>

E-mail: [d.hryshchak@msspu.gov.ua](mailto:d.hryshchak@msspu.gov.ua)

**N. M. DYACHENKO**<sup>1</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5284-4502>

**V. V. BABUROV**<sup>3</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7202-5133>

<sup>1</sup> Zaporizhzhia National University

66, Zhukovsky Str., Zaporizhzhia, 69600 Ukraine

<sup>2</sup> The Ministry for Strategic Industry of Ukraine

21-23, Ivana Franka Str., Kyiv, 01054 Ukraine

<sup>3</sup> Yuzhnoye State Design Office named M. K. Yangel

3, Kryvorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

## THE INFLUENCE OF THE GAUSSIAN CURVATURE SIGN OF THE COMPOUND SHELL STRUCTURE'S MIDDLE SURFACE ON LOCAL AND OVERALL BUCKLING UNDER COMBINED LOADING

*The buckling problem of an elastic compound shell structure with a variable Gaussian curvature of the middle surface, especially the middle surface meridian curvature sign, under the action of external pressure and axial loading is considered. In continuation of the previous research of the authors, this paper is devoted, in particular, to examining the influence of the negative Gaussian curvature sign of one of its compartments on stability.*

*The solution is based on using the method of finite differences for basic stability equations of each compartment in the case when one of them can have a negative curvature of the meridian, taking into account the discreteness of the intermediate rib location and their rigidity from the initial curvature plane as well. The obtained solution allows visualizing the buckling modes under various combinations of external loading and identifying rational, according to overall buckling modes, geometric and rigidity parameters of the system being investigated.*

**Keywords:** buckling, shells, compound “barrel-ogive” structure, Gaussian curvature sign of the middle surface, rational design, combined loading.

### INTRODUCTION

The study of shell structures with a complex geometric shape of the middle surface for stability is dictated by the needs of modern engineering, aircraft, rocket

and space technology, and internal trends in developing the mechanics of thin-walled shell systems. The selection of the effective forms of shell compartments and reinforcing elements depends on the purpose

Цитування: Gristchak V. Z., Hryshchak D. V., Dyachenko N. M., Baburov V. V. The influence of the Gaussian curvature sign of the compound shell structure's middle surface on local and overall buckling under combined loading. *Space Science and Technology*. 2022. **28**, № 4 (137). С. 31–38. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.031>

of the designed structure and the nature of external loading [10, 12].

A significant part of theoretical and experimental studies is devoted to the composite “cylinder-cone” type structures with zero Gaussian curvature [1, 3, 4, 12, 13]. Recently, the researchers have paid special attention to the problems of the compound shell structures’ stability with the positive [5–7, 14] and the negative [2, 9, 11] Gaussian curvature. As for the visualization of buckling modes of shell structures, a reference should be made to [8, 11, 12, 14].

The purpose of this paper is to study the influence of the Gaussian curvature sign of the middle surface of the compound “barrel-ogive” shell structure on the local and overall stability under the combined action of uniform external pressure and axial loads with the determination of rational rigidity characteristics of the reinforcing ribs and visualization of the buckling modes.

#### THE PROBLEM STATEMENT AND RESOLVENT EQUATIONS

Following [6, 7], and adhering to the terminology introduced in these papers, in the case of the compartment convexity, which corresponds to a positive sign of the middle surface curvature, the structure is to be referred to as a “barrel” or an “ogive”, respectively. To simplify further generalizing computations, the prefix “pseudo” (a “pseudo-ogive” or a “pseudo-barrel”) is added to the name of the corresponding shell compartment in the case of a negative curvature of the meridian.

We consider this composite shell structure with constant thickness  $h$ , elasticity modulus  $E$ , and Poisson’s ratio  $\nu$ . The class of medium-length shells has been considered.

In the elastic region of the material deformation, this structure is generally under the influence of external pressure  $q$  and axial (compressive or tensile) force  $T$ . Moreover, the prevailing effect of the external pressure in relation to axial compression is assumed, which leads to the buckling modes corresponding to the formation of one half-wave in the longitudinal direction and  $n$  waves in the circumferential one, along with this  $n^2 \gg 1$  [14].

The coordinates along the generatrix of the cylindrical and conical surfaces are marked with  $\bar{s}$  and  $s$ ,

respectively, the arc coordinate for the cylinder is  $y$ , and the angular coordinate along the parallel of the cones is  $\phi$ . The middle surface of each shell structure’s compartment is the surface of rotation with the following functions of a parallel circle radius in the cross section, which is perpendicular to the axis of rotation [5–7]:

– for the generalized barrel-shaped compartment:

$$r = R \left( 1 + C_{bar} \sin \frac{\pi \bar{s}}{L} \right), \quad (1)$$

where  $L$  is the distance between the bases,  $R$  is the compartment base radius,  $C_{bar}$  is the relative deviation of the shell generatrix from the cylinder;

– for the generalized ogive-type compartment:

$$r = \cos \alpha \left[ s + C_{og} l_1 \sin \frac{\pi(s-l_0)}{l_1-l_0} \right], \quad (2)$$

where  $l_0$  and  $l_1$  are the distances along the axis  $O_s$  to smaller and larger bases,  $\alpha$  is the cone angle at the base,  $C_{og}$  is the relative deviation of the shell generatrix from the cone.

The restrictions on the shell parameters are attained in [5–7], and the approximate values of the main curvature radii are obtained on the basis of equations (1) and (2):

– for the generalized barrel-shaped compartment:

$$\tilde{R}_1 = -\frac{(1+(r')^2)^{3/2}}{r''} \approx \frac{L^2}{RC_{bar}\pi^2 \sin \frac{\pi \bar{s}}{L}},$$

$$\tilde{R}_2 = r\sqrt{1+(r')^2} \approx R \left( 1 + C_{bar} \sin \frac{\pi \bar{s}}{L} \right),$$

– for the generalized ogive-type compartment:

$$\tilde{\tilde{R}}_1 \approx \frac{(l_1-l_0)^2}{C_{og}l_1\pi^2 \cos \alpha \sin \alpha \sin \Omega},$$

$$\tilde{\tilde{R}}_2 \approx \text{ctg } \alpha (s + C_{og}l_1 \sin \Omega),$$

$$\Omega = \frac{\pi(s-l_0)}{l_1-l_0}.$$

The signs of parameters  $C_{bar}$  and  $C_{og}$  determine the Gaussian curvature sign  $\kappa = 1/(R_1R_2)$  for the middle surface of the corresponding structure compartment.

In [5–7], the resolvent differential equations of the main stress-strain state are derived as to the de-



flection functions for each compartment:

$$a_4(\bar{x}) W_{bar}^{IV}(\bar{x}) + a_3(\bar{x}) W_{bar}'''(\bar{x}) + a_2(\bar{x}) W_{bar}''(\bar{x}) + a_1(\bar{x}) W_{bar}'(\bar{x}) + a_0(\bar{x}) W_{bar}(\bar{x}) = 0, \quad (3)$$

$$b_4(x) W_{og}^{IV}(x) + b_3(x) W_{og}'''(x) + b_2(x) W_{og}''(x) + b_1(x) W_{og}'(x) + b_0(x) W_{og}(x) = 0, \quad (4)$$

where  $\bar{x} = \bar{s} / L$ ,  $x = s / l_1$  and the variable coefficients of equations, being as follows  $a_i(\bar{x})$ ,  $i=1,4$ ,  $b_j(x)$ ,  $j=1,4$ , depend on the geometric characteristics of shells and external loads.

These papers also describe the specifics of applying the finite difference method to solve equations (3), (4), and the matrix method of the initial parameter to take into account the discreteness of the location of the intermediate rib, including the docking one:

$$W_{og}(1) = W_{bar}(0), \quad W_{og}'(1) = W_{bar}'(0), \quad (5)$$

$$W_{og}''(1) + G_2^* W_{og}'(1) = W_{bar}''(0),$$

$$W_{og}'''(1) - G_1^* W_{og}(1) = W_{bar}'''(0), \quad (6)$$

where  $G_1^*$  and  $G_2^*$  are the dimensionless rigidity parameters of the ribs in the plane of the initial curvature and from this plane, respectively. In this case, the matching condition of the generalized ogive and barrel-shaped sections is determined by the equality of tangent angles  $\beta$  to the middle meridians of the sections. Therefore, the docking rib location can be considered locally conical. In this context, the rigidity of the ribs is determined by the formulas:

$$G_1^* = G_1 \frac{1}{\cos^3 \beta}, \quad G_2^* = G_2 \frac{1}{\cos \beta},$$

$$G_1 = \frac{n^4 (n^2 - 1)^2 (EJ)_x^{ring}}{EhR^3},$$

$$G_2 = \frac{n^2 (n^2 - 1)^2 (EJ)_z^{ring}}{EhR^3 (n^2 + 1)}.$$

Here  $J_x^{ring}$ ,  $J_z^{ring}$  are the moments of inertia under bending the rib in the plane of the initial curvature and, accordingly, from its plane.

In the process of studying the cylinder-cone structure, we shall follow the idea of [3, 4], where the docking rib is broken into two parts corresponding

to its cylindrical and conical component, and, as a result, the rigidity is considered as

$$G_{cyl,1} = \frac{G_1}{2}, \quad G_{cyl,2} = \frac{G_2}{2},$$

$$G_{cone,1} = \frac{G_1}{2} \frac{1}{\cos^3 \alpha}, \quad G_{cone,2} = \frac{G_1}{2} \frac{1}{\cos \alpha}.$$

In this context, matching conditions (5) by means of the rib are persisted, and the conditions (6) are rewritten as

$$W_{og}'(1) + G_{cone,2} W_{og}'(1) = W_{bar}''(0) + G_{cyl,2} W_{bar}'(0),$$

$$W_{og}''(1) - G_{cone,1} W_{og}(1) = W_{bar}'''(0) + G_{cyl,1} W_{bar}(0).$$

In the case of the “cylinder-cone” structure, the following formulas are taken

$$W_{bar} = W_{cyl}, \quad W_{og} = W_{cone}.$$

## ANALYSIS OF NUMERICAL RESULTS

The compound shell structure has been selected for the numerical implementation, having the following characteristics:  $h = 3 \cdot 10^{-3}$  m,  $E = 6.87 \cdot 10^{10}$  Pa,  $\nu = 0.32$ . For the generalized ogive section, one has defined  $l_1 = 1.82$  m, and  $L = 2.5R$  has been accepted for the barrel-shaped section. Calculations have been carried out for the case of boundary conditions corresponding to the hinged support of the ends.

In [5, 7], the parameters are specified for the equally stable “barrel-ogive” structure for the case where  $l_0 = 0.45 l_1$ ,  $\alpha = 75^\circ$ . They correspond to the shell, and its ogive and barrel-shaped compartments have approximately equal values of critical pressures under the conditions of the hinged support of the ends. Such a selection is implemented by varying the parameters of the high profile of these compartments. The corresponding parameter values are  $C_{og} = 0.06258642604$ ;  $C_{bar} = 0.137$ .

Equally buckling shells, in particular, are characterized by a total loss of stability, both with the consideration of the intermediate ribs. The mentioned effect will be visualized below.

We will introduce the dimensionless loads such as axial force and critical pressure for consideration:

$$T^* = \frac{T}{Eh^2}, \quad q^* = \frac{q}{q_{cyl}},$$

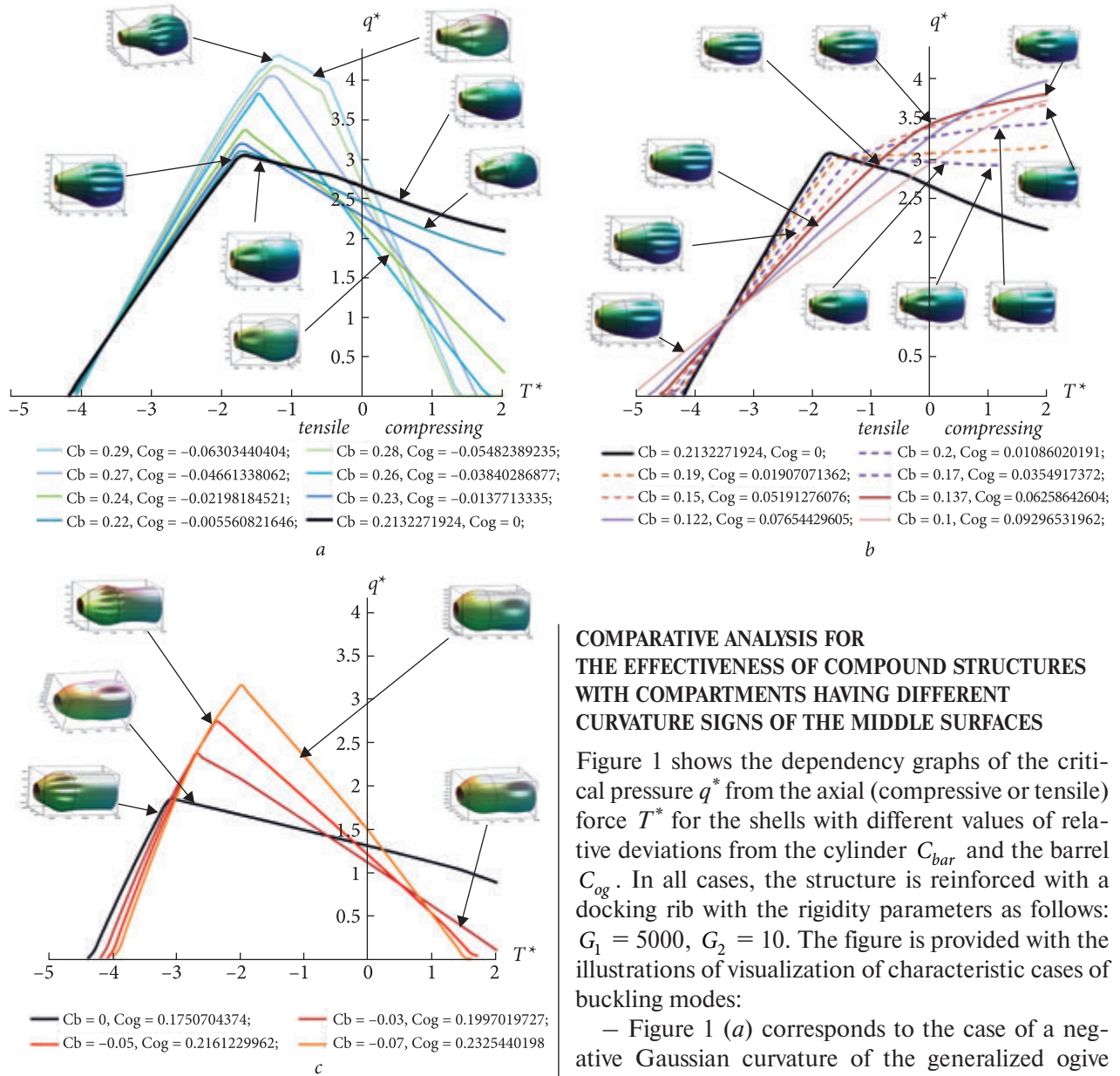


Fig. 1. Buckling loads with visualization

where

$$q_{cyl} = 0.92 E \left( \frac{h}{R} \right)^{5/2} \frac{R}{L}$$

is the classical value of the critical pressure for a cylindrical shell [14].

**COMPARATIVE ANALYSIS FOR THE EFFECTIVENESS OF COMPOUND STRUCTURES WITH COMPARTMENTS HAVING DIFFERENT CURVATURE SIGNS OF THE MIDDLE SURFACES**

Figure 1 shows the dependency graphs of the critical pressure  $q^*$  from the axial (compressive or tensile) force  $T^*$  for the shells with different values of relative deviations from the cylinder  $C_{bar}$  and the barrel  $C_{og}$ . In all cases, the structure is reinforced with a docking rib with the rigidity parameters as follows:  $G_1 = 5000, G_2 = 10$ . The figure is provided with the illustrations of visualization of characteristic cases of buckling modes:

- Figure 1 (a) corresponds to the case of a negative Gaussian curvature of the generalized ogive compartment, that is, for the “barrel-pseudo-ogive” structure. At the same time, a heavy black line corresponds to the “barrel-cone” structure;

- Figure 1 (b) is the case of a positive curvature of both compartments (the “barrel-ogive” structure). The dependence for the “barrel-cone” type system is presented as well;

- Figure 1 (c) is the case of a negative curvature of the generalized barrel-shaped compartment (the “pseudo-barrel-ogive” structure). A heavy black curve corresponds to the “cylinder-ogive” system.

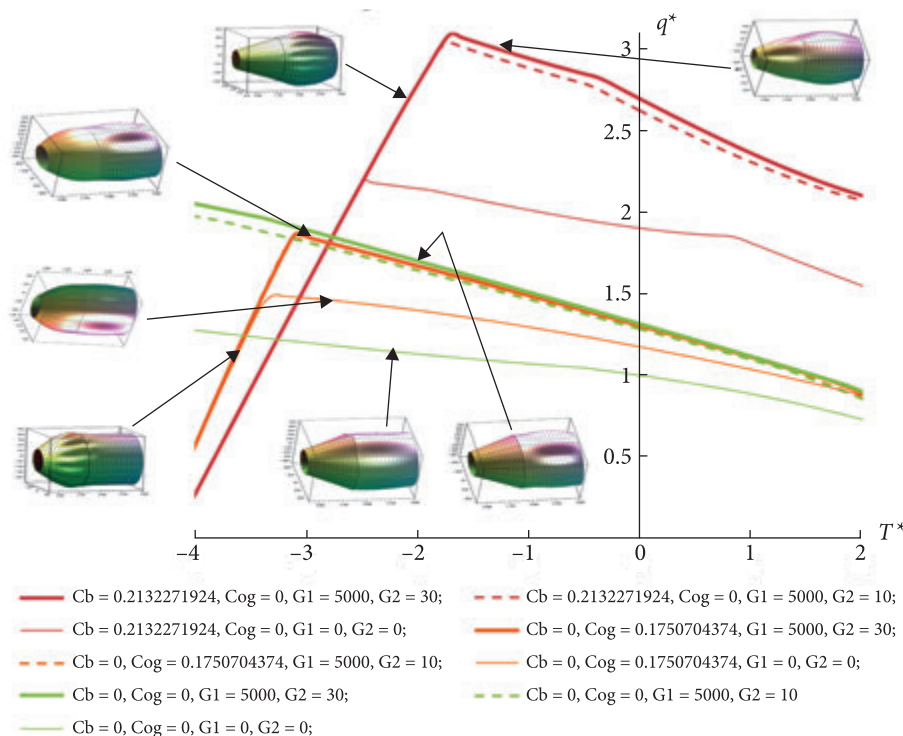


Fig. 2. Buckling loads and visualization of a structure with zero Gaussian curvature

Figure 2 shows the dependencies  $q^*$  on  $T^*$  for the structures in which at least one section (or both) has a zero Gaussian curvature. Cases of the structure's reinforcement with the docking rib having different rigidity parameters are considered.

Analysis of the results shows that under the combined action of uniform external pressure and axial compression, a structure having both compartments with the positive Gaussian curvature is more stable. With the combined effect of pressure and axial tension, it is advisable to introduce one of the compartments with the negative Gaussian curvature of the middle surface into the structure to increase the stability.

The visualization of the buckling modes shows that the general instability of the structure occurs when forming the buckling wave crest with the consideration of the rib for the equally stable "barrel-ogive" structure ( $C_{og} = 0.06258642604$ ;  $C_{bar} = 0.137$ ) under the action of uniform pressure and axial compression. Under axial tension for the parameters

$$C_{bar} = 0.28 (0.29),$$

$$C_{og} \approx -0.0548 (-0.063);$$

$$C_{bar} = -0.03 (-0.05, -0.07),$$

$$C_{og} \approx 0.2 (0.216, 0.233),$$

such a buckling mode is present in case of the negative curvature of the middle surface meridian on one of the compartments as well. Compound structures with just such parameters are the most effective according to the stability of behavior in the corresponding ranges of axial force variation.

#### THE EFFECT OF THE RIGIDITY PARAMETER OF A DOCKING RIB ON BUCKLING LOADS

The characteristic dependences of the effect of the rigidity parameters of the rib (in the plane  $G_1$  and from the plane  $G_2$  of its initial curvature) are shown in Fig. 2 for the shells with one of the sections with zero curvature of the middle surface. At the same time, the boundary curves are given in Fig. 3, which separate the stability region of the structure from the instability region (dependence  $q^*$  on  $T^*$ ) for the shells with different Gaussian curvature signs of the compartments.

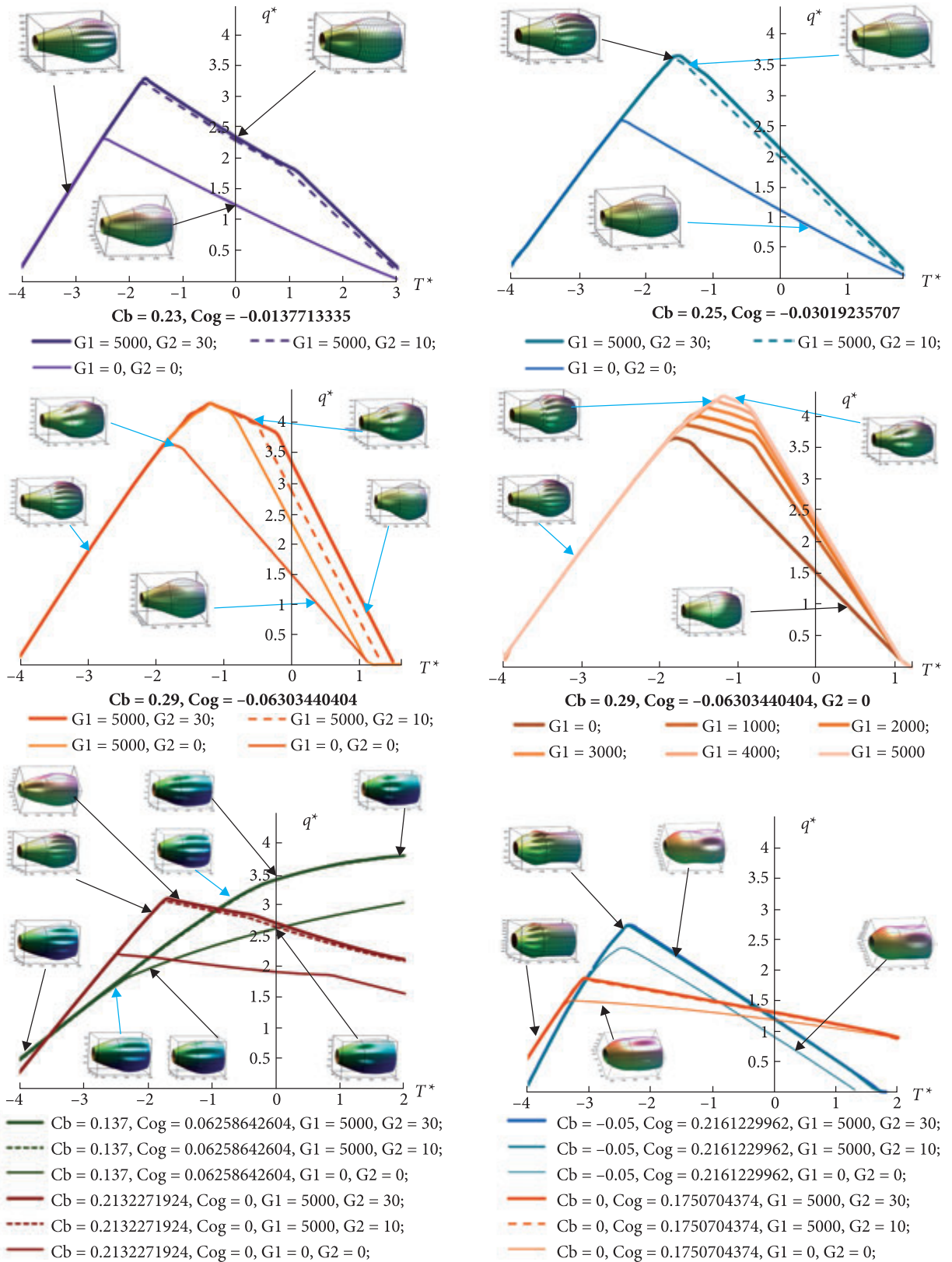


Fig. 3. Boundary buckling curves for the shells with different Gaussian curvature signs of the compartments

For the main part of the calculated structures, one has found a significant effect on the value of the critical loading for the rigidity parameter in the plane of the initial curvature  $G_1$  and an insignificant effect of the rigidity parameter from the plane of the initial curvature  $G_2$  in a certain range of the axial loading parameter  $T^* > T_1$ . For the parameter  $T^* > -1$ , the effect of the rigidity  $G_2$  can be significant.

The results of the numerical analysis make it possible to draw conclusions about the possibility of rational designing of the reinforced compound shell structures with different Gaussian curvatures in terms of the equivalence of the local and overall buckling modes.

## CONCLUSIONS

1. The hybrid analytical-numerical approach is proposed for the problem of the compound shell structure buckling under combined external loading with

the influence of the Gaussian curvature sign of the compartment middle surface.

2. Shell structures with the negative Gaussian curvature of the surface on one of the compartments are effective under the combined action of uniform external pressure and axial tension, and structures having two compartments with the positive curvature are effective under axial compression.

3. The results of compound structure calculations are given in terms of equal stability of the compartments. In each case of combining the curvature signs of shell compartments, the parameters of the middle surface high profile of the compartments, which correspond to the visualized effect of an equal global buckling mode, are indicated both for axial compression and tension

4. The effect of increasing the docking rib rigidity allows determining the rational characteristics of the shell system being studied.

## REFERENCES

1. Akimov D. V., Gryshchak V. Z., Gomenyuk S. I., Larionov I. F., Klimenko D. V., Sirenko V. N. (2016). Finite-Element Analysis and Experimental Investigation on the Strength of a Three-Layer Honeycomb Sandwich Structure of the Spacecraft Adapter Module. *Strength of Materials*, **48** (3), 379–383. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9775-y>
2. Boriseiko A. V., Zhukova N. B., Semenyuk N. P., Trach V. M. (2010) Stability of anisotropic shells of revolution of positive or negative Gaussian curvature. *Int. Applied Mechanics*, **46**, 269–278. <https://doi.org/10.1007/s10778-010-0307-3>.
3. Degtyarenko P. G., Gristchak V. Z., Dyachenko N. M. (2019) To the stability calculation of a combined shell structure taking into account the discreteness location of the intermediate rings. *Problems of Computational, Mechanics and Strength of Structures*, № 29, 113–131. <https://doi.org/10.15421/42190010> [in Russian].
4. Degtyarenko P. G., Grishchak V. Z., Grishchak D. D., Dyachenko N. M. (2019). To equistability problem of the reinforced shell structure under combined loading. *Space Science and Technology*, **25** (6), 3–14. <https://doi.org/10.15407/knit2019.06.003> / [in Russian].
5. Degtyarenko P. G., Gristchak V. Z., Gristchak D. D., Dyachenko N. M. (2020). Statement and basic solution equations of the stability problem for the shell-designed type “barrel-revived” under external pressure. *Problems of Computational Mechanics and Strength of Structures*, № 30, 33–52. <https://doi.org/10.15421/4219025> [in Russian].
6. Gristchak V. Z., Dyachenko N. M. (2020). *Axial force effect on the overall buckling of a compound reinforced shell structure with the positive Gaussian curvature at an external pressure*. Mathematical and computer modelling of engineering systems. Ed. by V. S. Hudramovich. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 35–49. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-019-3-3>
7. Gristchak V., Hryshchak D., Dyachenko N., Degtiarenko P. (2020) Stability and rational design of the «barrel-ogive» type strengthened shell structures under combined loading. *Eastern-European J. Enterprise Technologies*, **4/7** (106), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209228>
8. Hryshchak D. V. (2020) *Computer algebra in solving applied problems of structural mechanics with variable parameters*: monograph. Kherson: Helvetica Publishing House [in Ukrainian].
9. Huliaev V. I., Bazhenov V. A., Hotsuliak Y. O. (1982). *Stability of nonlinear mechanical systems*. Lviv: Vyshcha shkola, 255 p. [in Russian].
10. Ifayefunmi O. (2014). A survey of buckling of conical shells subjected to axial compression and external pressure. *J. Eng. Sci. and Technology Review*, **7** (2), 182–189.
11. Lukianchenko O. O., Paliy O. M. (2018) Numerical modeling of the stability of parametric vibrations of a high thin-wall shell of negative Gaussian curvature. *Strength of Materials and Theory of Structures*, № 101, 45–59. <https://doi.org/10.32347/2410-2537.2018.19.45-59> [in Ukrainian].

12. Schmidt H. (2018). Two decades of research on the stability of steel shell structures at the University of Essen (1985—2005): Experiments, evaluations, and impact on design standards. *Advances in Structural Engineering*, **21** (16), 2364—2392. <https://doi.org/10.1177/1369433218756273>
13. Teng J. G., Barbagallo M. (1997). Shell restraint to ring buckling at cone-cylinder intersections. *Engineering Structures*, **19** (6), 425—431. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(96\)00087-9](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(96)00087-9).
14. Volmir A. S. (1967) *Stability of deformable systems*. Moscow: Nauka [in Russian].

Стаття надійшла до редакції 14. 01.2022

Після доопрацювання 14.01.2022

Прийнято до друку 16.04.2022

Received 14. 01.2022

Revised 14.01.2022

Accepted 16.04.2022

В. З. Грищак<sup>1</sup>, проф., д-р техн. наук, акад. АН ВО України,  
акад. Міжнародної академії наук вищої школи, Заслужений діяч науки і техніки України  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8685-3191>  
E-mail: grk@znu.edu.ua

Д. В. Грищак<sup>2</sup>, заст. директора департаменту — нач. Управління науково-технічного розвитку ОПК  
Департаменту стратегії реформування ОПК, Міністерство з питань стратегічних галузей  
промисловості України, канд. техн. наук  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6474-6926>  
E-mail: d.hryshchak@mspu.gov.ua

Н. М. Д'яченко<sup>1</sup>, доцент, канд фіз.-мат. наук  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5284-4502>

В. В. Бабуров<sup>3</sup>, нач. сектору  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7202-5133>

<sup>1</sup> Запорізький національний університет  
вул. Жуковського 66, Запоріжжя, Україна, 69600

<sup>2</sup> Міністерство з питань стратегічних галузей промисловості України  
вул. Івана Франка, 21-23, Київ, Україна, 01054

<sup>3</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»  
вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

## ВПЛИВ ЗНАКУ ГАУССОВОЇ КРИВИНИ СЕРЕДИННОЇ ПОВЕРХНІ СКЛАДЕНОЇ ОБОЛОНКИ НА ЛОКАЛЬНЕ ТА ЗАГАЛЬНЕ ВИПИНАННЯ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Розглянуто проблему втрати стійкості пружної складеної оболонкової конструкції з різними знаками гауссової кривини серединної поверхні, особливо знаками кривини меридіана серединної поверхні, під впливом зовнішнього тиску та осьового зусилля. Робота продовжує попередні дослідження авторів та присвячена впливу негативного знаку гауссової кривини на одному з відсіків оболонкової конструкції на стійкість.

Розв'язування базується на застосуванні методу скінченних різниць для основних рівнянь стійкості кожного відсіку у випадку, коли один з них може бути з негативною кривиною меридіана, з урахуванням дискретності розміщення проміжних ребер та їхньої жорсткості з площини початкової кривини. Отриманий розв'язок дозволяє здійснити візуалізацію форми втрати стійкості для різних комбінацій зовнішнього навантаження та визначити раціональні з точки зору загальних форм втрати стійкості геометричні та жорсткісні параметри досліджуваної системи.

**Ключові слова:** втрата стійкості, оболонки, складена конструкція «бочка-оживало», знак гауссової кривини серединної поверхні, раціональна конструкція, комбіноване навантаження.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.04.039>  
УДК 523.68, 520.373, 520.8, 621.37.+551.553.5

**О. В. ГОЛУБАЄВ**<sup>1</sup>, нач. спостережної станції, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук  
E-mail: Alexandr\_sky1@ukr.net

**Ю. М. ГОРБАНЬОВ**<sup>2</sup>, нач. спостережної станції, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук  
E-mail: skydust@ukr.net

**О. В. ШУЛЬГА**<sup>3</sup>, директор, д-р фіз.-мат. наук  
E-mail: shulga-av@ukr.net

**О. А. АНДРЕЄВ**<sup>4</sup>, директор  
E-mail: oa\_andreev@ukr.net

**Ф. І. БУШУЄВ**<sup>3</sup>, наук. співроб.  
E-mail: felix.bushuev@ukr.net

**А. П. ВІДЬМАЧЕНКО**<sup>5</sup>, гол. наук. співроб., д-р фіз.-мат. наук  
E-mail: vida@mao.kiev.ua

**Б. О. ГРУДИНІН**<sup>6</sup>, декан факультету технологічної і професійної освіти, д-р пед. наук  
E-mail: b.hrudynin@ukr.net

**Б. Є. ЖИЛЯЄВ**<sup>5</sup>, зав. лаб., д-р фіз.-мат. наук  
E-mail: zhilyaev@mao.kiev.ua

**М. П. КАЛЮЖНИЙ**<sup>3</sup>, зав. сектору, канд. фіз.-мат. наук  
E-mail: nikalyuzhny@ukr.net

**П. М. КОЗАК**<sup>7</sup>, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук  
E-mail: kpm@knu.ua

**М. О. КУЛІЧЕНКО**<sup>3</sup>, зав. сектору, канд. фіз.-мат. наук  
E-mail: niiko4kulichenko@gmail.com

**Є. В. МАЛИНОВСЬКИЙ**<sup>4</sup>, зав. відділу  
E-mail: malinovskyyeugeniy@gmail.com

**А. М. МОЗГОВА**<sup>7</sup>, мол. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук  
E-mail: alenamozgova@ukr.net

**С. Г. САВЧУК**<sup>8</sup>, професор, д-р техн. наук  
E-mail: ssavchuk@polynet.lviv.ua

**О. Ф. СТЕКЛОВ**<sup>5</sup>, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук  
E-mail: stec36@i.ua

**Ю. П. СУМАРУК**<sup>9, 10</sup>, пр. наук. співроб., д-р фіз.-мат. наук  
E-mail: yurisumaruk@gmail.com

**Л. М. ЯНКІВ-ВІТКОВСЬКА**<sup>8</sup>, доцент, канд. фіз.-мат. наук  
E-mail: luba\_y@ukr.net

<sup>1</sup> Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна  
Майдан Свободи 4, Харків, Україна, 61022

<sup>2</sup> НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені І. І. Мечникова  
вул. Маразліївська 1 В, Одеса, Україна, 65000

Цитування: Голубаєв О. В., Горбаньов Ю. М., Шульга О. В., Андреев О. А., Бушуєв Ф. І., Відьмаченко А. П., Грудинін Б. О., Жилиєв Б. Є., Калюжний М. П., Козак П. М., Куліченко М. О., Малиновський Є. В., Мозгова А. М., Савчук С. Г., Стеклов О. Ф., Сумарук Ю. П., Янків-Вітковська Л. М. Створення Української метеорної спостережної мережі: інструменти, методи обробки, спостережні можливості. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 4 (137). С. 39—70. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.039>

<sup>3</sup> Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія»  
вул. Обсерваторна 1, Миколаїв, Україна, 54030

<sup>4</sup> Рівненська Мала академія наук учнівської молоді  
вул. Симона Петлюри 17, Рівне, Україна, 33013

<sup>5</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

<sup>6</sup> Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка  
вул. Києво-Московська 24, Глухів, Україна, 41400

<sup>7</sup> Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка  
вул. Обсерваторна 3, Київ, Україна, 04053

<sup>8</sup> Національний університет «Львівська політехніка»  
вул. Степана Бандери 12, Львів, Україна, 79013

<sup>9</sup> Інститут геофізики імені С. І. Субботіна НАН України  
просп. Академіка Палладіна 32, Київ, Україна, 03680

<sup>10</sup> ДУ Національний антарктичний науковий центр МОН України  
бул. Тараса Шевченка, 16, Київ, Україна, 01601

## СТВОРЕННЯ УКРАЇНСЬКОЇ МЕТЕОРНОЇ СПОСТЕРЕЖНОЇ МЕРЕЖІ: ІНСТРУМЕНТИ, МЕТОДИ ОБРОБКИ, СПОСТЕРЕЖНІ МОЖЛИВОСТІ

*Розглядається питання про розвиток метеорної астрономії в Україні. Специфіка методів спостережень метеорів вимагає передусім організації мережі кореспондуючих пунктів спостережень. Для досягнення цієї мети пропонується об'єднати науково-технічні можливості організацій-учасників у вигляді Української метеорної спостережної мережі (УМСМ). УМСМ — це сукупність двох або більше перманентних спостережних станцій, розташованих на території України, які мають технічне та програмне забезпечення для базисних і односторонніх спостережень метеорів у різних діапазонах довжин хвиль та проводять такі спостереження. УМСМ ставить на меті дослідження метеорів, структури і еволюції метеорних роїв та потоків, взаємодії метеороїдів з атмосферою Землі та їхнього хімічного складу. Науково-технічною продукцією станцій УМСМ будуть результати високоточних базисних або односторонніх спостережень метеорів в різних діапазонах довжин хвиль, фундаментальних і прикладних науково-технічних досліджень.*

**Ключові слова:** метеор, метеорний потік, метеорна спостережна мережа, оптичні відеоспостереження, пасивні радіоспостереження, метеорні каталоги.

### ВСТУП

Разом з кометами, астероїдами, великими планетами з їхніми супутниками Сонячна система містить велику кількість дрібних твердих тіл — метеороїдів, що мають маси в інтервалі  $10^{-7} \dots 10^6$  кг. Це фрагменти комет, астероїдів, залишки пилової речовини, утвореної при зародженні Сонячної системи, а в деяких випадках метеороїди мають міжзоряне походження. Проникнення у земну атмосферу цих тіл спостерігається у вигляді метеора — надзвичайно багатопланового явища, яке відбувається внаслідок входу метеорного тіла в атмосферу на досить великій швидкості 11...73 км/с. Взаємодія метеороїда з атомами та молекулами атмосфери супроводжується багатьма фізико-хімічними процесами і явищами, враховуючи збудження атмосферних атомів

та молекул, їхню іонізацію з подальшими переходами у незбуджений стан та випромінювання фотонів відповідних довжин хвиль. Випромінювання виникає на етапі входження частинки у верхні шари атмосфери. Спочатку відбувається взаємодія холодної поверхні метеороїда з атомами атмосфери, під час якої спектр випромінювання, з великою імовірністю, формують атоми земної атмосфери та легких елементів метеорного тіла (натрій і калій). Під час нагрівання метеороїда відбувається здування поверхневої плівки тіла — так зване холодне розпилення — процес випромінювання стає інтенсивнішим. Коли поверхня метеороїда починає плавитися, випромінювання завдяки відносно високій інтенсивності може спостерігатися сучасними оптичними приладами вже на висотах 150...125 км. Кінцевий етап життя метеороїда малої маси — інтенсивне



випаровування його речовини — проходить досить швидко, що супроводжується надзвичайно інтенсивною абляцією тіла — втратою маси — та інтенсивним світінням метеорної коми. Залишки великих, та, як правило, відносно повільних метеороїдів можуть випасти на земну поверхню у вигляді метеоритів.

Спостереження метеорів допомагають вирішити ряд задач сучасної астрономії та фізики як фундаментального, так і практичного характеру. Усі ці знання можна отримати завдяки обробці та аналізу результатів спостережень метеорів, отриманих із застосуванням оптичних та радіолокаційних методів. Кожен з цих методів має свої переваги перед іншими, але узагальнюючи в цілому результати обробки спостережень, отримуємо достатньо повні та достовірні відомості про природу метеорних тіл. Не викликає сумніву позитивна роль метеорних спостережень для встановлення генетичного зв'язку метеороїдів з кометами та астероїдами, як шляхом порівняння елементів геліоцентричних орбіт та їх еволюції, так і через встановлення ідентичності хімічного складу за спектральними спостереженнями метеорів. Спектри метеорів надають інформацію про умови збудження, світіння та іонізацію метеорної плазми, температуру, процеси абляції, фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час метеорних явищ в атмосфері Землі, маси метеороїдів, причини і характер протікання спалахів, якісний та кількісний хімічний склад метеорного тіла і концентрації елементів у метеороїдах, а отже, і про тугоплавку складову ядер комет і астероїдів. Спостереження метеорів у радіодіапазоні, які базуються на ефекті відбиття радіохвиль від іонізованого сліду метеора, мають починатися з самого початку взаємодії космічної частинки з атомами атмосфери. Але, подібно до оптичних спостережень, початок видимості метеора визначається чутливістю спостережної апаратури. Особливістю методу радіоспостережень є їхня незалежність від часу доби чи погодних умов.

Детектування метеора є складним завданням з технічної точки зору. Потрібні високочутливі камери і радіоприймачі, якісні дисперсійні елементи (для отримання спектрів метеорів) та тривалий час спостережень за якомога більшими

ділянками неба. До 1990-х рр. в оптичному діапазоні для фіксації метеорів використовувалась фотографічна емульсія та світлочутливі електронні вакуумні телевізійні трубки. Починаючи з 1950-х рр. в Україні в наукових установах Одеси та Києва були створені метеорні мережі, оснащені фотографічними камерами та відеосистемами для спостережень метеорів. Фотографічний метеорний патруль на базі однотипних камер НАФА ЗС/25 (об'єктив «Уран-9», діаметр  $D = 100$  мм, фокусна відстань  $F = 250$  мм, розмір кадру плівки  $180 \times 240$  мм, поле зору  $39^\circ \times 53^\circ$ ) міг фіксувати фотографічним методом метеори, яскравіші від нульової зоряної величини. Відповідно до досліджень для таких метеорних патрульних установок середнє значення порогу реєстрації відповідає  $-1.5 \pm 1.0^m$ . Слабші метеори могли фіксувати тільки такі унікальні прилади, як телескопи системи супершмідт, але навіть у них поріг реєстрації не перевищував  $+3.5 \pm 0.3^m$ . Метеори до  $+12^m$  і навіть слабші виявлялися тільки радіолокаційним методом, але в цьому випадку йдеться в основному лише про іонізований слід метеора. Певний час у використанні були спостережні комплекси на основі телевізійних передавальних трубок, електронно-оптичних перетворювачах (ЕОП) або комбіновані ширококутні телевізійні системи. Такі телевізійні системи дозволяють реєструвати метеори до  $+5^m \dots +7^m$ . Наразі такі приймачі застаріли і вже не застосовуються, що є однією з багатьох причин (зокрема економічного характеру) тривалого припинення роботи метеорних мереж в Україні після 1990-х рр. Нові спостережні можливості у метеорній астрономії дали сучасні світлочутливі приймачі на основі КМОП-технологій (CMOS, Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). В останні роки широке використання сучасних відеосистем (так званих CCTV-камер) та радіолокації призвело до створення великих баз даних метеорів, які, зокрема, надають інформацію про рівень метеорної активності протягом року, розподіл метеорів за абсолютною світністю та масою, а також про елементи їхніх геліоцентричних орбіт. Незважаючи на фіксацію багатьох мільйонів метеорних явищ, все ж дуже мало було зібрано спектральних даних для метеорів різно-

манітних потоків та спорадичного фону — тому кожен метеорний спектр становить значну наукову цінність. В Україні спектральні спостереження метеорів активно провадилися колективами наукових установ з 1957 до 1990 рр. і відновилися лише з 2018 р. із застосуванням сучасних світлочутливих відеокамер та цифрової обробки результатів спостережень.

Статистичне накопичення інформації про фотометричні параметри метеорів і кінематичні параметри (швидкість, висоту, атмосферну траєкторію) метеорних тіл з обчисленими геліоцентричними елементами орбіт вирішують за допомогою відео-базисних (одночасних двохсторонніх) спостережень. Найбільше інформації можна отримати у складі так званих багатостанційних метеорних спостережних мереж, які перекривають значно більшу частину атмосфери на висотах 80...130 км, ніж одинокі пари станцій. Проблемою тут є необхідність наявності двох або більше одночасно працюючих спостережних станцій та накопичення великих об'ємів астроінформації, враховуючи зведення даних з різних станцій.

Застосування широкоформатних ССТV-камер у наш час є найпоширенішим, тому що вони дозволяють найбільш ефективно патрулювати й фіксувати метеори, яскравіші від  $+5^m$ , на великій площі видимої небесної півсфери. Об'єднання оптичних можливостей телескопа (довгофокусних світлосильних об'єктивів) і технічних характеристик КМОН-детектора (ССТV-камер) дозволяє змістити поріг реєстрації метеорів в оптичному діапазоні до  $+10^m$  і навіть слабкіше. Такий діапазон метеорних тіл раніше був найменш вивчений в оптичному діапазоні, так само як і були відсутні дотепер високоточні каталоги з їхніми елементами орбіт, кінематичними й фізичними характеристиками. Описані спостереження, завдяки їхній високій чутливості і хорошій просторовій роздільній здатності, можуть пролити світло на такі важливі питання, як: тонка структура метеороїда, який іноді на початку вльоту в атмосферу уже є мікророем частинок; подальше дроблення метеороїдів зі зміною траєкторій та швидкостей їхніх окремих компонентів тощо. Беззаперечну цінність становлять спектральні спостереження, які дають змогу оці-

нити хімічний склад метеороїда, причому спектральні спостереження можуть проводитись з ширококутними камерами під час базисних спостережень. Позитивний ефект формування зображення спектру досягається лише для метеорів, яскравіших від  $-2^m$ .

Ідеальним варіантом комплексного дослідження метеорів є організація спостережних мереж з максимально можливою кількістю станцій, оснащених усіма можливими засобами спостережень: ширококутними спостереженнями метеорів для базисної обробки і визначення параметрів траєкторії метеора в атмосфері Землі та елементів його геліоцентричної орбіти; довгофокусними спостереженнями для виявлення та аналізу тонкої структури метеора; спектральними спостереженнями для визначення хімічного складу космічної частинки; радіоспостереженнями як альтернатива нічним спостереженням та засобом визначення ступеня іонізації метеорного сліду; іншими засобами спостережень, які дозволили б доповнити набір інформації про кожен метеор. Натомість на сьогоднішній день доводиться обмежуватися інформацією про метеори, отриманою окремими спостерігачами або групами спостерігачів.

Наразі спостереженням метеорів різними методами та апаратурою приділяється увага у багатьох наукових установах України [7]. Це дає змогу об'єднати наукові зусилля з вивчення метеорів у вигляді Української метеорної спостережної мережі (УМСМ). УМСМ — це сукупність двох або більше перманентних спостережних станцій, розташованих на території України (рис. 1), які мають технічне та програмне забезпечення для проведення базисних та односторонніх спостережень метеорів у різних діапазонах довжин хвиль і проводить такі спостереження.

Головною задачею УМСМ є об'єднання зусиль організацій-учасників у галузі проведення регулярних базисних та односторонніх спостережень метеорів у різних діапазонах довжин хвиль, а також обмін результатами спостережень, їхня обробка та аналіз спостережних даних. УМСМ вирішує стратегічні проблеми дослідження метеорів, структури і еволюції метеорних роїв та потоків, взаємодії метеороїдів з атмосферою



**Рис. 1.** Організації-учасники Української метеорної спостережної мережі: Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені І. І. Мечникова (м. Одеса); Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка (м. Київ); Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (м. Миколаїв); Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України (м. Київ); Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна (м. Харків); Національний університет «Львівська політехніка» (м. Львів); Обласний комунальний позашкільний навчальний заклад «Рівненська Мала академія наук учнівської молоді» (м. Рівне); Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка (м. Глухів Сумської обл.)

Землі та їхнього хімічного складу. Науково-технічною продукцією станцій УМСМ є результати високоточних базисних або односторонніх спостережень метеорів у різних діапазонах довжин хвиль, фундаментальних і прикладних науково-технічних досліджень.

У даній роботі представлено короткий огляд створеної Української метеорної спостережної мережі за участю наукових установ, розташованих у містах Одеса, Київ, Миколаїв, Харків, Львів, Рівне, Глухів. Приводяться основні параметри спостережних інструментів, методи обробки та спостережні можливості організацій-учасників УМСМ. Для порівняння розглянемо роботу метеорних спостережних мереж у розвинутих країнах, яких створюється дедалі більше.

#### ДІЮЧІ СВІТОВІ МЕРЕЖІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТЕОРІВ

Розгляд і загальний аналіз діяльності метеорних спостережних мереж почнемо з Центру Метеорних Даних (MDC), який підтримується комі-

сією F1 Міжнародного Астрономічного Союзу [43]. База даних містить інформацію про параметри 4873 метеори з надійно обчисленими орбітами, отриманих в епоху фотографічних спостережень. Сайт MDC містить ряд посилань на інші метеорні мережі, а також номенклатурну інформацію про відомі метеорні потоки.

Останнім часом до MDC (версія сайту 2016 р.) включено дані відеоспостережень 110521 метеора, отримані в рамках проекту *CAMS* (Cameras for All sky Meteor Surveillance) — камер-огляду всього неба з метою детектування метеорів [61]. Проєкт був організований під керівництвом Пітера Енніскенса (Peter Jenniskens) (SETI, NASA) і Пітера Гурала (Peter S. Gural) для уточнення даних про слабкі метеорні потоки і фінансувався з 2008 р. NASA. Особливістю даного проєкту було використання блоку телевізійних камер з відносно невеликими полями зору у кожній, але скомпонованих так, щоб охоплювати все небо — на відміну від поодиноких класичних камер типу «риб'яче око». Таке поєднання дозволяє доби-

тися значно вищої точності астрометричної обробки відеоспостережень, і, як наслідок, вищої точності визначення елементів геліоцентричних орбіт метеороїдів. Спочатку дві платформи з 20 камерами на кожній було встановлено на Обсерваторії Пік Фремонт (Fremont Peak Observatory) і Лікській Обсерваторії (Lick Observatory). Третю платформу було встановлено в обсерваторії міста Маунтін-Вью (Mountain View Observatory), всі розміщені в штаті Каліфорнія, США. Надалі спостережна мережа почала своє поширення на інші штати США, країни і континенти. Дві станції було встановлено у Флориді і на Східному березі США; дві професійні станції запрацювали в Новій Зеландії; три станції були встановлені у 2016 р. в Об'єднаних Арабських Еміратах, а також в Ловеллівській Обсерваторії в Арізоні, США. У 2017 р. розпочала свою роботу спостережна станція у Південній Африці. Перший аналіз спостережних даних був зроблений у 2013 р. і налічував 110367 орбіт (дані опубліковані в науковому журналі «Icarus»). В результаті спостережень було відкрито ряд нових слабких метеорних потоків, а також уточненню дані про маловідомі потоки. На кінець 2016 р. база даних SAMS накопичила 447230 досить точних метеорних орбіт. На даний момент метеорна мережа SAMS є однією з найбільш глобальних — вона має спостережні станції в США (Арізона, Арканзас, Каліфорнія, Флорида, Меріленд, Північна Каліфорнія), в Австралії, країнах Бенілюксу, Бразилії, Чилі, Намібії, Нової Зеландії, Південній Африці, Об'єднаних Арабських Еміратах.

Продовжуючи огляд діяльності метеорних спостережних мереж, слід відзначити *Болідну Мережу Всього Неба NASA (NASA All-sky Fireball Network)* [62]. Болідну мережу (для спостережень яскравих метеорів, тобто умовно яскравіших за Венеру) створено Управлінням Метеороїдного Навколишнього середовища (МЕО) при NASA. Отримані дані спостережень планується використовувати для моделювання метеороїдного оточення, що є важливим для розробників космічних апаратів. У даний момент мережа складається з 17 камер, шість з яких розміщено у Північній Алабамі, Південному Теннесі, Північній Каліфорнії. Також три камери розташовано в

районі Пенсильванії, 5 на півдні Нью-Мексико і в Арізоні, три — у Флориді. Мережа розширюється також при школах, наукових центрах, планетаріях, а також обсерваторіях США. Для спостережень використовуються спеціалізовані чорно-білі камери всього неба. Результати спостережень великих і відносно повільних болідів використовуються також для пошуку їхніх потенційно можливих залишків на поверхні Землі — метеоритів.

На цей час дуже потужною є *Японська Мережа аматорів метеорної астрономії SonotaCo (SonotaCo Network Japan)* [67]. Спостережну метеорну мережу SonotaCo організовано ентузіастами метеорної астрономії, і вона вельми успішно функціонує протягом більш ніж десяти років. Завдяки програмному забезпеченню, розробленому СонотаКо як для автоматичного захоплення відеопотоку з аналогових камер, так і для аналізу зображень, дана мережа накопичила досить велику кількість даних. Як правило, використовуються чорно-білі досить чутливі відеокамери типу Watec WAT-100N і WAT-902H2 Ultimate, оснащені об'єктивами, що забезпечують поле зору  $45^\circ \times 55^\circ$ . Починаючи з 2007 року, бази даних результатів обробки спостережень даної мережі налічують в середньому 20000...25000 метеорів на рік, спостережених з більш ніж двох пунктів. Використовувані камери і програмне забезпечення рекламуються розробником і для спостережень геофізичних утворень в атмосфері, таких як ельфи, спрайти і т. п.

*Іспанська Метеорна Мережа SPMN (Spanish Meteor Network)* [66], відома також під назвою Іспанська болідна Мережа, була заснована у 1997 р. для вивчення міжпланетної матерії, пошуку і дослідження метеоритів. Учасниками цієї мережі є як астрономи-професіонали, так і аматори, які самі розробили камери спостереження всього неба. Основними завданнями мережі є вивчення механізму взаємодії метеороїдів з атмосферою, вивчення динаміки метеорних потоків і уточнення механізмів доставки міжзоряної речовини на Землю, а також можливість занесення форм життя ззовні.

Європейську метеорну робочу групу *EDMOND (The European viDeo MeteOr Network Database)*, що

веде і проводить аналіз каталогу орбіт метеорів, дані для якого отримує з різних спостережних метеорних мереж, які співпрацюють з цією групою [29], було організовано у 2011 — 2012 рр. в результаті спонтанної взаємодії спостерігачів метеорів, а її перша версія була ініційована Якубом Коукелом (Jakub Koukal) і Романом Піффлом (Roman Piffll). Сучасна версія даної європейської робочої групи складається із спостерігачів (як професіоналів, так і аматорів метеорної астрономії) з таких локальних мереж-учасників країн Європи: BOAM (Франція), BosNet (Боснія), CEMeNt (Центральна європейська метеорна мережа — в основному Чехія і Словаччина), CMN (Хорватія), FMA (Швейцарія), HMN (Угорщина), IMO (Міжнародна метеорна організація), MeteorsUA (Україна), IMTN (Італія), NEMETODE (Англія), PFN (Польща), Stjerneskund (Данія), SVMN (Словаччина), UKMON (Англія). Мережа використовує програмне забезпечення UFO (розроблене СонотаКо з Японії). Як видно зі списку, моніторинг метеорної активності відбувається практично по всій Європі. Протягом спостережень мережею було зареєстровано понад 4.5 млн індивідуальних односторонніх метеорів, з них 592699 було зареєстровано з більш ніж однієї станції, тому для них були розраховані параметри траєкторії і орбіти. За результатами обробки багато-станційних спостережень в останню базу даних 2020 р. були включені 346039 метеорів зі спостережень 2007—2020 рр.

Ще однією, недавно створеною метеорною мережею з метою глобального охоплення атмосфери планети є Глобальна Метеорна Мережа (GMN). Основна задача даної мережі — дослідження слабких метеорів. Для цієї задачі використовуються ширококутні камери з полем зору  $88^\circ \times 48^\circ$  та здатністю реєструвати метеори до  $+6^m$ . На даний момент мережа включає 450 інстальованих відеокамер у 30 країнах світу. З грудня 2018 по червень 2021 рр., тобто за 2.5 роки було отримано 220000 високоточних орбіт [68]. Важливою особливістю даної мережі є її робота в реальному режимі часу — розроблене програмне забезпечення дозволяє не лише автоматично детектувати метеори як динамічні події, але і автоматично пересилати файли зображень на сервер, де також

автоматично відбувається їхня базисна обробка (достовірність і точність при такому підході достеменно поки що невідомі). Кінцевою метою авторів проекту є додавання параметрів спостережуваних метеорів до бази даних не пізніше, ніж через добу.

Безумовно, наведений перелік метеорних спостережних мереж не охоплює весь спектр спостережень метеорів, якими незалежно займаються також більшість університетів та інших наукових організацій, публікуючи епізодично результати своїх спостережень в наукових журналах, так само як і їхній аналіз, інтерпретацію та моделювання фізики явищ. Крім того, в роботі не наводиться інформація про радарні спостереження метеорів, які проводяться у світі і надають інформацію про найдрібніші космічні частинки. Розглянуті у вступі метеорні спостережні мережі є найбільшими, і надають для аналізу вченим максимум інформації про метеори в оптичному діапазоні довжин хвиль.

Наразі у багатьох наукових установах України активно приділяють увагу спостереженням метеорів різними методами та апаратурою. Кожна обсерваторія оснащена усіма можливими засобами спостережень. Це дає змогу об'єднати наукові зусилля з вивчення метеорів у вигляді Української метеорної спостережної мережі.

#### ОРГАНІЗАЦІЇ-УЧАСНИКИ УКРАЇНСЬКОЇ МЕТЕОРНОЇ СПОСТЕРЕЖНОЇ МЕРЕЖІ

*Науково-дослідний інститут «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.* Регулярні спостереження в Одеській астрономічній обсерваторії почалися в 1953 р. за допомогою створеного Е. Н. Крамером та Н. І. Тимченко фотографічного метеорного патруля [16]. Патруль складався з чотирьох аерофотокамер з об'єктивами F-24 (фокусна відстань об'єктива 200 мм, світлосила 1:2.9, поле зору —  $48^\circ$ ). Перед об'єктивом обертався об'єктиватор з кутовою швидкістю 24 об/с. На той час метеорні дослідження ще не входили в наукові плани Одеської обсерваторії, але практика фотографічного метеорного патрулювання та розробка методів вимірювань фотографічних зображень метеорів дозволила у 1957 р. вивести метео-

рні дослідження на новий рівень. Цьому сприяв Міжнародний Геофізичний Рік (МГР) та досвід метеорних спостережень, отриманий в обсерваторії. Одеську обсерваторію було включено у програму Міжнародного Геофізичного Року, а Робоча група Комісії з комет і метеорів Астрономічної Ради АН СРСР затвердила Одеську астрономічну обсерваторію Головною установою в СРСР з проблеми «Дослідження метеорів» (розділ «Іоносфера»). Обсерваторія вперше отримала достатнє фінансування з метеорної тематики, вдвічі збільшивши контингент наукових співробітників. Обсерваторія побудувала три спостережні станції: в с. Маяки, с. Крижанівка Одеської обл., та у Ботанічному саду Одеського університету в районі Аркадії. Фотографічні метеорні патрулі працювали до 1993 р., у спостереженнях, вимірюваннях та обробці результатів спостережень метеорів в різний час брав участь великий колектив співробітників обсерваторії. За роки патрулювання отримано понад 600 зображень базисних метеорів та декілька тисяч небазисних метеорів.

Отримані на одеських метеорних патрулях дані послуговували основою для публікації декількох сотень наукових статей та повідомлень, матеріалом для захистів двох докторських (Е. Н. Крамер, І. С. Шестака) та восьми кандидатських дисертацій (Е. Н. Крамер, І. С. Шестака, В. А. Воробйова, В. О. Смирнов, І. М. Ковшун, Ю. М. Горбаньов, О. А. Базей, О. В. Голубаєв), а результати спостережень увійшли до Світового Центру Даних. На жаль, техніка метеорних патрулів застаріла і потребувала істотної модернізації, нових приймачів ще не існувало, або вони були рідкісними та дорогими.

Для продовження ефективного метеорного патрулювання стала потрібною нова ідеологія і нові технічні засоби. У часи перших років незалежності України (1991—2000 рр.), проводилися лише теоретичні роботи. В роботі [17] досліджувалися фізичні процеси, які супроводжують спалахи яскравих метеорів, зокрема деформації стандартної кривої блиску метеорів, на кінцевій ділянці яких спостерігається різке збільшення випромінювання (спалах). Структура метеорного рою у будь-який момент зале-

жить від орбітальних елементів батьківського тіла, його орбітального положення та швидкості руху метеорних частинок на момент їхнього викидання. Розрахунки ймовірностей орбітальних елементів метеорних частинок як функція віку рою обчислювалися для конкретних елементів орбіти та орбітального положення батьківського тіла та деяких середніх швидкостей ізотропного викиду метеорних частинок [39]. Показано, що викид в афелії батьківського тіла відповідає компактному, більш стабільному метеорному рою. При викиді у перигелії зі швидкістю порядку 1...1.5 км/с, рій після 20...30 років набуває форми порожнистого тороїда, обсяг якого з часом збільшується. Концентрація частинок у рої поступово зменшується, що призводить до зменшення ймовірності зустрічі Землі з багатим метеорним потоком.

У роботі [52] показано, що двовимірний розподіл за нахилом орбіти та аргументом перигелію для найдрібніших метеорних часток свідчить про їхній генетичний зв'язок з довгоперіодичними і майже параболічними кометами. Особливий інтерес становлять орбіти частинок космічного пилу, лінії апсид яких осцилюють поблизу деякого квазістаціонарного стану. Гравітаційні збурення в цьому випадку призводять до зміни в широкому діапазоні перигелійних відстаней і нахилу орбіти, а ефект Пойнтінга — Робертсона — до зменшення розмірів орбіти.

Результати розрахунків [33, 36] стали основою комп'ютерної моделі, яка за допомогою методу статистичних випробувань дозволяє за заданими розподілами для метеороїдного рою згенерувати елементи орбіт  $N$  частинок, а потім на основі моделі руху Землі і метеороїда здійснити відбір модельних частинок метеорного потоку. Проведено тестування моделі із залученням спостережного матеріалу Світового Центру даних для метеорного потоку Гемініди. За результатами обчислень встановлено, що спочатку незалежні елементи орбіт метеороїдного рою після зустрічі із Землею і формування метеорного потоку за рахунок урахування тільки геометричного фактора селекції, стають залежними. Це у першу чергу стосується таких елементів, як велика піввісь орбіти, ексцентриситет і довгота висхідного вузла. Нахил

орбіти метеорної частинки метеорного потоку Гемініди є найменш уразливим орбітальним параметром для геометричної селекції [37].

Створено комп'ютерну модель [35] метеорного явища, яка дозволяє отримати стандартну світлову криву блиску метеора за заданими швидкістю, кутом вльоту метеора, масою та густиною частинки.

Провести модернізацію метеорного патруля на Одеській астрономічній обсерваторії з об'єктивних і суб'єктивних причин вдалося лише в червні 2003 року. Було використано комбінацію телескопічного і телевізійного методів, вибір телескопа системи Шмідта (рис. 2) був зумовлений, звичайно, його світлосилою і порівняно великим полем зору. Вперше було використано модель телевізійної камери Watec LCL 902K, а надалі — моделі 902H, 902H2 та 902H2 Ultimate [34]. Наразі телескоп Шмідта та згадані телевізійні камери будуть використані для спостережень метеорів у рамках функціонування УМСМ.

Загалом використовується широкий вибір апаратури: від телескопа Шмідта  $F = 540$  мм,  $F/D = 2.25$  (поле зору  $FOV = 0.68^\circ \times 0.51^\circ$ , гранична зоряна величина  $+13.5^m$ , астрометрична точність  $1'' \dots 2''$ ) (рис. 2) до ширококутних з  $F = 8$  мм,  $F/D = 3.5$  ( $FOV = 36^\circ \times 49^\circ$ , гранична зоряна величина  $+7^m$ ). База даних спостережень, які були зібрані у період з 2003 по 2018 рр. містить 15535 зареєстрованих метеорних подій. Для обробки телевізійних спостережень метеорів було створено пакет програмного забезпечення (усього 12



Рис. 2. Телескоп Шмідта для телевізійних спостережень телескопічних метеорів

програм), який дозволяє виконувати весь цикл обробки даних, від попередньої обробки зображень до визначення орбітальних елементів. На сьогодні в НДІ АО ОНУ провадяться статистичні дослідження метеорів; вивчаються характеристики метеорних потоків і фотометричні, фізичні та хімічні властивості метеорів; визначаються елементи орбіти метеорних тіл; досліджується післясвітіння метеорних явищ.

Окремо потрібно сказати про метеорні дослідження на острові Зміїний протягом 2003—2013 рр., коли силами метеорної групи були проведені експедиційні роботи зі створення двох спостережних пунктів, які працювали під час дії

Таблиця 1. Параметри спостережних систем Одеської метеорної групи

Інструмент	Фокусна відстань, мм	Поле зору	Гранична зор. вел.
Телескоп Шмідта	540	$36' \times 48'$	13.5
Телескоп Т-1	550	$32' \times 45'$	12
EQ (Synta Sky Watcher Equinox 80)	500	$52' \times 60'$	11
«Уран-9»	250	$1^\circ \times 1.5^\circ$	9
P-5 (об'єктив Пентцвала)	140	$2^\circ \times 2.5^\circ$	10
КО-140 (об'єктив Пентцвала)	140	$2^\circ \times 2.5^\circ$	11
КР35 (об'єктив Пентцвала)	140	$2^\circ \times 2.5^\circ$	11.5
NK (Nikon 85mm f/1.8 AF Nikkor)	85	$4^\circ \times 4.5^\circ$	11.5
SG (Sigma AF 70-200 f/2.8 EX)	85	$4^\circ \times 4.5^\circ$	11
SM (Samsung)	8	$36^\circ \times 49^\circ$	7

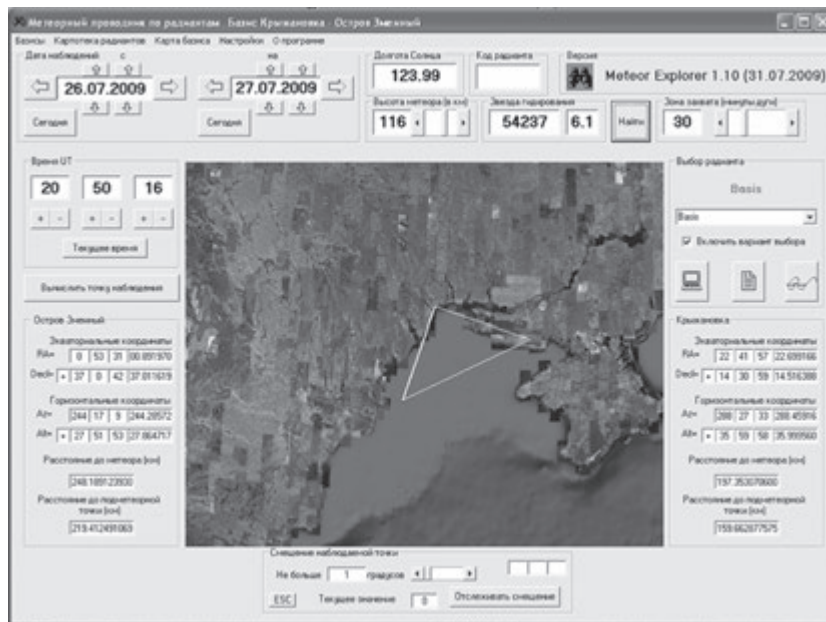


Рис. 3. Приклад ПЗ для розрахунків базисних (152 км, острів Зміїний — Крижанівка, Одеса) телескопічних відеоспостережень метеорів (НДІ АО ОНУ)



Рис. 4. Схема розміщення станцій Київської метеорної групи. Поле зору в п. А спрямовано в зеніт і не орієнтувалося по азимуту, зріз полів зору відповідає висоті 100 км



метеорного потоку Персеїди. Використовувалися базисні спостереження з надмалими базисами між пунктами в 75...80 м, а також базисом в 150 км (острів Зміїний — Крижанівка, на рис. 3). Таким чином було створено окрему острівну базу даних телевізійних спостережень метеорів та опубліковано низку робіт, зокрема [8, 32].

Основні технічні характеристики спостережної апаратури НДІ АО ОНУ приведено в табл. 1.

В останні роки (2018—2022 рр.) нами було опубліковано ряд робіт, зокрема [38] з аналізу існування в навколосемному просторі дев'яти метеоритоутворювальних груп на астероїдних орбітах, що включають спорадичні боліди з бази метеорних даних IAU MDC 2007, спорадичні метеори з бази даних SonotaCo і метеорити типу звичайних хондритів L5, L6, H4-H6 та Ureilite, з відомими за інструментальними спостереженнями атмосферними і орбітальними параметрами.

У роботі [42] одеським істориком І. Б. Грушицькою з використанням методів бібліографічного й джерелознавчого аналізу та системного підходу висвітлено стан і основні тенденції розвитку метеорної астрономії в Одесі у часи незалежної України. Показано, що на початку XXI століття в Одеській астрономічній обсерваторії було відновлено безперервне метеорне патрулювання. Базувалося воно на застосуванні телевізійно-телескопічного методу, використаного на території країн СНД вперше. Відзначено переваги застосування телевізійного телескопічного методу у порівнянні з фотографічним та радіолокаційним методами для вирішення фундаментальних задач метеорної астрономії.

**Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка.** Для базисних спостережень метеорів в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка з 1990-х рр. використовувалися телевізійні системи «Інтроскоп», побудовані на базі високочутливих передавальних трубок типу суперізокон Лі-804. Телевізійні камери оснащувалися фотографічними об'єктивами, такими як «Юпітер-3» ( $F = 50$  мм,  $F/1.5$ ), або «Геліос-40» ( $F = 85$  мм,  $F/1.5$ ). Пару таких установок для базисних спостережень було розміщено у пунктах А (спостережна стан-

ція с. Лісники, Київська обл.,  $N50^{\circ}17'49''$ .5804,  $E30^{\circ}31'49''$ .4192, 130.7900 м у Балтійській системі висот) і В (спостережна станція с. Пилиповичі, Київська обл.,  $N50^{\circ}35'18''$ .2200,  $E29^{\circ}55'17''$ .7700, 139.7250 м) — базисна відстань 54 км, рис. 4.

Телевізійні системи працювали в режимі 25 к/с з черезстроговою розгорткою (interlaced). Оскільки метеор є динамічним об'єктом, а ТВ-камера працювала в черезстроговому режимі, то для уникнення накладання двох зображень метеора, які формуються у парних і непарних полях, рознесених в часі на 0.02 с, оцифровані відеопослідовності з метеорами (зазвичай файли у форматі AVI) програмно розбивались на парні і непарні поля кадру. При використанні об'єктива «Юпітер-3» кутовий розмір поля приблизно дорівнює  $23.5^{\circ} \times 19^{\circ}$ , розмір пікселя 4', при використанні «Геліос-40» поле становить  $13^{\circ} \times 11^{\circ}$ , розмір пікселя 2.2' (при використанні повних кадрів поля зору були б ті ж, а кутовий розмір пікселя — удвічі меншим). При обчисленні параметрів метеора достатньо опрацювати одну парну або непарну послідовність полів, при цьому часова роздільна здатність становитиме 0.04 с. Для підвищення точності обчислення такого параметра, як швидкість метеора, можна незалежно опрацювати як парні, так і непарні поля, а перед базисною обробкою об'єднати дані, тоді часова роздільна здатність становитиме 0.02 с. На основі ряду епізодичних спостережень метеорів було опубліковано ряд мінікаталогів [15, 41, 48, 53].

Методику обробки результатів телевізійних спостережень метеорів було розроблено раніше та описано в ряді публікацій. Астрометричну обробку, а саме вибір редуційної моделі, просторової зони та кількості опорних зір та інших факторів, що визначають точність обчислення екваторіальних координат точок на зображенні метеора, було описано в роботі [10]. Для базисної обробки двох відеопослідовностей одного і того ж метеора, отриманих з двох пунктів, використовується оригінальний розроблений векторний метод [11]. Метод дає змогу визначати просторові характеристики траєкторії метеора у атмосфері Землі (висоти появи, максимуму блиску та зникнення; дальності до метеора від пунктів спостереження; видимі і геоцентричні

швидкості та екваторіальні координати радіанту метеора та ін.), елементи геліоцентричної орбіти метеора, блиск метеора. Згадані методи обробки закладено в оригінальне програмне забезпечення «Falling star» [45], що дозволяє на сьогодні проводити обробку в ручному та напівавтоматичному режимах. В результаті оптимізації розміщення базисних відеокамер було визначено оптимальні параметри їхнього розміщення [47]. Метод фотометрії метеорів було викладено в роботах [13, 49, 46, 50]. Цікаві результати було отримано під час аналізу аномальних метеорів, зареєстрованих у попередні роки [50, 12, 51].

На основі отриманих наукових результатів було захищено одну докторську (В. Г. Кручиненко) та вісім кандидатських дисертацій (В. Г. Кручиненко, В. В. Бенюх, Л. М. Шербаум, В. В. Каленіченко, А. М. Казанцев, П. М. Козак, Ю. Г. Тарануха, А. М. Мозгова).

На сьогодні спостережна апаратура, яка використовувалася раніше, вичерпала свій ресурс і її переведено в стан консервації. На заміну їй

підготовлено сучасний мобільний спостережний комплекс, який складається, принаймні в одному з пунктів спостереження, з кількох відеокамер типу Watec-902 H2 Supreme, Watec-902 H2 Ultimate, Watec-910 HX та об'єктивів, які можуть бути довільно компоновані (табл. 2), та інших допоміжних електронно-обчислювальних приладів.

Допоміжні пристрої: гібридний відеореєстратор Dahua для чотирьох аналогових відеокамер та однієї цифрової, жорсткий диск 1 Тб для збереження відеоінформації; спектральні ґратки формату А4 на основі полімерної підкладки 500 ліній/мм; два внутрішніх (PCI) захоплювачі кадру (ТБ-тюнери Beholder 5-ї серії) для оцифровки аналогових даних та два USB-захоплювачі кадру стандарту PAL/NTSC; необхідна кількість персональних комп'ютерів. Для розширення спостережень останнім часом задіяно епізодичні спостереження в далекому інфрачервоному діапазоні за допомогою тепловізорів з використанням камер FLIR One Pro для діапазону довжин хвиль 7...13 мкм [14].

**Таблиця 2. Параметри спостережних систем для камер типу Watec для різних об'єктивів нового спостережного комплексу Київської метеорної групи**

Об'єктив	Тип камери EIA, 30 к/с				Тип камери CCIR, 25 к/с			
	Поле зору камери		Кутовий розмір пікселя		Поле зору камери		Кутовий розмір пікселя	
	X°	Y°	PS X'	PS Y'	X°	Y°	PS X'	PS Y'
Ricoh TV 6 мм, f/1.2	56.5	43.9	4.4	5.3	56.6	43.9	4.5	4.5
Ricoh TV 12 мм, f/1.2	30.1	22.8	2.4	2.8	30.2	22.8	2.4	2.3
160KP 35 мм, f/1.2	10.5	7.9	0.8	1.0	10.6	7.9	0.8	0.8
Jupiter-3, 50 мм, f/1.5	7.4	5.5	0.6	0.7	7.4	5.5	0.6	0.6
Helios-40, 85 мм, f/1.5	4.3	3.3	0.3	0.4	4.4	3.3	0.3	0.3
Raixar 65 мм, f/0.75	5.7	4.3	0.4	0.5	5.7	4.3	0.5	0.4

**Таблиця 3. Параметри спостережних систем для камер типу Watec для різних об'єктивів спостережного комплексу НДІ «МАО»**

Роки використання	Об'єктив	Тип камери Watec LCL902H2			
		Поле зору камери		Кутовий розмір пікселя	
		X	Y	PS X	PS Y
2013–2016	Canon-85, 85 мм, F/1.8	4.2	3.2	21	20
2013–2016	Ломо-0501, 100 мм, F/1.2	3.6	2.7	18	17
2017–2022	PO-109A, 50 мм, F/1.2	7.2	5.4	42	40

**Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія».** Регулярні спостереження метеорів у оптичному діапазоні розпочато в 2011 р. За цей час було розроблено конструкцію статичного метеорного телескопа, що не потребує укриття, на базі якого побудовано комплекс метеорних телескопів НДІ МАО. У ролі світлоприймача використовувалася камера Watec LCL902H2 (768 × 576, 8.6 × 8.3 мкм, чутливість 0.0001 Лк). Об'єктиви, що були успішно застосовані для спостереження метеорів протягом усього періоду функціонування комплексу, мають такі характеристики: Canon-85mm ( $D = 47$  мм,  $F = 85$  мм, поле зору  $3.2^\circ \times 4.2^\circ$ ); Ломо-0501 ( $D = 50$  мм,  $F = 100$  мм, поле зору  $2.7^\circ \times 3.6^\circ$ ), РО-109А ( $D = 42$  мм,  $F = 50$  мм, поле зору  $5.4^\circ \times 7.2^\circ$ ). Електронно-оптичні підсилювачі не застосовувались. Камера працює у режимі черезстрокової розгортки (50 півкадрів/с) для забезпечення більшого часового розділення траєкторії. Програмне забезпечення (ПЗ) для автоматичного виявлення метеорів було розроблено в НДІ «МАО» у 2010 р. на основі досвіду обробки відеопотоку в режимі реального часу [1]. Паралельно з процесом детектування в режимі реального часу сумуються кадри зображень зір за 20...30 с з використанням техніки накопичення зі зміщенням [20]. Середня кількість ототожнених опорних зір для кадрів з полем зору  $5.6^\circ \times 7.4^\circ$  становить від 100 до 300. Стандартне відхилення опорної системи дорівнює  $6''\dots 10''$ , стандартне відхилення за зоряною величиною —  $0.35^m$ . Проникна здатність для зір становить  $12^m\dots 13^m$ . Синхронізація спостережень забезпечується портативною службою часу на базі GPS-приймача Resolution-T, з якого на LPT-порт комп'ютера подається PPS-імпульс, що використовується для калібрування тактової частоти процесора. Використовувались об'єктиви, характеристики яких представлені в табл. 3.

У 2013—2016 рр. проводились базисні спостереження метеорів з довжиною бази 11.7 км [58, 55, 56]. Отримано близько 10000 односторонніх метеорних реєстрацій. За результатами базисних спостережень обчислювались екваторіальні координати радіантів, параметри атмосферної траєкторії, вектор руху та елементи геліоцентричної

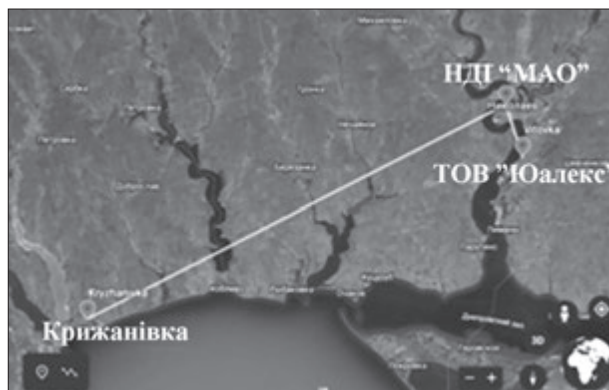


Рис. 5. Розташування базисних станцій метеорного відео-комплексу НДІ МАО

орбіти з відповідними похибками, для цієї мети було створене окреме ПЗ [2]. Отримано каталог елементів геліоцентричних орбіт для 1055 метеороїдів. Серед наукових результатів можна виділити такі:

- 1) виявлено маломасивні метеороїди ( $< 0.01$  г), що рухаються з геоцентричними швидкостями, меншими за 50 км/с, та мають орбіти з ексцентриситетами близько 0.9 та нахилами  $50^\circ \dots 70^\circ$ ;
- 2) проведено порівняльний аналіз каталогу, отриманого в НДІ МАО, із каталогами з відкритих джерел для діапазону малих мас метеорних тіл ( $< 0.01$  г) і оцінено співвідношення тіл астероїдного та кометного типів для даного діапазону мас. Частка орбіт астероїдного типу становить 38 % для всіх метеороїдів і 2.5 % для метеороїдів з масами менше 0.01 г.

У 2017—2018 роках розпочато новий етап спостережень метеорів в оптичному діапазоні з урахуванням досвіду, отриманого в попередній період досліджень. Було обрано варіант телескопа зі світлосильними об'єктивами ( $D = 50$  мм,  $F/1.2$ ) та телевізійними ПЗЗ-камерами WAT-902H2, вісім метеорних телескопів розташовано на трьох станціях з базисними відстанями 11.7 км та 100 км (рис. 5): 1) Миколаїв, НДІ МАО, чотири телескопи ( $N46.972667^\circ$ ,  $E31.972055^\circ$ ); 2) Миколаїв, Вітовка, два телескопи ( $N46.871598^\circ$ ,  $E32.018309^\circ$ ); 3) Одеса, Крижанівка, станція АО ОНУ, два телескопи ( $N46.560722^\circ$ ,  $E30.806500^\circ$ ). Об'єктиви також оснащено широкосмуговими синіми або червоними фільтрами таким чином,

щоб кожна пара телескопів спостерігала одну й ту саму область неба в різних діапазонах спектру. Таким чином, планується проводити колориметричні вимірювання метеорних явищ. Оцінку можливості таких вимірювань наведено в роботі [54]. Перші результати базисних спостережень наведено у роботі [57].

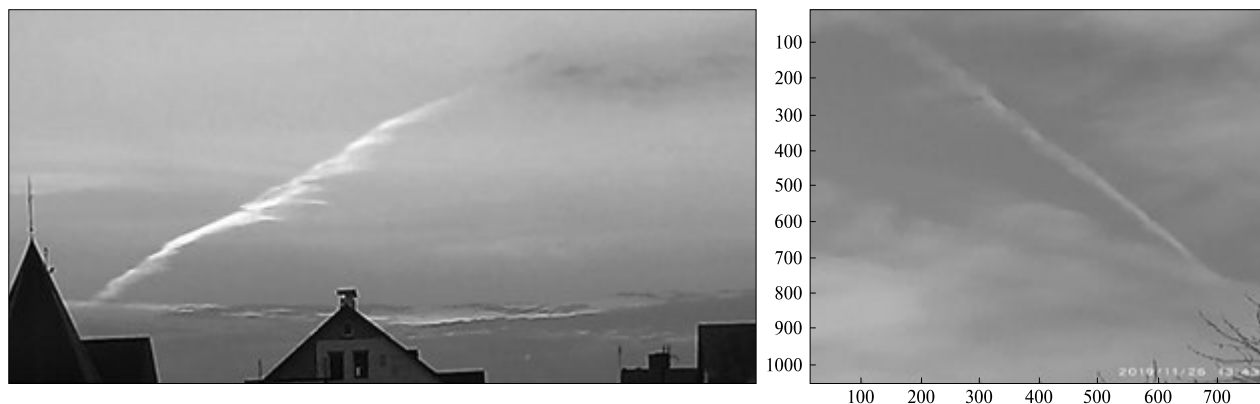
У 1980-ті роки ефект відбиття радіохвиль іонізованими слідами метеорів використовувався для щодобової синхронізації еталонів точного часу і частоти Пулковської і Миколаївської обсерваторій [21]. До складу відповідної системи синхронізації входило два метеорних радара «Мітка» [9] розташованих в Пулково і в Миколаєві. Принцип дії системи базувався на вимірюванні затримки радіоімпульсів, випромінених в одному пункті, відбитих іонізованими слідами метеорів та прийнятих в іншому пункті. Похибка синхронізації шкал часу становила  $\pm 300$  нс. Після розпаду СРСР радар було повернено власнику — Пулковській обсерваторії (ГАО РАН).

Безпосередні систематичні спостереження метеорів в радіодіапазоні було розпочато в 2010 році з використанням методу прямого розсіювання на метеорних слідах сигналів потужних FM-станцій радіомовлення, які перебувають за горизонтом [5]. Функціонування відповідного метеорного апаратурно-програмного комплексу (МАПК), розробленого в НДІ МАО, базується на безперервній цілодобовій реєстрації радіосигналів на частоті загоризонтної FM-станції та на автоматичному виявленні (за даними реєстрації) сигналів, відбитих метеорними слідами. Основним вимірюваним параметром є час появи метеора. Було запропоновано та впроваджено також алгоритм визначення частоти Френелівських коливань амплітуди радіосигналу та відповідної швидкості метеороїда вздовж траєкторії руху [24]. Зазначимо, що в роботах [5, 24] реєструвався сигнал, отриманий після частотного детектора приймача.

У 2013 р. МАПК було суттєво модернізовано. Для прийому радіосигналів стали використовувати SDR-технологію на базі приймача «DVB-T+DAB+FM» з мікросхемою RTL2832 та стали реєструвати сигнал з виходу квадратурного детектора приймача, тобто, сигнал, який не пройшов

частотну демодуляцію та характеристики якого повністю відповідають сигналу на несучій частоті [3]. Методику обробки та виділення метеорних явищ описано в роботах [19, 70]. Успішно налагоджено безперервні спостереження метеорних явищ та їхня автоматична обробка, що дозволило створити мережу радіоспостережень метеорів, до складу якої увійшло шість приймальних станцій, розташованих у Миколаєві (три станції), Рівному, Львові і Глухові [4]. На кожній станції провадиться цілодобова автоматична обробка даних спостережень та автоматична розсилка по e-mail зацікавленим споживачам щодобових даних про кількість зареєстрованих метеорних явищ. Щомісяця дані про кількість метеорів, виявлених кожною станцією, розміщуються на сайті RMOV (Radio Meteor Observation Bulletin). Згідно з даними [4] у 2017—2019 рр. мережею зареєстровано 912765 метеорних явищ. Достовірність даних спостережень в роботі підтверджується: 1) відповідністю добових варіацій кількості метеорів, зареєстрованих станціями мережі, відомій залежності, а саме спостереженню метеорів в апексі та антиапексі, 2) відповідністю отриманих мережею характеристик трьох метеорних потоків (Персеїди, Гемініди та Квадрантиди) очікуваним, як по часу появи, так і по інтенсивності. Наразі досліджується можливість використання методу відновлення несучої FM-сигналу для оцінки швидкості метеороїдів вздовж траєкторії руху за даними однопозиційних спостережень сигналів загоризонтних FM-станцій, відбитих метеорними слідами.

**Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України.** В ГАО НАН України для реєстрації метеорних явищ використовуються фотоприймачі видимого діапазону спектру, спеціалізовані колірні камери, електронні модулі для обробки отриманих спостережень в реальному масштабі часу, спеціалізоване програмне забезпечення для виявлення та розпізнавання окремих об'єктів, визначення їхніх горизонтальних координат, напрямку і швидкості руху, приблизних розмірів, характеру їхнього випромінювання, оцінки загальної енергії їхнього оптичного випромінювання та розрахунків значень загальної енергії, яка виділяється при утво-



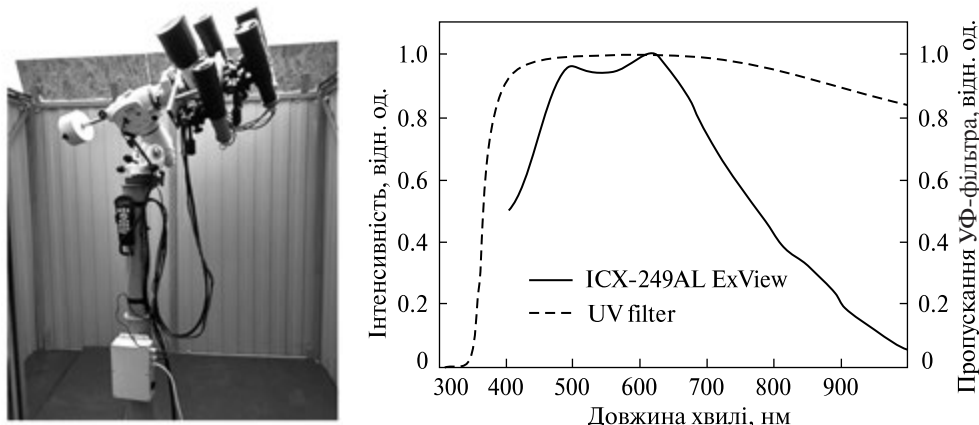
**Рис. 6.** Інверсійні сліди в атмосфері, які можуть бути плазмовими хвостами метеорів (фото отримано А. Ф. Стекловим 27 жовтня 2013 р.)

ренні метеорного явища. В основі використовуваної апаратури для проведення спостережень за метеорними явищами покладено розроблений і виготовлений в ГАО НАН України макет автоматизованого спостережного комплексу, який можна використовувати для виявлення як наземних, так і повітряних об'єктів невеликих розмірів в умовах денної і нічної освітленості на відстанях у десятки кілометрів. Цей спостережний комплекс оснащено ширококутною (поле зору до  $50^\circ$ ) і малоформатною (поле зору близько  $1^\circ$ ) апаратурою оптичного діапазону. Даний комплекс апаратури дозволяє надійно виявляти освітлені сонячним світлом об'єкти із видимою площею у кілька квадратних сантиметрів на відстані до 5 км, та спостерігати інші об'єкти з високою просторовою роздільною здатністю пропорційно до їхньої площі і на більших відстанях [23, 71]. А спостерігати метеорні явища, входження в атмосферу космічного сміття тощо, при згорянні яких температура у плазмових слідах за нашими оцінками досягає від кількох тисяч до 12 000 К, стає можливим як в нічний, так і в денний час. Спостережний комплекс використовує фотоприймачі видимого діапазону спектра з чутливістю до однієї мільйонної люкса, дозволяє проводити 2D- і 3D-фільтрацію спостережуваних зображень та усувати вплив атмосферної турбулентності. Також комплекс дозволяє автоматично виявляти новоутворені метеорні сліди в режимі реального часу, проводити їхню попередню обробку в інтерактивному режимі з харак-

терним часом кілька секунд та повідомляти про проведене спостереження [23]. У розробці даної апаратури, її випробуванні та у проведенні спостережень за утворюваними у земній атмосфері плазмовими слідами беруть участь такі співробітники ГАО НАН України: А. П. Відьмаченко, Б. Ю. Жилияєв, О. Ф. Стеклов, С. М. Похвала, В. М. Петухов, І. А. Верлюк, О. О. Святогоров, П. В. Неволовський та інші.

Наші теоретичні розробки деяких питань фізики утворення плазмових слідів при входженні метеорного тіла в земну атмосферу показали, що спеціальний підбір значень динамічних характеристик метеороїда для отриманих світних слідів при нічних спостереженнях, або інверсійних слідів при денних спостереженнях (рис. 6), можливо, дозволить оцінити за односторонніми спостереженнями ряд важливих характеристик як самого метеороїда, так і особливостей земної атмосфери, в якій і спостерігається дане явище. Опис такого підходу виходить за рамки даної публікації, а додаткову інформацію можна знайти в роботах [25–28, 59, 60, 63, 69, 72–76].

*Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.* У практиці Науково-дослідного інституту астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна до цього часу майже не використовувались методи метеорної астрономії для вивчення речовини Сонячної системи. Але у 2019 р. було створено автоматизований відео-спектральний метеорний патруль



**Рис. 7.** Автоматизований відеоспектральний метеорний патруль, встановлений на території Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. На графіку: суцільна лінія — спектральна чутливість відеокамери WAT-902H2 ULTIMATE з CMOS-матрицею ICX-249AL ExView, штрихова лінія — пропускання спектральна характеристика УФ-фільтра

(АВСМП) із застосуванням світлочутливих аналогових ССТV-відеокамер (рис. 7). Спостережний комплекс призначено для розширення матеріальної, наукової, а також навчально-наукової бази НДІ астрономії. Він успішно використовується у навчальному процесі на кафедрі астрономії та космічної інформатики ХНУ імені В. Н. Каразіна під час проведення практичних та лабораторних занять, виконання бакалаврських і магістерських робіт та розробці новітніх методик дистанційного дослідження астрономічних об'єктів Сонячної системи.

Спочатку спостереження проводилися тільки з одного пункту — на Чугуївській спостережній станції НДІ астрономії (Харківська обл.), які дали змогу налагодити та відкалібрувати оптичні та електронні вузли апаратури. У серпні 2019 р. одна з камер та необхідні електронні блоки було перенесено у Харків для проведення перших повноцінних базисних спостережень метеорного потоку Персеїди. З того часу з метою комплексного вивчення метеорних явищ організовано два пункти спостережень. Перший пункт розташований у Харкові на території НДІ астрономії, другий — на території Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії. Одночасні спостереження одного і того ж метеорного явища з двох або більше пунктів дають змогу визначити усі осно-

вні кінематичні параметри метеороїда (висоту над рівнем моря, швидкість, елементи геліоцентричної орбіти тощо) [3]. Геодезичні координати пунктів спостережень визначалися за допомогою GPS-навігаторів: «Харків» — (50°00'9.94" N, 36°13'48.67" E), висота місця над рівнем моря 141 м; «Чугуївська спостережна станція» — (49°38'28.61" N, 36°56'8.62" E), висота місця над рівнем моря 154 м. Базисна відстань між пунктами спостережень становить 64.76 км. Це достатньо для надійного отримання кінематичних параметрів та елементів геліоцентричної орбіти метеорних частинок.

На Чугуївській спостережній станції метеорний патруль обладнано двома ССТV-камерами, одна з яких оснащена дифракційною ґраткою 500 ліній/мм для спектральних спостережень. Як приймачі випромінювання використовуються світлочутливі аналогові ССТV-камери фірми Watec (Японія): WAT-902H2 ULTIMATE (використовується CMOS-матриця ICX-249AL ExView) з часовою роздільною здатністю 0.02 с, та частотою формування півкадрів 50 с<sup>-1</sup>. За паспортними даними у таких камерах застосовується CMOS-матриця, яка має розмір 1/2", фізичний розмір одного пікселя становить 8.6 × 8.3 мкм, чутливість відеокамери 0.0001 Лк (при відносному отворі F/1.4). Роздільна здат-

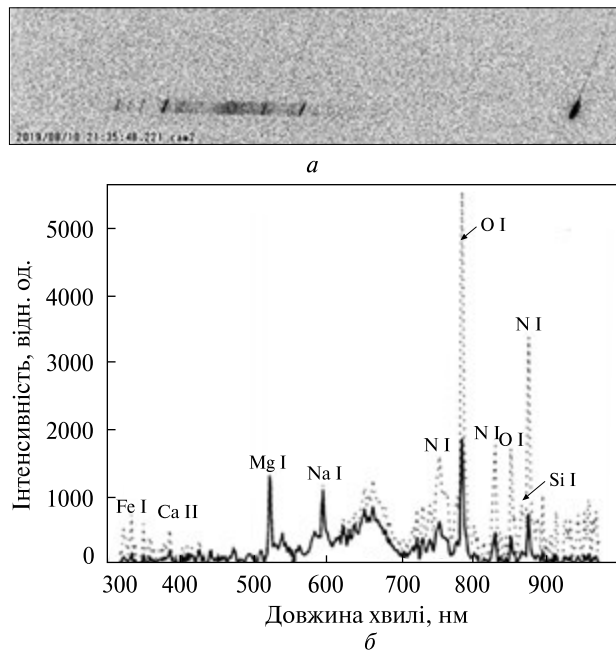
ність відеокамери — більш ніж 570 телевізійних ліній, відношення сигнал/шум перевищує 46 дБ. Під час спостережень автоматичне регулювання підсилення яскравості було відключено. Для перетворення аналогового сигналу з камери в цифровий застосовується телевізійний тюнер з восьмирозрядним аналого-цифровим перетворювачем. У ролі програмного забезпечення для захоплення відеозображення використовується автоматичний реєстратор метеорів UFOCapture (SonotaCo, [65]). Часова прив'язка метеорних патрулів здійснюється за допомогою GPS-приймачів. Усі астрокамери оснащені варіфокальними об'єктивами Tamron 12VM1040 ASIR ( $F = 10$  мм, відносний отвір  $F/1.4$ ), які забезпечують поле зору  $34.4^\circ \times 25.8^\circ$  кожен. Розмір одиничного пікселя  $2.65'$ . Оптичні прилади встановлено на екваторіальному монтуванні Sky-Watcher EQ6-R і працюють в автоматичному режимі. Екваторіальне монтування дає змогу використовувати АВСМП для різних задач спостережень. Запис зображення під час спостережень може проводитись із включеним або виключеним приводом екваторіального монтування.

Визначено, що гранична зоряна величина для спостережного комплексу (для камери без дифракційної ґратки) становить  $+5.4^m$ . Для камери з дифракційною ґраткою гранична зоряна величина становить  $+4.0^m$ . Обробка отриманих зображень метеорних спектрів показала, що обернена лінійна дисперсія у першому порядку спектру становить  $1.6$  нм/пкл, у другому —  $0.76$  нм/пкл. Спектральна чутливість відеоспектрального комплексу лежить у діапазоні довжин хвиль від  $350$  до  $900$  нм, а максимальне значення спектральної чутливості оптичної системи припадає на  $500...650$  нм. Встановлений перед об'єктивом і дифракційною ґраткою УФ-фільтр (Kenko digital UV filter), виконує захисну функцію (захист матриці від УФ-випромінювання, захист від пилу і вологи оптичних поверхонь дифракційної ґратки і об'єктива). Фільтр ефективно відсікає ультрафіолетове випромінювання до  $390$  нм (рис. 7). У видимій області спектру  $390...750$  нм пропускна здатність УФ-фільтра становить  $98.2\%$ , а в області  $200...390$  нм — близько  $9\%$ . Останнє ускладнює можливість

дослідження метеорного спектра в ультрафіолетовій спектральній області. Світловідбиття фільтра становить менше  $1\%$ . Випромінювання від метеора проходить через товщу земної атмосфери, яка частково пропускає, розсіює, відбиває або поглинає світлове випромінювання в різних довжинах хвиль. Особливо великий вклад у поглинання спостережуваного випромінювання метеора атмосферними молекулами води припадає на довжини хвиль близько  $900$  і  $1000$  нм. Цей факт обмежує можливість дослідження метеорного спектра у червоній і ближній інфрачервоній спектральній області.

Відеоспектральна апаратура характеризується відносною спектральною чутливістю, яку потрібно врахувати при визначенні відносної та абсолютної інтенсивності спектральних ліній. Для цього необхідно отримати спектр еталонного джерела випромінювання з відомим розподілом енергії. За такий стандарт було використано спектр Юпітера. Нормування метеорного спектра здійснюється шляхом ділення спектру метеора на спектр порівняння. Далі знайдену функцію  $f(\lambda)$  спектральної чутливості використовують для калібрування інтенсивностей емісійних ліній у спектрі метеора. У метеорній спектроскопії абсолютна інтенсивність спектральних ліній, як правило, виражається в  $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ . Після отримання скану метеорного спектра та його калібрування за різноманітні геометричні і фотометричні спотворення здійснюється детальна ідентифікація спектральних ліній, виконується пошук нових емісійних ліній, визначаються їхні абсолютні інтенсивності, розраховуються фізичні параметри метеорних тіл та інше [18].

Для ототожнення хімічного складу метеороїдів у спектрах спостережених метеорів було розроблено програмне забезпечення «VideoMeteorSpectr», яке автоматизує цей процес та дає змогу обробляти великі обсяги даних. Для прикладу на рис. 8, а показано один із кадрів, що містить зображення першого порядку спектру метеора M20190810\_213547, отриманого у ніч з 10 на 11 серпня 2019 р. За допомогою програмного забезпечення «VideoMeteorSpectr» проведено ототожнення деяких найбільш яскравих емісійних ліній у спектрі метеора. Вони належать атомам та іо-



**Рис. 8.** Фрагмент (інверсне зображення) одного з відеокадрів зі спектром метеора M20190810\_213547, отриманий у ніч з 10 на 11 серпня 2019 року на Чугуївській спостережній станції НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна (Харківська обл.). Справа видно зображення у нульовому порядку спектра (а); б — спектрограма метеора M20190810\_213547 з вирахуванням континууму (суцільна лінія). Пунктирна лінія — спектрограма, виправлена з урахуванням спектральної функції  $f(\lambda)$  АВСМП



**Рис. 9.** Видляд Астрономічної обсерваторії "Львівська політехніка" перед Першою світовою війною. Світлина З. Коссовського, орієнтовно 1913 рік. Збірка А. Дрбала [22]

нам магнію (Mg I), заліза (Fe I), натрію (Na I), кальцію (Ca II), кремнію (Si I) та ін. У червоній ділянці спектру ( $> 700$  нм) спостерігаються емісійні лінії азоту (N I) та кисню (O I), що належать земній атмосфері. Такий результат якісно збігається з результатами спектральних досліджень метеорів інших провідних спеціалістів. Це свідчить про можливість застосування розробленої методики вимірювань і обчислень, та створеного на її основі програмного забезпечення для відносної спектрофотометрії та ототожнення емісійних ліній у відеоспектрах метеорів, спостережених за допомогою відеоспектрального метеорного патруля. У подальшому програмне забезпечення буде вдосконалюватись з метою проведення абсолютної спектрофотометрії ототожнених емісійних ліній і кількісного аналізу (визначення концентрації хімічних елементів, температури метеорної плазми та ін.).

Для кожного інструмента створено динамічну базу даних, що постійно поповнюється під час первинної обробки нових спостережень. Для обробки спостережного матеріалу створено пакет програмного забезпечення. Нині база спостережень метеорів і їхніх спектрів складається з трьох каталогів — окремо для кожної відеокамери, розташованої на Чугуївській спостережній станції (одна з яких забезпечена дифракційною ґраткою) і на території НДІ астрономії в Харкові (відеокамера без дифракційної ґратки). Після ночі метеорного патрулювання у базу даних надходять відеофільми, що складаються з 50 кадрів до і після метеора та кадрів із зображенням самого метеора. Методику позиційних вимірювань телевізійних зображень метеорів детально описано в роботі [6].

Для оцінки спостережної ефективності АВСМП приведемо такий приклад. У результаті базисних відеоспектральних спостережень метеорного потоку Персеїди у серпні 2019 і 2020 рр. зафіксовано 128 базисних (двостанційних) метеорів. Для цих метеорів розраховано кінематичні параметри, геліоцентричні орбіти та маси. Для 35 метеорів отримано відеоспектри, з яких сім метеорів мають відповідні базисні спостереження в інтегральному світлі.

Позиційна, фотометрична та спектрометрична обробка спостережного матеріалу триває.



### Sternschnuppen am 13. Dezember 1904.

Im Jahre 1904 machte ich systematische Beobachtungen der Sternschnuppen von 10 bis 11 Uhr abends. Ich beobachtete die Himmelsgegend um  $\alpha$  Ursae minoris in einem Kreise von etwa  $90^\circ$  Durchmesser. Die Anzahl der Sternschnuppen ist im Mittel zwei bis drei für das Feld und Stunde. Am 13. Dezember 1904 war die Anzahl der Sternschnuppen auffallend groß. Ich zählte während einer Stunde 25 Meteore, von denen ich 15 in eine Karte zeichnete. Die Anzahl für den ganzen Himmel schätze ich auf über 100. Die Erscheinung war sehr auffallend, da die Sternschnuppen meistens hell und von blendend weißer Farbe waren. Sie

Lemberg, Observatorium, 1905 Jan. 24.

wurde von vielen Personen wahrgenommen, die sonst kein Interesse für Astronomie aufweisen.

Von den 15 gezeichneten Sternschnuppen waren 4 erster Größe, 8 zweiter Größe, 1 dritter und 2 vierter Größe, 10 von ihnen waren weiß, 1 gelb, 1 orangefarbig und 3 rosafarbig. Alle beschrieben kurze Bahnen mit einer Dauer von etwa  $0.3$ . Die Koordinaten des Radiationspunktes sind etwa  $\alpha = 120^\circ$ ,  $\delta = +45^\circ$ . Es waren jedenfalls Geminiden, und ich glaube, daß sie in diesem Jahre ihr Maximum hatten. Leider gestattete das Wetter nicht die Beobachtung fortzusetzen.

Dr. M. Ernst.

Рис. 10. Повідомлення М. Ерста, працівника обсерваторії Львівської політехніки, про спостереження метеорів (Astronomische Nachrichten, 1905, Vol. 168)

Крім цього, триває удосконалення апаратної частини метеорного патруля для досліджень фізико-хімічних процесів під час метеорних спалахів яскравості. Накопичуються спостереження для вивчення властивостей метеорних частинок, які перебували у близькій області ( $< 0.1$  а. о.) від Сонця [31]. Особливо приділяється увага розробкам методів позиційного і фотометричного розрахунків кінематичних та фізичних параметрів метеоритоутворюючих болідних явищ, які спостерігаються у денний час доби [30, 44].

**Національний університет «Львівська політехніка».** Професійні астрономічні спостереження у Львові активізувалися в 1877 р., коли розпочала свою діяльність Астрономічна обсерваторія Вищої політехнічної школи, так тоді називалася Львівська політехніка (рис. 9). Організаційно вона входила у склад кафедри геодезії і сферичної астрономії.

Астрономічна обсерваторія разом із метеорологічною і сейсмографічною станціями належала до кафедри астрономії та вищої геодезії і формально утворювала єдину структуру, пов'язану спільністю персоналу та обладнання. У науковому плані це були фактично три установи, які виконували різні завдання: астрономічні, метеорологічні й сейсмічні. Територіально кафедра, обсерваторія та обидві станції були розташовані в головному корпусі Політехніки: кафедра астрономії та вищої геодезії — на теперішньому третьому поверсі. На базі Астрономічної об-

серваторії проводилися астрометричні вимірювання об'єктів Сонячної системи, спектральні дослідження в області астрономії, дослідження астероїдів, комет, метеорів (рис. 10).

Для приймання радіосигналів точного часу у 1922 р. облаштовано станцію. На ту пору вже було узгоджено розташування передавальних радіостанцій і час передавання сигналів. Основними передавальними радіостанціями в Європі були станції Парижа (поправки отримували з Паризької астрономічної обсерваторії) та Науена (Nauen), розташованого недалеко від Берліна і Потсдама. Поправки для неї надходили з Потсдамського геодезичного інституту. У 1927 р. для служби часу почали приймати радіосигнали покращеної якості завдяки дооснащенню приймальної станції високою (10 м) антеною, яку встановили на даху корпусу. Ця антена зберегла і донині [22].

Початок 20 століття був досить успішним у наукових дослідженнях, які провадилися в Астрономічній обсерваторії [40]. Але після закінчення Другої світової війни Астрономічну обсерваторію, як окрему організаційну структуру кафедри Львівської політехніки, було ліквідовано. Проте наукові дослідження астрономічного характеру проводилися окремими співробітниками кафедри вищої геодезії та астрономії, до якої і належала тепер Астрономічна обсерваторія як окрема лабораторія. Астрономічна обсерваторія служила і майданчиком для підготовки студентів



Рис. 11. Телескоп SkyWatcher BK-305/1500 OTA, custom AltAz mod на альт-альт-монтуванні (Рівненська Мала академія наук учнівської молоді)

зі спеціальності «Геодезична астрономія». Після запуску перших штучних супутників Землі (ШСЗ) на Астрономічній обсерваторії проводять відповідні спостереження за ШСЗ та ведуться наукові дослідження зі супутникової тематики.

У 2001 р. при кафедрі в Астрономічній обсерваторії встановлено перманентну GNSS-станцію SULP. Для виконання окремих наукових задач в Астрономічній обсерваторії у 2016 р. створено цифрову метеорологічну станцію. У 2017 р. створено станцію моніторингу метеорної активності у радіодіапазоні. Тобто, основні наукові астрономічні дослідження, які проводяться у Астрономічній обсерваторії, — це радіофізичні дослідження. Зважаючи на оперативність та точність, ці дослідження вже декілька десятиліть застосовуються для моніторингу та вивчення атмосферних процесів.

Оскільки на кафедрі вищої геодезії та астрономії Інституту геодезії, крім спеціалістів з космічної геодезії, вже майже десять років готують магістрів зі спеціальності «Космічний моніторинг Землі», то створення метеорної станції дозволило розширити діапазон наукових досліджень для моніторингу навколоземного простору, відкрило нові можливості співпраці з науковцями інших інститутів Львівської політехніки (комп'ютерних технологій, радіотелекомунікації), та інших вітчизняних наукових центрів, залучити студентів до вивчення нової тематики і

модернізувати започатковані тут на початку 20-го століття дослідження метеорів.

Історичні традиції, науковий досвід, технічна база створюють оптимальні можливості для проведення метеорних досліджень в Астрономічній обсерваторії Львівської політехніки на належному рівні.

**Обласний комунальний позашкільний навчальний заклад «Рівненська Мала академія наук учнівської молоді».** Обласний комунальний позашкільний навчальний заклад «Рівненська Мала академія наук учнівської молоді» Рівненської обласної ради створено 11 серпня 2006 року. Рівненська Мала академія наук учнівської молоді (РМАНУМ) — профільний позашкільний навчальний заклад дослідницько-експериментального напрямку, що забезпечує залучення обдарованої молоді Рівненщини 8...11 класів до науково-дослідницької, експериментальної, конструкторської та винахідницької роботи в різних галузях науки, техніки, культури й мистецтва та формування їхньої мотивації до майбутньої наукової діяльності. Практично відразу після створення РМАНУМ завдяки директору, Олександрю Андрееву, розпочався розвиток напрямку астрономії та космічних досліджень. З 2010 року діє один з найбільших телескопів серед навчальних закладів України - SkyWatcher BK-305/1500 OTA, custom AltAz mod. Завдяки таким ентузіастам своєї справи, як інженер В. Янішевський, завідувач лабораторій РМАНУМ А. Малюга було створено оригінальні альт-альт- (рис. 11) та альт-азимутальні монтування.

У грудні 2014 р. юні науковці РМАНУМ разом зі своїми керівниками взяли участь в онлайн-трансляції з Європейського космічного центру посадки автоматизованого дослідницького модуля «Philae» на поверхню комети Чурюмова — Герасименко.

Лабораторію космічних досліджень РМАНУМ створено в жовтні 2015 р. Першим завідувачем лабораторії став Євгеній Малиновський. Відтоді почалася тісна співпраця з НДІ НАН України «Миколаївська астрономічна обсерваторія». У рамках співпраці проводяться безперервні радіоспостереження метеорів, що входять в атмосферу Землі. Для цього було змонтовано

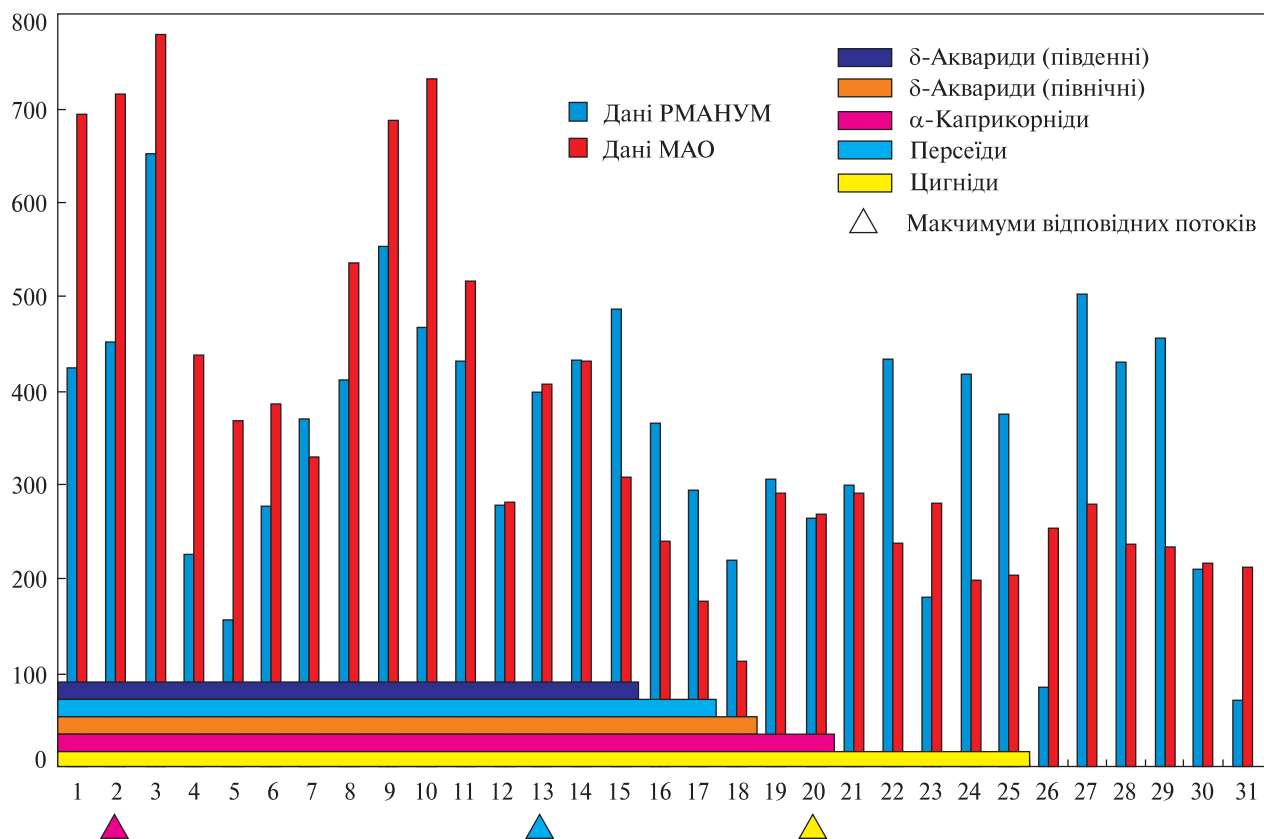


Рис. 12. Дані спостережень радіолокаторів РМАНУМ та НДІ МАО за серпень 2016 року та часові межі метеорних потоків згідно з прогнозом Головної астрономічної обсерваторії НАН України

направлену антену з довжиною бума 3.9 м та горизонтальним симетричним вібратором довжиною 1.3 м і відбивачем 1.45 м. Робота ведеться на відбитому сигналі з базовою станцією поблизу Будапешта (Угорщина), по азимуту 238°, яка віддалена від нас на 625 км та працює на частоті 94.8 МГц. Обробка сигналу з цифрового приймача DVB-T відбувається за допомогою програмного забезпечення HSDR виділення метеорних моментів відбувається в автоматичному режимі програмним забезпечення НДІ МАО.

Отримана інформація щомісячно в установленому форматі відправлялась на сайт міжнародного проекту RMOB (Radio Meteor Observing Bulletin) [64] та використовувалась учнями РМАНУМ для написання науково-дослідницьких робіт в секціях «Астрономія та астрофізика» та «Аерофізика та космічні дослідження». Заняття проводять фахівці своєї справи І. Се-

мешук, В. Мислінчук, В. Сідлецький. Роботи з метеорної астрономії були представлені на II та III етапах Всеукраїнського конкурсу-захисту науково-дослідницьких робіт учнів — членів МАН України, де були високо оцінені та зайняли призові місця.

На рис. 12 представлено результати дослідження О. Пашко, учениці РМАНУМ, зі радіоспостережень метеорних потоків.

Також слід відзначити роботи таких учнів, як О. Святий «Аналіз радіоспостереження метеорів у північній півкулі за січень 2017 року», А. Воловник «FS-радіотелескоп РМАНУМ, монтаж та початок роботи». Співпраця в рамках УМСМ дозволить залучати учнівську молодь до наукової діяльності, буде сприяти вибору майбутньої професії та вихованню молоді наукової еліти України.

*Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка. У жовтні 2016*

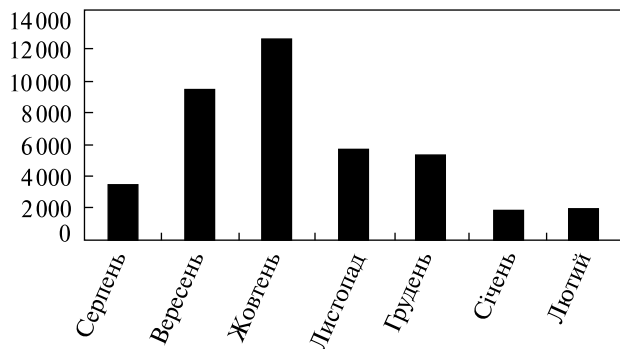


Рис. 13. Діаграма розподілу загальної кількості метеорів по місяцях. Серпень 2019 р. — лютий 2020 р., спостережний комплекс Глухівського НПУ

року у Глухові в ході проведення 1-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сучасної астрономії та методики її викладання», присвяченій 100-річчю від дня народження всесвітньо відомого радіоастронома Й. С. Шкловського, було активно обговорено формат участі Глухівського НПУ ім. О. Довженка в наземному аерокосмічному моніторингу входжень об'єктів космосу в земну атмосферу.

У квітні 2019 року Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія» уклала Угоду про співпрацю з Глухівським НПУ імені О. Довженка. У межах цієї Угоди організовано роботу автоматизованого комплексу спостережень метеорів в радіодіапазоні за допомогою методу прийому відлунь сигналів загоризонтних радіостанцій (FM, Frequency Modulation), який 5 серпня 2019 р. з успіхом запущено в дію. Відтак, 5 серпня 2019 р. в Україні почала працювати п'ята радіотраса Глухів (Україна) — Кельце (Польща), частота 88.2 МГц, довжина 960 км, створена за ініціативи НДІ «МАО» (перші чотири: Кельце — Миколаїв, частота 88.2 МГц, довжина 910 км; Стамбул — Миколаїв, частота 88.2 МГц, довжина 700 км; Соннеберг (Німеччина) — Львів, частота 91.7 МГц, довжина 900 км; Будапешт — Рівне, частота 94.8 МГц, довжина 635 км).

Складниками комплексу з реєстрації радіовідлунь є програмно керований приймач Realtek RTL2832U; направлена антена типу Ягі-Уда, розрахована на потрібний діапазон частот

(88...108 МГц); програмне забезпечення для керування приймачем та збереження інформації; встановлений інтерпретатор мови програмування Python 3.4 з бібліотеками numpy, matplotlib, wave; програми обробки отриманих з ефіру масивів даних, розроблені на мові програмування Python. Комплекс приймає сигнал потужної загоризонтної FM-станції, розташованої в місті Кельце (Польща) на відстані приблизно 940 км від Глухова. FM-станцію вибрано з урахуванням як азимутально-частотного розподілу шумів у місці розміщення комплексу, так і місць дислокацій, потужностей та частот випромінювання станцій передавачів і радіочастот. Відтак в Україні відкрито нову радіотрасу реєстрації відлунь радіохвиль від іонізованих слідів метеорів (траса Кельце — Глухів, частота 88.2 МГц).

Щомісячно результати поточних спостережень в установленому форматі відправляються на сайт міжнародного проекту RMOB (Radio Meteor Observing Bulletin) [64]. Наведемо статистичний аналіз результатів спостережень метеорів на трасі Кельце — Глухів у період серпень 2019 р. — лютий 2020 р. (рис. 13—15).

Слід відмітити, що реалізація ідеї моніторингу метеорів має і великий педагогічний потенціал, оскільки дає можливість навчати учнів і студентів спостерігати космічні події за допомогою сучасних технічних засобів, розвивати в них якості дослідника.

## ВИСНОВКИ

Метеорна астрономія, перш за все, є спостережною і експериментальною наукою. Це вимагає постійної технічної модернізації, залучення колективів фахівців, удосконалення методик спостережень і обробки баз даних. Історично Україна була великим науковим центром у розвитку метеорної астрономії на пострадянській території з центрами в Одесі та Києві. Створювалися болідні мережі, новітні для свого часу спостережні інструменти, розроблялась методика спостережень і обробки даних. Це дало можливість брати участь у великих міжнародних програмах: Міжнародний геофізичний рік (у 1957—1958 рр.) та його продовження — Міжнародна геофізична співпраця (з 1959 р.). Вітчизняними та закор-

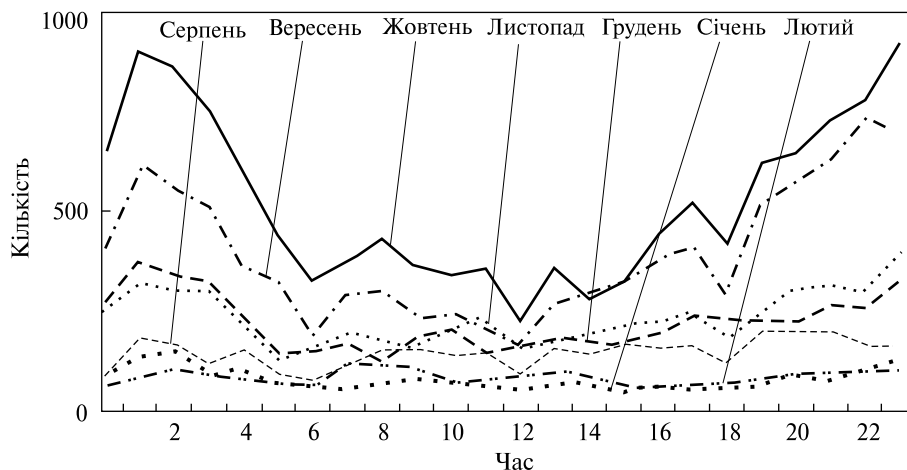


Рис. 14. Діаграма розподілу кількості метеорів за годиною доби. Серпень 2019 р. — лютий 2020 р., спостережний комплекс Глухівського НПУ

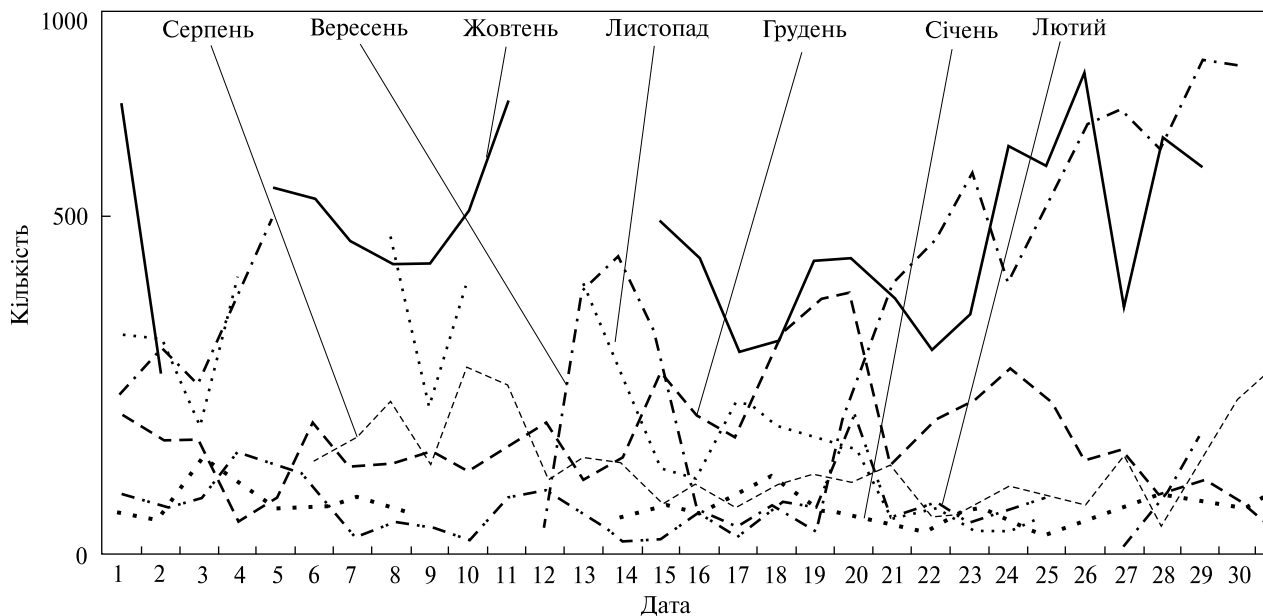


Рис. 15. Діаграма розподілу кількості метеорів за днем місяця. Серпень 2019 р. — лютий 2020 р., спостережний комплекс Глухівського НПУ

донними фахівцями було отримано величезну кількість знань про фізику метеорних явищ, про властивості верхньої атмосфери Землі, про природу пилової хмари Сонячної системи, про природу комет і астероїдів, у вивченні поверхні тіл Сонячної системи, і навіть знайшов практичне застосування — метеорний радіозв'язок. Багато

з цих знань неможливо було отримати іншими методами астрономії та фізики. Це доводить, що метеорна астрономія, поряд з іншими галузями науки, є потужним науковим інструментом у вивченні природи тіл Сонячної системи і Землі.

Після 1990-х рр. розвиток цього напрямку в астрономії значно згас. Спостереження стали

рідкісними і епізодичними. Для цього було багато об'єктивних і суб'єктивних причин. Спостережні інструменти морально застаріли, і їх практично припинили використовувати. Економічний спад також мав свій вплив. В Україні метеорна астрономія перейшла з розряду потужного наукового інструменту пізнання космічних об'єктів у таку собі «наукову екзотику». Якщо уважно простежити який період історії метеорної астрономії дав найбільш продуктивний результат, то можемо впевнено назвати період з 1950 по 1990 рр. Саме ця вся наукова інформація передруковується в даний час з одних джерел в інші, часто з перекручуваннями або втратою найбільш важливих з наукової точки зору моментів. Тільки іноді з'являються нові результати спостережень метеорів, але частіше за все заради уточнення раніше відомого факту. На сьогоднішній день доводиться обмежуватися інформацією про метеори, отриманою окремими спостерігачами або групами спостерігачів. Виникає відчуття, що метеорна астрономія як науковий метод пізнання тіл Сонячної системи перестала бути важливою. Але це хибна думка!

Приблизно з 2000-х рр. з'явилися зовсім нові технічні можливості для розвитку метеорної астрономії. У всіх розвинених країнах з доступною технічною модернізацією і популяризацією метеорної астрономії стало можливим створення великих метеорних мереж, які на багато порядків збільшили поповнення баз даних спостережень метеорних явищ. Навіть в останні роки у науковому суспільстві зріє думка про об'єднання Світових метеорних мереж в одну Глобальну мережу. В основному спостереження віддані на відкуп величезній армії любителів астрономії. Але все ж ці спостереження курують наукові організації та обсерваторії в цих країнах.

Описані в роботі сучасні можливості окремих наукових установ України для виконання досліджень в області метеорної астрономії дозволяють здійснювати фундаментальні і прикладні науково-технічні дослідження метеорних явищ на високому рівні, отримувати результати високоточних базисних або односторонніх спостережень метеорів в різних діапазонах довжин хвиль. Створення Української метеорної спостережної

мережі за участю наукових установ, розташованих у містах: Глухів, Київ, Львів, Миколаїв, Одеса, Рівне, Харків є чудовим рішенням для об'єднання зусиль науковців у проведенні регулярних базисних та односторонніх спостережень метеорів в різних діапазонах довжин хвиль, а також для обміну результатами спостережень, їхньої обробки та аналізу спостережних даних.

Однією з переваг таких комплексних паралельних спостережень є можливість порівнювати характеристики як спорадичних, так і поточних метеорів, отриманих різними засобами спостережень — в оптичному діапазоні, іонізованих слідів в радіодіапазоні, спектральні спостереження, тестові спостереження в далекому інфрачервоному діапазоні. У результаті функціонування мережі буде створено спільну базу даних обчислених параметрів спостережуваних метеорів, яку буде представлено в мережі інтернет для загального доступу. У перспективі планується інтегрувати дану базу даних до міжнародних аналогів, що беззаперечно буде слугувати підвищенню авторитету України в науковому контексті метеорної астрономії. Наявність у складі організацій-учасників мережі педагогічних установ буде сприяти процесу популяризації науки серед учнівської молоді та залученню студентів до досліджень метеорного компонента Сонячної системи.

*Роботу виконано:*

- *НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна* — частково в рамках договору № БФ/32-2021 на виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Математичні науки та природничі науки» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за рахунок фінансування Міністерства освіти і науки України;
- *НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені І. І. Мечникова* — частково в рамках теми № 588. Номер реєстрації: 0119U002194 «Дослідження нестаціонарних об'єктів і явищ у ближньому космосі з використанням мережі телескопів Одеської обсерваторії».
- *Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка* — в

рамках держбюджетної теми 22БФ023-02 «Діагностика пилу в активних малих тілах Сонячної системи та навколосемному космічному просторі» за рахунок фінансування Міністерства освіти і науки України, та частково в рамках виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Математичні науки та природни-

чі науки» Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

*Автори вдячні докторці фізико-математичних наук, член-кореспондентці Національної академії наук України І. Б. Вавиловій за надані корекції, за уваження та рекомендації щодо покращення даної статті.*

## ЛІТЕРАТУРА

1. А. с. 37593, Козирев Є. С. Програмний продукт «Реєстрація метеорних явищ з використанням телевізійних камер» («MeteorDetect»). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 37593, видане 25.03.2011.
2. А. с. 75259 Куліченко М. О. Автоматичне виділення та аналіз траєкторій метеорів («TraEx»). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 75259, видане 07.12.2017.
3. А. с. 75962, Вовк В. С., Куліченко М. О. Програмний продукт «Автоматичне виявлення метеорів та штучних супутників землі по даним радіоприймача RTL2832». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 75962. Заєєстровано у державному реєстрі України 07.12.2017. URL: [http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2017/2017\\_75258\\_Vovk.pdf](http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2017/2017_75258_Vovk.pdf).
4. Бушуєв Ф. І., Калюжний М. П., Куліченко М. О., Шульга О. В., Малиновський Є. В., Савчук С. Г., Янків-Вітковська Л. М., Грудинін Б. О. Становлення та розвиток української мережі радіоспостережень метеорів. *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 3. С. 85–92.
5. Бушуєв Ф. І., Калюжний Н. А., Сливинский А. П., Шульга А. В. Использование сигналов вещательных FM-станций для исследований численности метеоров. *Космічна наука і технологія*. 2011. **17**, № 3. С. 60–70.
6. Голубаєв О. В. Кінематичні та фізичні характеристики метеорних тіл з радіантами поблизу Сонця за даними наземних телевізійних спостережень. Дисертація. Київ. 2017. 195 с. URL: [http://svrada.nau.edu.ua/2017.06.27\\_Golubaev/](http://svrada.nau.edu.ua/2017.06.27_Golubaev/) (дата звернення: 24.04.2022)
7. Горбанев Ю. М., Князькова Е. Ф., Шульга А. В., Куліченко Н. А., Козак П. Н., Мозговая А. М., Голубаєв А. В. Украинская метеорная оптическая сеть. *Радиотехника*. 2016. **185**. С. 5–8.
8. Горбаньов Ю. М., Шестопалов В. О., Сарест Л. О., Голубаєв О. В. *Телевізійне метеорне патрулювання на о. Зміїний. Дослідження (сучасного стану) екосистеми острову Зміїний*. Одеса: Астропринт. 2008. 120 с.
9. Коваль Ю. А., Кундюков С. Г., Бавыкина В. В., Ткачук А. А., Луценко А. Б., Нестеренко Г. В. Применение радиометеорной аппаратуры для оперативной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости. *Радиоэлектроника и информатика*. 2004. № 1. С. 14–19.
10. Козак П. Н. Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров. *Кинематика и физика небес. тел.* 2002. **18**, № 5. С. 471–480.
11. Козак П. Н. Векторный метод определения параметров траектории и элементов гелиоцентрической орбиты метеора для телевизионных наблюдений. *Кинематика и физика небес. тел.* 2003. **19**, № 1. С. 62–76.
12. Козак П. Н. Диффузная структура некоторых метеоров в начале их траекторий на классических высотах. *Кинематика и физика небес. тел.* 2019. **35**, № 6. С. 62–79.
13. Козак П. М., Козак Л. В. Метод фотометрії слабких метеорів та штучних супутників Землі із спостережень з телевізійними системами супер-ізокон. *Космічна наука і технологія*. 2015. **21**, № 1. С. 38–47.
14. Козак П. М., Козак Л. В. Про можливість застосування тепловізорів для спостереження метеорів та інших атмосферних утворень в далекому інфрачервоному діапазоні. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Астрономія*. 2019. **2** (60). С. 33–38.
15. Козак П. М., Рожило О. О., Тарануха Ю. Г., Кручиненко В. Г. Кінематичні характеристики вересневих метеорів за базисними телевізійними спостереженнями 2003 року. *Космічна наука і технологія*. 2011. **17**, № 4. С. 51–62.
16. Крамер Е. Н. *Метеорное патрулирование в Одессе*. Страницы истории астрономии в Одессе. 1997. Часть 4. С. 27.
17. Крамер Е. Н., Горбанёв Ю. М. Физические процессы, сопровождающие вспышки ярких метеоров. *Письма в Астрон. журн.* 1990. **16**, № 10. С. 940–945.
18. Мозгова А. М. Речовинний склад вибраних метеорів за дистанційними спектральними спостереженнями. Дисертація. Київ. 2018. 133 с.

19. Патент 117155, Шульга О. В., Бушуєв Ф. І., Вовк В. С., Куліченко М. О. Спосіб пасивної реєстрації метеорних явищ у радіодіапазоні». Патент на корисну модель № 117155. Зареєстровано в державному реєстрі патентів України на корисні моделі 12.06.2017.
20. Патент 118001, Козирев Є. С. Спосіб спостереження низькоорбітальних супутників Землі і опорних зір. Патент на корисну модель № 118001. Зареєстровано у державному реєстрі патентів України 10.07.2017.
21. Пинигин Г. И., Пожалова Ж. А. Николаевское отделение ГАО во второй половине XX века. Николаев: НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория», 2013. 11 с. URL: [http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2015/2015\\_Pinigin\\_p\\_01.pdf](http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2015/2015_Pinigin_p_01.pdf).
22. Савчук С. Г., Янків-Вітковська Л. М. Астрономія у Львівській політехніці. *LEOPOLIS SCIENTIFICA. Наука у Львові до середини ХХ століття: Зб. наук. праць*. 2020. С. 358—380.
23. Святогор О. О., Жилияев Б. Ю., Решетник В. М. Автоматизований наземний комплекс дальньої оптично-цифрової розвідки (АНКОР). Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: зб. тез доп. 17-ї наук.-техн. конф. (Чернігів, 7—8 вересня 2017 р.). Чернігів, 2017. С. 313—314.
24. Сливинский А. П., Бушуев Ф. И., Калужный Н. А., Шульга А. В. Возможность наблюдения галактических метеоров по рассеянию сигналов FM-вещательных станций. *Наука и технологические разработки*. 2013. **92**, № 2. С. 28—34.
25. Churyumov K. I., Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Dashkiev G. N. Observations of fragment of cometary nuclei in the atmosphere over Kiev. *Astron. School's Report*. 2015. **11**, № 2. P. 99—102.
26. Churyumov K. I., Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Dashkiev G. N. «Churyumov Unified Network»: new tasks for astronomical observatories to protect society. *Astron. School's Report*. 2016. **12**, № 1. P. 72—76.
27. Churyumov K. I., Vidmachenko A. P., Steklov A. F., Steklov E. A. Three bright bolides in Kiev sky on 29 March 2013. 8th Conference Meteoroids 2013, held 26—30 August 2013 in the Poznań, Poland. Program and abstracts, IAU C22, Session P12 Fireballs. 2013, Contribution No. 077.
28. Dashkiev G. N., Zhilyaev B. E., Steklov A. F., Vidmachenko A. P. Interesting fireball invasion in the sky over Kiev. 50th Lunar and Planetary Science Conference, held 18-22 March, 2019 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2132, id.1195.
29. European viDeo Meteor Observation Network (EDMONd). URL: <https://fmp.uniba.sk/en/microsites/daa/division-of-astronomy-and-astrophysics/research/meteors/edmond/> (Last accessed: 24.04.2022).
30. Golubaev A. V. Main Parameters of Meteoroid Motion during the Fall of the Chelyabinsk Meteorite Shower on February 15, 2013. *Sol. Syst. Res.* 2015. **49**, № 3. P. 147—158.
31. Golubaev A. V. Sungrazing Dust Particles against the Sporadic Meteor Background. *Sol. Syst. Res.* 2015. **49**, № 4. P. 226—236.
32. Gorbanev Y. M. Odessa Television Meteor Patrol. *Odessa Astron. Publ.* 2009. **22**. P. 60—67.
33. Gorbanev Yu. M., Golubaev A. V., Zhukov V. V., Knyaz'kova E. F., Kimakovskii S. R., Kimakovskaya I. I., Podlesnyak S. V., Sarest L. A., Stogneeveva I. A., Shestopalov V. A. Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors. *Sol. Syst. Res.* 2006. **40**, № 5. P. 412—426.
34. Gorbanev Yu. M., Golubaev A. V., Zhukov V. V., Kimakovskaya I. I., Kimakovskiy S. R., Knyazkova E. F., Podlesnyak S. V., Sarest L. A., Stogneeveva I. A., Shestopalov V. A. Techniques for positional measurements of telescopic meteor TV images. *Sol. Syst. Res.* 2008. **42**, № 1. P. 35—50.
35. Gorbanev Yu. M., Ivanova I. I. Modelling of meteors light-curves. *Astron. School's Report*. 2004. **5**, № 1-2. P. 135—140.
36. Gorbanev Yu. M., Kimakovskiy S. R. A statistical modelling of meteor showers. *Astron. School's Report*. 2004. **5**, № 1-2. P. 41—149.
37. Gorbanev Yu. M., Knyaz'kova E. F. Young Meteor Swarms Near the Sun: I. Statistical Correlation of Meteors with Families of Short-Perihelion Comets. *Sol. Syst. Res.* 2003. **37**, № 6. P. 506—518.
38. Gorbanev Yu. M., Konovalova N. A., Davruqov N. Kh Groups of meteorites and meteorite-dropping fireballs in asteroidal orbits. *J. Phys. Studies*. 2021. **25**, № 4. 4902 (6 p.). DOI:<https://doi.org/10.30970/jps.25.4902>
39. Gorbanev Y. M., Kramer E. N. Structure and evolution of «asteroidal» meteor swarms. *Sol. Syst. Res.* 1994. **27**, № 4. P. 376—381.
40. Grabowski L. Politechnika Lwowska. Obserwatoriumy astronomiczno-meteorologiczne ze Stacją sejsmograficzną. Sprawozdanie z działalności z 1918r do 1927 r. Odbitka z rocznika Astronomicznego obserwatorium Krakowskiego na rok 1928, tom V, Krakow. 1928. P. 91—96.
41. Hajdukova M., Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., Taranucha Ju. G., Rozhilo A. A., Eryomin S. S., Kozak P. N. Perseid meteor stream 1991—1993 from TV observations in Kiev. *Earth, Moon and Planets*. 1995. **68**. P. 297—301.
42. Hrushytska I. B. Development of meteor astronomy at the Odessa University during the period of Ukraine's independence. *History of science and technology*. **9**. 1(14). P. 77—88. DOI: [https://doi.org/10.32703/2415-7422-2019-9-1\(14\)-77-88](https://doi.org/10.32703/2415-7422-2019-9-1(14)-77-88)



43. International Astronomical Union Meteor Data Center Meteor Databases. Version 2020. URL: <https://www.astro.sk/iaumdcDB/> (Last accessed: 24.01.2022).
44. Kartashova A., Golubaev A., Mozgova A., Chuvashov I., Bolgova G., Glazachev D., Efremov V. Investigation of the Ozerki meteoroid parameters. *Planetary and Space Sci.* 2020. **193**. P. 105034. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105034>
45. Kozak P. «Falling Star»: Software for Processing of Double-Station TV Meteor Observations. *Earth, Moon, and Planets.* 2008. **102** (1-4). P. 277–283.
46. Kozak P. M. Semi-empirical method for the photometry of low-light meteors from observations with the isocon television system. *The Meteoroids 2013, Proceedings of Astronomical Conference at A. M. University, Poznan, Poland, Aug. 26-30*. Eds.: T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams. A. M. University Press. 2014. P. 335–343.
47. Kozak P. M., Lapchuk V. P., Kozak L. V., Ivchenko V. M. Optimization of video camera disposition for the maximum calculation precision of coordinates of natural and artificial atmospheric objects in stereo observations. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2018. **34** (6). P. 314–327.
48. Kozak P., Rozhilo O., Kruchynenko V., Kazantsev A., Taranukha A. Results of processing of Leonids-2002 meteor storm TV observations in Kyiv. *Adv. in Space Res.* 2007. **39** (4). P. 619–623.
49. Kozak P. M., Rozhilo A. A., Taranukha Y. G. Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors. *The Meteoroids 2001, Proceedings of Conference, Kiruna, Sweden, 6-10 August, 2001*. — ESA-SP 495. Ed. Barbara Warmbein. 2001. P. 337–342.
50. Kozak P. M., Watanabe J. Upward-moving low-light meteor. I. Observation results. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. **467** (1). P. 793–801.
51. Kozak P. M., Watanabe J. Meteors with extreme beginning heights from observations with high-sensitivity super-isocon TV systems. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2020. **497** (4). P. 5550–5559.
52. Kramer E. N., Gorbanev Y. M., Skoblikova L. Ya. Drift and oscillations of the orbital elements of cosmic dust. *Astron. Reports.* 1994. **38** (4). P. 589–593.
53. Kruchynenko V. G., Kazantsev A. M., Taranukha Yu. G., Kozak P. M., Yeryomin S. S., Rozhylo O. O., Smertyuk L. M. Catalogue of Perseid shower meteors on TV observations in Kyiv during 1991–1993. *Вісник Київського Університету, Астрономія.* 1997. Вип. 34. С. 94–117.
54. Kulichenko M. O., Maigurova N. V., Shulga O. V. Kulichenko M. O. Investigation of the photometric system of the meteor TV CCD cameras. *Odessa Astron. Publ.* 2020. **33**. P. 129–132.
55. Kulichenko M. O., Shulga O. V. Double station observation of meteors with low baseline in Mykolaiv. *Odessa Astron. Publ.* 2017. **30**. P. 230–231.
56. Kulichenko M. O., Shulga A. V. Radiances and orbital distribution of TV faint sporadic meteors. *Odessa Astron. Publ.* 2018. **31**. P. 186–190.
57. Kulichenko M. O., Shulga O. V., Gorbanev Yu. M. Results of positional and photometric measurements of meteor trajectories observed in Mykolaiv 2017–2018. *Odessa Astron. Publ.* 2019. **32**. P. 165–167.
58. Kulichenko N., Shulga O., Kozryyev Y., Sybiryakova Y. Double station observation of meteors in Nikolaev. *WGN.* 2015 **43** (3). P. 81–84.
59. Morozhenko A. V., Vidmachenko A. P. On the accuracy of indirect methods for estimating the sizes of asteroids. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2013. **29** (5). P. 237–242.
60. Morozhenko A. V., Vidmachenko A. P., Nevodovskii P. V. Aerosol in the upper layer of Earth's atmosphere. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2013. **29** (5). P. 243–246.
61. *NASA Meteor Shower Portal*. URL: <http://cams.seti.org/FDL/> (Last accessed: 24.01.2022).
62. *NASA All Sky Fireball Network*. URL: <https://fireballs.ndc.nasa.gov/> (Last accessed: 24.01.2022).
63. Nevodovskiy P., Vidmachenko A., Ivakhiv O., Zbrutskiy O., Geraimchuk M., Hirniak Y. Remote Study of the Earth Stratospheric Aerosol. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 16–18, 2019 at Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Conference Proceedings, P. 640–644.
64. *Radio Meteor Observing Bulletin (RMOB)*. URL: <https://www.rmob.org/index.php> (Last accessed: 24.01.2022).
65. *Sonotaco.com. Soft UFO*. Електронний ресурс: [https://sonotaco.com/soft/e\\_index.html#ufoo](https://sonotaco.com/soft/e_index.html#ufoo) (Last accessed: 24.01.2022).
66. Spanish Meteor Network. URL: <http://www.spmn.uji.es/ENG/presentation.html> (Last accessed: 24.01.2022).
67. *UFOCapture is motion capture software*. URL: [http://sonotaco.com/e\\_index.html](http://sonotaco.com/e_index.html) (Last accessed: 24.01.2022).
68. Vida D., Segon D., Gural P., Brown P., McIntyre M., Dijkema T., Pavletic L., Kukic P., Mazur M., Eschman P., Roggemans P., Merlak A., Zubovik D. The Global Meteor Network — Methodology and First Results. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2021. **506** (4). P. 5046–5074.
69. Vidmachenko A. P., Vashchenko E. P., Ivchenko V. N., Sandakova E. V. Television Observations of Meteors. *Sol. Syst. Res.* 1977. **10** (4). P. 194–197.
70. Vovk V. S., Shulga O. V., Sybiryakova Ye. S., Kaliuzhniy M. P., Bushuev F. I., Kulichenko M. O. Low-tech Highly Efficient Radiotechnical Solutions for Meteors and Satellite Observations. *Sci. innov.* 2017. **13** (1). P. 65–68.

71. Zhilyaev B. E., Reshetnyk V., Petukhov V. N. On reconstruction of astronomical images in observations through turbulent atmosphere. *Bulgarian Astron. J.* 2018. **29**. P. 67–73.
72. Zhilyaev B. E., Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Verliuk I. A. Rarefaction waves in meteor traces. 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16–20 March, 2020 at The Woodlands, Texas. *LPI Contribution No. 2326*, 2020, id.1098.
73. Zhilyaev B. E., Vidmachenko A. P., Steklov A. F. Physical characteristics of space invasion. *Astron. School's Report*. 2020. **16** (2). P. 43–47.
74. Zhilyaev B. E., Vidmachenko A. P., Steklov A. F. Meteor with interesting characteristics from the 2001 Leonids meteor shower. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15–19 March, 2021. *LPI Contribution No. 2548*, id.1067.
75. Zhilyaev B. E., Vidmachenko A. P., Steklov A. F., Pokhvala S. M., Verlyuk I. A. The physics of space intrusions. I. Features of the trajectories. *Astron. School's Report*. 2020. **16** (1). P. 8–15.
76. Zhilyaev B. E., Vidmachenko A. P., Steklov A. F., Pokhvala S. M., Verlyuk I. A. The physics of space intrusions. I. Features of the trajectories. *Astron. School's Report*. 2020. **16** (1). P. 8–15.

## REFERENCES

1. A. s. Kozyriev Ye. S. (2011). Certificate of copyright registration for the work № 37593. Registration of meteor phenomena using television cameras (Meteordetect). Registered in the state register of Ukraine 25.03.2011.
2. A. s. Kulichenko M. O. (2017). Certificate of copyright registration for the work № 75259. Automatic extraction and analysis of meteor trajectories («TraEx»). Registered in the state register of Ukraine 07.12.2017.
3. A. s. Vovk V. S., Kulichenko M. O. (2017). Automatic detection of meteors and artificial satellites of Earth using the radio receiver RTL2832. Certificate of copyright registration for the work № 75962. Registered in the state register of Ukraine 07.12.2017. URL: [http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2017/2017\\_75258\\_Vovk.pdf](http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2017/2017_75258_Vovk.pdf) (Last accessed: 24.04.2022).
4. Bushuev F., Kaliuzhnyi M., Kulichenko M., Shulga O., Malynovskiy Y., Savchuk S., Yankiv-Vitkovska L., Hrudynin B. (2021). Formation and development of the Ukrainian network of meteor radio observations. *Space Science and Technology*, **27**, № 3 (130), 85–92 [In Ukrainian].
5. Bushuev F. I., Kaliuzhnyi N. A., Slivinsky A. P., Shulga A. V. (2011). The use of FM-signals of broadcasting stations for meteor activity investigation. *Space Science and Technology*, **17**, № 3, 60–70 [In Russian].
6. Golubaev A. V. (2017). *Kinematic and Physical Characteristics of Meteoroids with Radiances Near the Sun According to Terrestrial Television Observations*. PhD thesis. Kyiv, 195 p. URL: [http://svrada.nau.edu.ua/2017.06.27\\_Golubaev/](http://svrada.nau.edu.ua/2017.06.27_Golubaev/) (Last accessed: 24.04.2022) [In Ukrainian].
7. Gorbanev Yu. M., Knyaz'kova E. F., Shulga A. V., Kulichenko M. O., Kozak P. M., Mozgova A. M., Golubaev A. V. (2016). Ukrainian meteor optical network. *Radiotekhnika*, № 185, 5–8 [In Russian].
8. Gorbanev Yu. M., Shestopalov V. A., Sarest L. A., Golubaev A. V. (2008). *Television meteor patrolling on Zmeinyy Island. Research (the current state) of Zmeinyy Island ecosystem*. Odesa: Astroprint [In Ukrainian].
9. Koval Yu. I., Kundyukov S. G., Bavykina V. V., Tkachuk A. A., Lutsenko A. B., Nesterenko G. V. (2004). The use of radio meteor equipment for the operational synchronization of time and frequency standards within the line of sight. *Radioelectronics and Informatics*, № 1, 14–19 [In Russian].
10. Kozak P. M. (2002). Analysis of the methods and precision of determination of the equatorial coordinates in digital reducing of TV observations of meteors. *Kinematics and Physics of Celestial bodies*, **18**, № 5, 471–480 [In Russian].
11. Kozak P. M. (2003). A vector method for the determination of trajectory parameters and heliocentric orbit elements of a meteor in TV observations. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **19**, № 1, 62–76 [In Russian].
12. Kozak P. M. (2019). Diffuse structure of some meteors at the beginning of their trajectories at classical heights. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **35**, № 6, 286–294 [In Russian].
13. Kozak P. M., Kozak L. V. (2015). Method for photometry of faint meteors and artificial earth's satellites from observations with super-isocon TV systems. *Space Science and Technology*, **21**, № 1, 38–47 [In Ukrainian].
14. Kozak P. M., Kozak L. V. (2019). On the possibility of using thermal vision cameras for observations of meteors and other atmospheric formations in long wave infrared. *Bull. Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv, Astronomy*, **2**, № 60, 33–38 [In Ukrainian].
15. Kozak P. M., Rozhilo O. O., Taranukha Y. G., Kruchynenko V. G. (2011). Kinematic characteristics of September meteors from double-station TV observations in 2003. *Space Science and Technology*, **17**, № 4, 51–62 [In Ukrainian].
16. Kramer E. N. (1997). *Meteor patrolling in Odessa*. Pages of the history of astronomy in Odessa. Collection, Part 4, 27 [In Russian].
17. Kramer E. N., Gorbanev Y. M. (1990). The physical processes in the bright meteor flares. *Astron. Letters*, **16**, № 10, 940–945 [In Russian].

18. Mozgova A. M. (2018). Material composition of meteors by remote spectral observations. PhD thesis. Kyiv [In Ukrainian].
19. Patent Shulga O. V., Bushuev F. I., Vovk V. S., Kulichenko M. O. (2017). Patent for utility model No 117155. Method of passive registration of meteor phenomena in radio range. Registered in the state register of patents of Ukraine for utility models 12.06.2017 [In Ukrainian].
20. Patent Kozyriev Ye. S. (2017). Patent for utility model No 118001. A method of observation of low-orbit Earth satellites and reference stars. Registered in the state register of patents of Ukraine for utility models 10.07.2017 [In Ukrainian].
21. Pinigin G. I., Pozhalova Zh. A. (2013). Nikolaev division of MAO in the second half of XX century. Nikolaev. RI «Nikolaev astronomical observatory». 11 p. URL: [http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2015/2015\\_Pinigin\\_p\\_01.pdf](http://www.nao.nikolaev.ua/articles/2015/2015_Pinigin_p_01.pdf) [in Russian].
22. Savchuk S. G., Yankiv-Vitkovska L. M. (2020). Astronomy at Lviv Polytechnic LEOPOLIS SCIENTIFICA. Science in Lviv until the middle of the XX century. Scientific works collection. Lviv, 358—380 [In Ukrainian].
23. Svyatohorov O. A., Zhilyaev B. Y., Reshetnyk V. M. (2017). Automated ground-based long-range optical-digital reconnaissance complex (ANCOR). Creation and modernization of armaments and military equipment in modern conditions: abstracts of the 17th scientific and technical conference, Chernihiv, September 7—8, 2017. P. 313—314 [In Ukrainian].
24. Slivinsky A. P., Bushuev F. I., Kalyuzhny N. A., Shulga A. V. (2013). The possibility of galactic meteors observations by scattering signals of FM broadcast stations. *Sci. and Technological Developments*, **92**, № 2, 28—34 [in Russian].
25. Churyumov K. I., Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Dashkiev G. N. (2015). Observations of fragment of cometary nuclei in the atmosphere over Kiev. *Astron. School's Report*, **11**, № 2, 99—102.
26. Churyumov K. I., Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Dashkiev G. N. (2016). «Churyumov Unified Network»: new tasks for astronomical observatories to protect society. *Astron. School's Report*, **12**, № 1, 72—76.
27. Churyumov K. I., Vidmachenko A. P., Steklov A. F., Steklov E. A. (2013). Three bright bolides in Kiev sky on 29 March 2013. 8th Conference Meteoroids 2013, held 26—30 August 2013 in the Poznań, Poland. Program and abstracts, IAU C22, Session P12 Fireballs. 2013, Contribution № 077.
28. Dashkiev G. N., Zhilyaev B. E., Steklov A. F., Vidmachenko A. P. (2019). Interesting fireball invasion in the sky over Kiev 50th Lunar and Planetary Science Conference, held 18—22 March, 2019 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution. 2019. No. 2132. id.1195.
29. European viDeo Meteor Observation Network (EDMONd). URL: <https://fmph.uniba.sk/en/microsites/daa/division-of-astronomy-and-astrophysics/research/meteors/edmond/> (Last accessed: 24.04.2022).
30. Golubaev A. V. (2015). Main Parameters of Meteoroid Motion during the Fall of the Chelyabinsk Meteorite Shower on February 15, 2013. *Sol. Syst. Res.*, **49**, № 3, 147—158.
31. Golubaev A. V. (2015). Sungrazing Dust Particles against the Sporadic Meteor Background. *Sol. Syst. Res.*, **49**, № 4, 226—236.
32. Gorbaney Y. M. (2009). Odessa Television Meteor Patrol. *Odessa Astron. Publ.*, **22**, 60—67.
33. Gorbaney Yu. M., Golubaev A. V., Zhukov V. V., Knyaz'kova E. F., Kimakovskii S. R., Kimakovskaya I. I., Podlesnyak S. V., Sarest L. A., Stogneeveva I. A., Shestopalov V. A. (2006). Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors. *Sol. Syst. Res.*, **40**, № 5, 412—426.
34. Gorbaney Yu. M., Golubaev A. V., Zhukov V. V., Kimakovskaya I. I., Kimakovskiy S. R., Knyazkova E. F., Podlesnyak S. V., Sarest L. A., Stogneeveva I. A., Shestopalov V. A. (2008). Techniques for positional measurements of telescopic meteor TV images. *Sol. Syst. Res.*, **42**, № 1, 35—50.
35. Gorbaney Yu. M., Ivanova I. I. (2004). Modelling of meteors light-curves. *Astron. School's Report*, **5**, № 1, 135—140.
36. Gorbaney Yu. M., Kimakovskiy S. R. (2004). A statistical modelling of meteor showers. *Astron. School's Report*, **5**, № 1-2, 41—149.
37. Gorbaney Yu. M., Knyaz'kova E. F. (2003). Young Meteor Swarms Near the Sun: I. Statistical Correlation of Meteors with Families of Short-Perihelion Comets. *Sol. Syst. Res.*, **37**, № 6, 506—518.
38. Gorbaney Yu. M., Konovalova N. A., Davruqov N. (2021). Kh Groups of meteorites and meteorite-dropping fireballs in asteroidal orbits. *J. Phys. Studies*, **25**, № 4, 4902 (6 p.). DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.25.4902>
39. Gorbaney Y. M., Kramer E. N. (1994). Structure and evolution of «asteroidal» meteor swarms. *Sol. Syst. Res.*, **27**, № 4, 376—381.
40. Grabowski L. (1928). Politechnika Lwowska. Obserwatorjum astronomiczno-meteorologiczne ze Stacją sejsmograficzną. Sprawozdanie z działalności z 1918r do 1927r. Odbitka z rocznika Astronomicznego obserwatorium Krakowskiego na rok 1928, tom v, Krakow., s. 91—96.
41. Hajdukova M., Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., Taranucha Ju. G., Rozhilo A. A., Eryomin S. S., Kozak P. N. (1995). Perseid meteor stream 1991—1993 from TV observations in Kiev. *Earth, Moon and Planets*, **68**, 297—301.
42. Hrushytska I. B. (2019). Development of meteor astronomy at the Odessa University during the period of Ukraine's independence. *History of science and technology*, **9**, № 1 (14). DOI: [https://doi.org/10.32703/2415-7422-2019-9-1\(14\)-77-88](https://doi.org/10.32703/2415-7422-2019-9-1(14)-77-88)

43. International Astronomical Union Meteor Data Center Meteor Databases. Version 2020. URL: <https://www.astro.sk/iaumdcDB/> (Last accessed: 24.04.2022).
44. Kartashova A., Golubaev A., Mozgova A., Chuvashov I., Bolgova G., Glazachev D., Efremov V. (2020). Investigation of the Ozerki meteoroid parameters. *Planetary and Space Sci.*, **193**, 105034. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105034>.
45. Kozak P. (2008). «Falling Star»: Software for Processing of Double-Station TV Meteor Observations. *Earth, Moon, and Planets*, **102**, № 1–4, 277–283.
46. Kozak P. M. (2014). *Semi-empirical method for the photometry of low-light meteors from observations with the isocon television system*. The Meteoroids 2013, Proceedings of Astronomical Conference at A.M. University, Poznan, Poland, Aug. 26–30, Eds. T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams. A.M.: University Press, 335–343.
47. Kozak P. M., Lapchuk V. P., Kozak L. V., Ivchenko V. M. (2018). Optimization of video camera disposition for the maximum calculation precision of coordinates of natural and artificial atmospheric objects in stereo observations. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **34**, № 6, 314–327.
48. Kozak P., Rozhilo O., Kruchynenko V., Kazantsev A., Taranukha A. (2007). Results of processing of Leonids-2002 meteor storm TV observations in Kyiv. *Adv. in Space Res.*, **39**, № 4, 619–623.
49. Kozak P. M., Rozhilo A., Taranukha Y. G. (2001). *Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors*. The Meteoroids 2001, Proceedings of Conference, Kiruna, Sweden, 6–10 August, 2001, ESA-SP 495, Ed. B. Warmbein. P. 337–342.
50. Kozak P. M., Watanabe J. (2017). Upward-moving low-light meteor. I. Observation results. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **467**, № 1, 793–801.
51. Kozak P.M., Watanabe J. (2020). Meteors with extreme beginning heights from observations with high-sensitivity super-isocon TV systems. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **497**, № 4, 5550–5559.
52. Kramer E. N., Gorbanev Y. M., Skoblikova L. Ya. (1994). Drift and oscillations of the orbital elements of cosmic dust. *Astron. Rep.*, **38**, № 4, 589–593.
53. Kruchinenko V. G., Kazantsev A. M., Taranukha Yu. G., Kozak P. M., Yeryomin S. S., Rozhylo O. O., Smertyuk L. M. (1997). Catalogue of Perseid shower meteors on TV observations in Kyiv during 1991–1993. *Bull. Taras Shevchenko Nat. Univ. Kyiv. Astronomy*, **34**, 94–117.
54. Kulichenko M. O., Maigurova N. V., Shulga O. V. (2020). Investigation of the photometric system of the meteor TV CCD cameras. *Odessa Astron. Publ.*, **33**, 129–132.
55. Kulichenko M. O., Shulga O. V. (2017). Double station observation of meteors with low baseline in Mykolaiv. *Odessa Astron. Publ.*, **30**, 230–231.
56. Kulichenko M. O., Shulga A. V. (2018). Radiants and orbital distribution of TV faint sporadic meteors. *Odessa Astron. Publ.*, **31**, 186–190.
57. Kulichenko M. O., Shulga O. V., Gorbanev Yu. M. (2019). Results of positional and photometric measurements of meteor trajectories observed in Mykolaiv 2017–2018. *Odessa Astron. Publ.*, **32**, 165–167.
58. Kulichenko N., Shulga O., Kozryyev Y., Sybiryakova Y. (2015). Double station observation of meteors in Nikolaev. *WGN*, **43**, № 3, 81–84.
59. Morozhenko A. V., Vidmachenko A. P. (2013). On the accuracy of indirect methods for estimating the sizes of asteroids. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **29**, № 5, 237–242.
60. Morozhenko A. V., Vidmachenko A. P., Nevodovskii P. V. (2013). Aerosol in the upper layer of earth's atmosphere. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **29**, № 5, 243–246.
61. NASA Meteor Shower Portal. URL: <http://cams.seti.org/FDL/> (Last accessed: 24.04.2022).
62. NASA All Sky Fireball Network. URL: <https://fireballs.ndc.nasa.gov/> (Last accessed: 24.04.2022).
63. Nevodovskiy P., Vidmachenko A., Ivakhiv O., Zbrutskiy O., Geraimchuk M., Hirniak Y. (2019). Remote Study of the Earth Stratospheric Aerosol (2018) IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 16–18, 2019 at Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Conference Proceedings, 640–644.
64. Radio Meteor Observing Bulletin (RMOB). URL: <https://www.rmob.org/index.php> (Last accessed: 24.04.2022).
65. *Sonotaco.com. Soft UFO*. URL: [https://sonotaco.com/soft/e\\_index.html#ufoo](https://sonotaco.com/soft/e_index.html#ufoo) (Last accessed: 24.04.2022).
66. Spanish Meteor Network. URL: <http://www.spmn.uji.es/ENG/presentation.html> (Last accessed: 24.04.2022).
67. UFOCapture is motion capture software. URL: [http://sonotaco.com/e\\_index.html](http://sonotaco.com/e_index.html) (Last accessed: 24.04.2022).
68. Vida D., Segon D., Gural P., Brown P., McIntyre M., Dijkema T., Pavletic L., Kukic P., Mazur M., Eschman P., Roggemans P., Merlak A., Zubovik D. (2021). The Global Meteor Network - Methodology and First Results. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **506**, № 4, 5046–5074.
69. Vid'Machenko A. P., Vashchenko E. P., Ivchenko V. N., Sandakova E. V. (1977). Television Observations of Meteors. *Solar System Res.*, **10**, № 4, 194–197.

70. Vovk V. S., Shulga O. V., Sybiryakova Ye. S., Kaliuzhnyi M. P., Bushuev F. I., Kulichenko M. O. (2017). Low-tech Highly Efficient Radiotechnical Solutions for Meteors and Satellite Observations. *Sci. innov.*, **13**, № 1, 65—68.
71. Zhilyaev B. E., Reshetnyk V., Petukhov V. N. (2018). On reconstruction of astronomical images in observations through turbulent atmosphere. *Bulgarian Astron. J.*, **29**, 67—73.
72. Zhilyaev B. E., Steklov A. F., Vidmachenko A. P., Verliuk I. A. (2020). Rarefaction waves in meteor traces (2020) 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16—20 March, 2020 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution № 2326, id.1098.
73. Zhilyaev B. E., Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2020). Physical characteristics of space invasion. *Astron. School's Report*, **16**, № 2, 43—47.
74. Zhilyaev B. E., Vidmachenko A. P., Steklov A. F. (2019). Meteor with interesting characteristics from the 2001 Leonids meteor shower. 52nd Lunar and Planetary Science Conference, held virtually, 15—19 March, 2021. LPI Contribution. № 2548. id.1067.
75. Zhilyaev B. E., Vidmachenko A. P., Steklov A. F., Pokhvala S. M., Verlyuk I. A. (2020). The physics of space intrusions. I. Features of the trajectories. *Astron. School's Report*, **16**, № 1, 8—15.
76. Zhilyaev B. E., Vidmachenko A. P., Steklov A. F., Pokhvala S. M., Verlyuk I. A. (2020). The physics of space intrusions. I. Features of the trajectories. *Astron. School's Report*, **16**, № 1, 8—15.

Стаття надійшла до редакції 13.04.2022

Після доопрацювання 24.05.2022

Прийнято до друку 24.05.2022

Received 13.04.2022

Revised 24.05.2022

Accepted 24.05.2022

A. V. Golubaev<sup>1</sup>, Head of Chuguev Observ. Station, Senior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: Alexandr\_sky1@ukr.net

Yu. M. Gorbanev<sup>2</sup>, Senior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: skydust@ukr.net

O. V. Shulga<sup>3</sup>, Director, Senior Researcher, Dr. Sci. in Phys&Math.

shulga-av@ukr.net

O. A. Andreev<sup>4</sup>, Director

E-mail: oa\_andreev@ukr.net

F. I. Bushuev<sup>3</sup>, Researcher

E-mail: felix.bushuev@ukr.net

A. P. Vidmachenko<sup>5</sup>, Chief Researcher, Dr. Sci. in Phys&Math

E-mail: vida@mao.kiev.ua

B. O. Hrudynin<sup>6</sup>, Dean of the Department of Technological and Professional Education, Docent,

Dr. Sci. in Pedagogic Sciences

E-mail: b.hrudynin@ukr.net

B. E. Zhilyaev<sup>5</sup>, Head of Laboratory, Dr. Sci. in Phys&Math

E-mail: zhilyaev@mao.kiev.ua

M. P. Kaliuzhnyi<sup>3</sup>, Head of Department, Ph.D. in Phys&Math.

E-mail: nikalyuzhny@ukr.net

P. M. Kozak<sup>7</sup>, Senior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: kpm@knu.ua

M. O. Kulichenko<sup>3</sup>, Head of Department, Ph.D. in Phys&Math.

E-mail: niiko4kulichenko@gmail.com

Ye. V. Malynovskyi<sup>4</sup>, Head of Department of Natural Sciences and Mathematics, master

E-mail: malinovskyyeugeniy@gmail.com

A. M. Mozgova<sup>7</sup>, Junior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: alenamozgova@ukr.net

S. G. Savchuk<sup>8</sup>, Professor, Dr. Sci. in Tech

E-mail: ssavchuk@polynet.lviv.ua

A. F. Steklov<sup>5</sup>, Senior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: stec36@i.ua

Yu. P. Sumaruk<sup>9, 10</sup>, Leading Researcher, Dr. Sci. in Phys&Math

E-mail: yurisumaruk@gmail.com

L. M. Yankiv-Vitkovska<sup>8</sup>, Docent, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: luba\_y@ukr.net

<sup>1</sup> Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

<sup>2</sup> Research Institute «Astronomical Observatory», Odesa National I. I. Mechnikov University

1v Marazliyivska Str., Odesa, 65014 Ukraine

<sup>3</sup> Research Institute «Mykolaiv Astronomical Observatory»

1 Observatorna Str., Mykolaiv, 54030 Ukraine

<sup>4</sup> Rivne Minor Academy of Science of School-Age Youth

17 Simon Petliura Str., Rivne, 33013 Ukraine

<sup>5</sup> Main astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine

27 Akademik Zabolotny St., Kyiv, 03143 Ukraine

<sup>6</sup> Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University

24 Kyivo-Moscovska Str., Hlukhiv, 41400 Ukraine

<sup>7</sup> Astronomical Observatory, Taras Shevchenko National University of Kyiv

3 Observatorna Str., Kyiv, 04053 Ukraine

<sup>8</sup> Lviv Polytechnic National University

12 Stepan Bandera Str., Lviv, 79013 Ukraine

<sup>9</sup> Institute of Geophysics by S.I. Subbotin name National Academy of Sciences of Ukraine

32 Palladin av., Kyiv, 03142 Ukraine

<sup>10</sup> National Antarctic Scientific Center of Ukraine

16 Taras Shevchenko boulevard, Kyiv, 01601 Ukraine

#### CREATION OF UKRAINIAN METEOR OBSERVATION NETWORK: INSTRUMENTS, METHODS FOR PROCESSING, OBSERVATION POSSIBILITIES

The development of meteor astronomy in modern Ukraine is considered. The specificity of meteor observation methods requires, first of all, the organization of a network of corresponding observation points. To achieve this goal, it is proposed to combine the scientific and technical capabilities of participating organizations in the form of the Ukrainian Meteor Observation Network (UMON). UMON is a set of two or more permanent observation stations located on the territory of Ukraine, which have the hardware and software for basic and one-sided observations of meteors in different wavelength ranges and conduct such observations. UMON aims to solve important problems of meteor research, structure and evolution of meteor streams and showers, the interaction of meteoroids with the Earth's atmosphere and their chemical composition. The scientific and technical products of UMON stations are the results of high-precision basic or one-sided observations of meteors in different wavelength ranges, as well as of fundamental and applied scientific and technical research.

**Keywords:** *meteor, meteor stream, observation network, optical video observations, passive radio observations, meteor catalogues.*

<https://doi.org/10.15407/knit2022.04.071>

**М. М. ФИС**, д-р техн. наук, доцент, проф.

**П. М. ЗАЗУЛЯК**, д-р фіз.-мат. наук, проф., проф. кафедри

**А. Р. СОГОР**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри

Національний університет «Львівська Політехніка»

вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013

## ПОТЕНЦІАЛ СИЛИ ТЯЖІННЯ ТА ПОТЕНЦІАЛ ВІДЦЕНТРОВОЇ СИЛИ ВСЕРЕДИНИ ЕЛІПСОЇДАЛЬНОЇ ПЛАНЕТИ

*Запропонована методика визначення потенціалу притягання небесного тіла, поверхня якого є сферою чи еліпсоїдом зі стрибкоподібною функцією розподілу мас. Для цих випадків отримано формули для визначення внутрішнього потенціалу та сили тяжіння. Виконані за цими формулами обчислення дають змогу зробити аналіз вкладу еліптичності планети в значення її внутрішнього потенціалу та порівняти його з величиною відцентрової сили для планет земної групи (Земля, Марс, Венера) та Місяця.*

**Ключові слова:** еліпсоїд, потенціал, відцентрова сила, сила тяжіння, концепція гравітаційних дисків.

**Постановка проблеми.** Загальновідомо [2], що потенціал сили тяжіння зменшується при віддаленні від точки тяжіння, а потенціал відцентрової сили, навпаки, збільшується. Тому очевидно, що сумарний ефект потенціалу сили тяжіння набуває свого значення всередині планети. Значення потенціалу сили тяжіння всередині планети не можна отримати безпосередніми вимірюваннями, хоч можна подати його рядом внутрішніх сферичних функцій [1]. Характер його поведінки відіграє важливу роль при дослідженні Землі та планет та їхньому трактуванні як небесних тіл. Важливим фактором постає питання формування потенціалу сили тяжіння, який включає два компоненти: потенціал сили притягання та потенціал сили обертання. Визначальним чинником у вирішенні цього питання є встановлення формул для обчислення потенціалу еліпсоїдальної планети.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивченню потенціалу сили тяжіння всередині планети на сьогодні надається недостатньо уваги, хоча ця проблема становить теоретичний та практичний інтерес. Тому окремі дослідження з цієї тематики заслуговують уваги для їхнього розгляду та застосування. Зокрема, в роботі [5] виконано обчислення потенціалу для однієї з відомих радіальних моделей густини PREM. Отримання формул для визначення потенціалів сферичної планети розглянуто в роботі [6]. На їхній основі у роботі [9] знайдено потенціали для окремих важливих для задач геофізики розподілів мас всередині планети. Запропонований в даній роботі підхід доповнює класичні дослідження з іншого боку та може використовуватися як в геодезичних, так і в геофізичних та астрономічних дослідженнях [10].

Цитування: Фис М. М., Зазуляк П. М., Согор А. Р. Потенціал сили тяжіння та його складова відцентрової сили всередині еліпсоїдальної планети. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 4 (137). С. 71–77. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.071>

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Потенціал всередині еліпсоїдальної планети визначено для постійного розподілу мас, причому на поверхні рівневого еліпсоїда подається замкнутою формулою [11]. Логічно постає завдання узагальнення цих виразів для потенціалу з постійною щільністю на випадок кускового неперервного радіального розподілу мас надр планети, фігура якої — еліпсоїд. На відміну від сферично-симетричного небесного тіла, для якого відомі класичні формули визначення потенціалу, їхнє отримання для еліпсоїдальних тіл пов'язане із застосуванням результатів класичної теорії потенціалу еліпсоїда. Слід зауважити, що отримані таким чином значення характеризуються тривимірним розподілом для однорідної еліпсоїдальної планети. Отримання виразів потенціалу дозволяє надалі використати їх для обчислення енергії гравітаційного поля як кульового, так і еліпсоїдального небесного тіла [3]. На їхній основі також в даних дослідженнях виконано обчислення потенціалу сили тяжіння для планет земної групи та проаналізовано вклад кожного з компонентів у значення сили тяжіння.

**Мета статті.** Отримати вирази для знаходження потенціалу еліпсоїдальної планети та застосувати їх для порівняння потенціалу відцентрової сили з потенціалом сили тяжіння еліпсоїдальних планет земної групи.

**Виклад основного матеріалу.** Значення потенціалів сили притягання сферичної та еліпсоїдальної планет, рівновеликих за об'ємом, однорідного розподілу мас відрізняються між собою. Наприклад, у центрі мас вони подаються різними формулами:

$$V = \frac{GM}{R},$$

$$V = \frac{GM}{a} \left( 1 + \frac{1}{6}e^2 + \dots + \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!(2n+1)}(e^2)^n + \dots \right),$$

де  $e^2 = 1 - (c/a)^2$ ,  $a$ ,  $c$  — півосі еліпсоїда  $\tau$  відповідно для кулі та двовісного еліпсоїда.

Потенціал сили тяжіння планет  $U$  формується з двох складових: потенціалу сили притягання  $V$  та потенціалу відцентрової сили  $W$ . Для довільного тіла ці компоненти по-різному впливають на величину  $U$ , а саме вклад першої зменшується

зі збільшенням віддалі  $r$  від точки притягання (зменшення глибини), другої, навпаки, — зростає. Дослідження їхнього взаємовпливу на величину  $U$  здійснимо на моделі щільності мас надр небесного тіла, представленій функцією трьох стрибків (ядро, мантія та кора). За фігуру планети беремо тривісний еліпсоїд  $\tau = \{x^2/a^2 + y^2/b^2 + z^2/c^2 \leq 1\}$ . Така модель щільності притаманна всім планетам та описує основний вклад у величину потенціалу притягання. Для еліпсоїдальної планети вона змінюється з глибиною, по широті та довготі, що підтверджується дослідженнями для Землі [7].

Наведемо основні робочі формули, необхідні для подальших досліджень [9, 10]. Потенціал притягання однорідного тривісного еліпсоїда  $\tau$  визначається формулою

$$V = \frac{3}{4}GV_{\tau} \delta \int_{0,\xi}^{\infty} \left( 1 - \frac{x^2}{a^2+u} - \frac{y^2}{b^2+u} - \frac{z^2}{c^2+u} \right) \frac{du}{Q(u)},$$

де  $V_{\tau}$  — об'єм еліпсоїда  $\tau$ ,  $\delta$  — щільність розподілу мас ( $\delta = \text{const}$ ),

$$Q(u) = \sqrt{(a^2+u)(b^2+u)(c^2+u)},$$

$\xi$  — еліпсоїдальна координата (найбільший корінь кубічного рівняння):

$$\frac{x^2}{a^2+\xi} + \frac{y^2}{b^2+\xi} + \frac{z^2}{c^2+\xi} = 1,$$

розв'язок якого в замкнутому вигляді громіздкий.

Оскільки фігура небесних тіл апроксимується в основному двовісним еліпсоїдом:

$$\frac{x^2+y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1,$$

то еліпсоїдальна координата  $\xi$  визначається з виразу

$$\frac{\xi}{a^2} = \frac{1}{2}(\sin^2 \theta + \gamma^2 \cos^2 \theta) - \frac{1}{2}(1 + \gamma^2) + \frac{1}{2}[(\rho^2(\sin^2 \theta + \gamma^2 \cos^2 \theta) - (1 + \gamma^2))^2 - 4\gamma^2(1 - \rho^2)]^{1/2}.$$



Потенціал постійної щільності в такому випадку дорівнює

$$V = \frac{3}{4}GV_{\tau} \delta \int_{0, \xi}^{\infty} \left( 1 - \frac{x^2 + y^2}{a^2 + u} - \frac{z^2}{c^2 + u} \right) Q(u) du = \frac{3}{4}GV_{\tau} \delta [M_{00}(\xi) + \rho^2 M_{10}(\xi) \sin^2 \theta + M_{01}(\xi) \cos^2 \theta],$$

де

$$M_{kt} = a^{2k} c^{2t} \int_{0, \xi}^{\infty} \frac{du}{(a^2 + u)^{k+1} (c^2 + u)^{t+1/2}}. \quad (1)$$

Значення (8) знаходимо за алгоритмом, описаним у роботі [4]. Відомо, що функція радіального розподілу мас планети (сферичної та еліпсоїдальної) кусково-неперервна:

$$\delta = \begin{cases} \delta_1 & P \in \tau_0 \quad (0 = \rho_0 \leq \rho \leq \rho_1), \\ \delta_2 & P \in G_1 \quad (\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2), \\ \delta_3 & P \in G_2 \quad (\rho_2 \leq \rho \leq \rho_3 = 1). \end{cases}$$

Тоді потенціал дорівнюватиме

— для  $P \in \tau_0$ :

$$V = \frac{3}{2}GV_{\tau} \left\{ \frac{\delta_1}{2} [\rho_1^2 M_{00}(0) - \rho^2 M_{10}(0) \sin^2 \theta - \rho^2 M_{01}(0) \cos^2 \theta] + \sum_{i=2}^3 \delta_i (\rho_i^2 - \rho_{i-1}^2) \right\}, \quad (2)$$

— для  $P \in G_1$ :

$$V = \frac{3}{2}GV_{\tau} \left\{ \frac{(\delta_1 - \delta_2) \rho_1^3}{2} \left[ M_{00} \left( \frac{\xi}{\rho_1^2} \right) - \rho^2 M_{10} \left( \frac{\xi}{\rho_1^2} \right) \sin^2 \theta - \rho^2 M_{01} \left( \frac{\xi}{\rho_1^2} \right) \cos^2 \theta \right] + \frac{\delta_2}{2} [\rho_1^2 M_{00}(0) - \rho^2 M_{10}(0) \sin^2 \theta - \rho^2 M_{01}(0) \cos^2 \theta] + \delta_3 (\rho_3^2 - \rho_2^2) \right\}, \quad (3)$$

— для  $P \in G_2$ :

$$V = \frac{3}{2}GV_{\tau} \left\{ \sum_{i=1}^2 \frac{(\delta_i - \delta_{i+1}) \rho_i^3}{2} \left[ M_{00} \left( \frac{\xi}{\rho_i^2} \right) - \rho^2 M_{10} \left( \frac{\xi}{\rho_i^2} \right) \sin^2 \theta - \rho^2 M_{01} \left( \frac{\xi}{\rho_i^2} \right) \cos^2 \theta \right] + \frac{\delta_3}{2} [\rho_3^2 M_{00}(\xi) - \rho^2 M_{10}(\xi) \sin^2 \theta - \rho^2 M_{01}(\xi) \cos^2 \theta] \right\}, \quad (4)$$

а його похідна по радіусу

— для  $P \in \tau_0$ :

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} = -\frac{3}{2}GV_{\tau} \rho \delta_1 [M_{00}(0) \sin^2 \theta + M_{01}(0) \cos^2 \theta],$$

— для  $P \in G_1$ :

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} = \frac{3}{2}GV_{\tau} \left\{ \rho_1^3 (\delta_1 - \delta_2) \rho \times \left[ M_{10} \left( \frac{\xi}{\rho_1^2} \right) \sin^2 \theta + \rho^2 M_{01} \left( \frac{\xi}{\rho_1^2} \right) \cos^2 \theta \right] - \rho \delta_2 [M_{00}(0) \sin^2 \theta + M_{01}(0) \cos^2 \theta] \right\},$$

— для  $P \in G_2$ :

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} = -\frac{3}{2}GV_{\tau} \left\{ \sum_{i=1}^2 (\delta_i - \delta_{i+1}) \rho_i^3 \rho [M_{10}(\xi)] + \rho \delta_3 [M_{10}(\xi) \sin^2 \theta + M_{01}(\xi) \cos^2 \theta] \right\}.$$

Визначимо величину  $\partial \xi / \partial \rho$ :

$$\frac{1}{a^2} \frac{\partial \xi}{\partial \rho} = \frac{\rho}{a^2} \left\{ (\sin^2 \theta + \gamma^2 \cos \theta) + \{ (\sin^2 \theta + \gamma^2 \cos \theta) [\rho^2 (\sin^2 \theta + \gamma^2 \cos \theta) - (1 + \gamma^2)] + 2\gamma^2 \} / [ (\rho^2 (\sin^2 \theta + \gamma^2 \cos \theta) - (1 + \gamma^2))^2 - 4\gamma^2 (1 + \rho^2) ]^{1/2} \right\}.$$

Тоді друга похідна потенціалу має вигляд

— для  $P \in \tau_0$ :

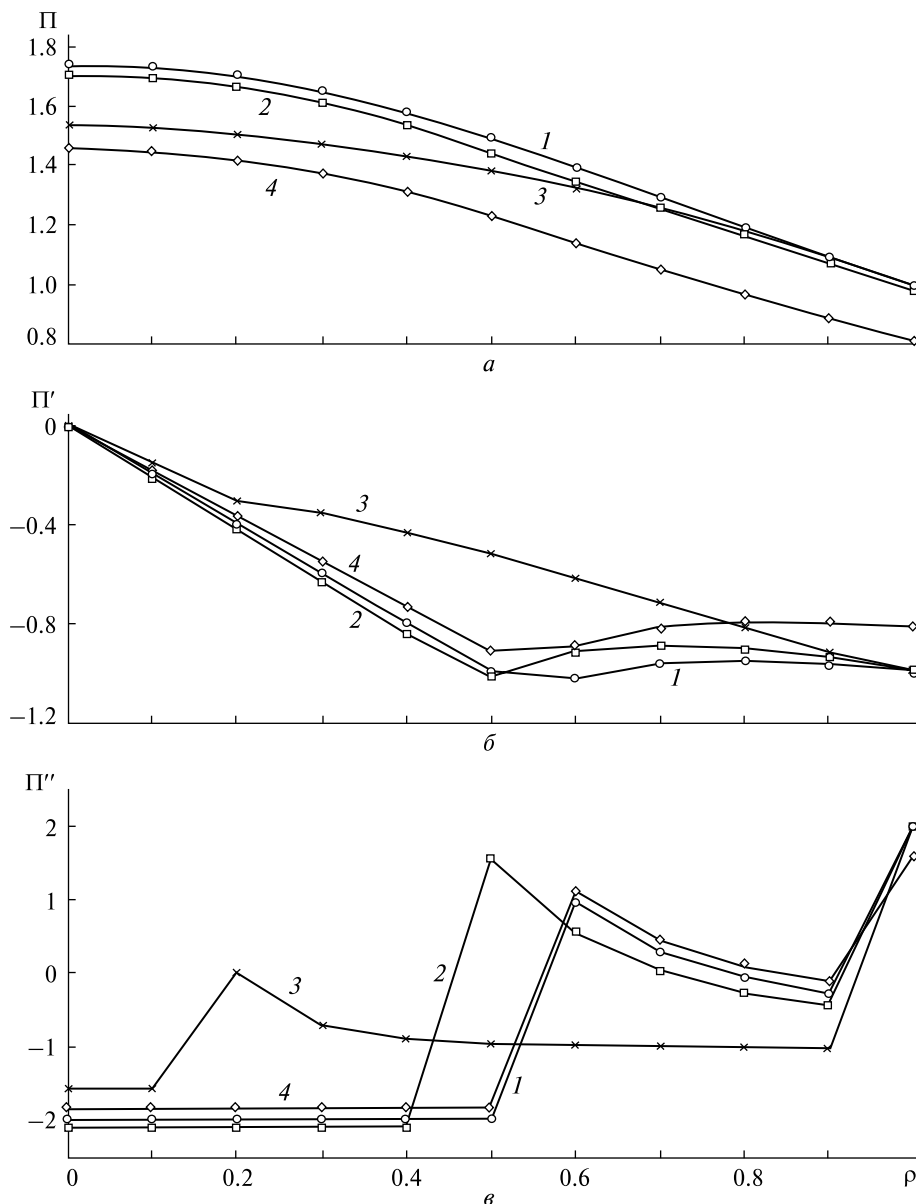
$$\frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} = -\frac{3}{2}GV_{\tau} \delta_1 [M_{00}(0) \sin^2 \theta + M_{01}(0) \cos^2 \theta],$$

— для  $P \in G_1$ :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} = \frac{3}{2}GV_{\tau} \left\{ -(\delta_1 - \delta_2) \rho_1^3 \left[ M_{10} \left( \frac{\xi}{\rho_1^2} \right) \sin^2 \theta + M_{01} \left( \frac{\xi}{\rho_1^2} \right) \cos^2 \theta \right] - \frac{1}{\rho_1^2} \frac{\partial \xi}{\partial \rho} \frac{\rho}{(1 + \xi/a^2)(\gamma^2 + \xi/a^2)} \right\},$$

— для  $P \in G_2$ :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} = \frac{3}{2}GV_{\tau} \left\{ -\rho_1^3 (\delta_1 - \delta_2) \rho \times \left[ M_{10} \left( \frac{\xi}{\rho_1^2} \right) \sin^2 \theta + M_{01} \left( \frac{\xi}{\rho_1^2} \right) \cos^2 \theta \right] - \rho \delta_2 [M_{00}(0) \sin^2 \theta + M_{01}(0) \cos^2 \theta] - \rho_1^3 (\delta_1 - \delta_2) \frac{\partial \xi}{\partial \rho} \frac{1}{(1 + \xi/a^2)(\gamma^2 + \xi/a^2)} \right\}.$$



**Рис. 1.** Потенціали притягання  $\Pi = V_k GM/R$  (а), перші похідні по радіусу  $\Pi' = (\partial V_k / \partial \rho) GM/R$  потенціалів притягання (б) та другі похідні по радіусу  $\Pi'' = (\partial^2 V_k / \partial \rho^2) GM/R$  потенціалів притягання Землі (крива 1), Марса (2), Місяця (3), Венери (4), що відповідають тришаровим розподілам мас надр сферичних тіл ( $\rho$  — відносний радіус планети)

Виписані формули дають можливість визначити потенціал та його похідні всередині кускової неперервної тришарової моделі щільності як для сферичної, так і для еліпсоїдальної планети.

**Вибір та обговорення вихідної інформації.** У табл. 1 та 2 приведено значення щільностей тришарових планет  $\delta_{cp}$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  (середнє, у ядрі, у

мантії, у корі), а також геодезичні та астрономічні характеристики планет за даними [1, 7, 8].

**Отримання та інтерпретація результатів.** На основі наведених вище формул та відсортованої інформації виконано обчислення, проілюстровані таблицями та графіками. На рис. 1, а зображено графіки потенціалів притягання  $V_k$

всередині Землі, Марса, Венери, Місяця, що відповідають тришаровим розподілам мас надр сферичних тіл. При цьому поведінка  $U$  не змінюється, тобто зростання  $W$  не впливає суттєво на спадання  $U$ . Також зберігаються основні властивості потенціалу, зокрема регулярність на нескінченності. Це ж стосується перших (рис. 1, б) та других похідних (рис. 1, в) величини  $V$ .

Представлення фігури планети у формі еліпсоїда визначає значення  $V_e$ , яке залежить від широти та довготи, що відображається у формулах (2)–(4). За цим виразом обчислено величину потенціалу еліпсоїдальних планет. Значення потенціалів сили притягання рівновеликих за об'ємом сферичної та еліпсоїдальної планети є різними. Також на значення  $U$  впливає обертан-

ня небесного тіла навколо власної осі (потенціал відцентрової сили  $W$ ). Оцінимо вклад кожної з цих величин у  $U$ , для чого обчислимо різниці потенціалів  $\Delta V = V_k - V_e$  кульових та еліпсоїдальних планет і наведемо їх для Землі.

В табл. 3 наведемо суму цих різниць та потенціалу відцентрової сили  $W$  для Землі. Для інших небесних тіл (Марса, Місяця, Венери) вони незначні, а тому не наводяться в роботі.

В табл. 3 подано різниці потенціалів притягання сферичної  $V_k$  та еліпсоїдальної  $V_e$  Землі. Видно, що еліптичність значною мірою впливає на потенціал всередині та на поверхні планети. Відповідно по цих даних приведемо одновимірні графіки (для широти  $\varphi = 0^\circ$ ) на рис. 2. Залежність цих значень від широти для досліджуваних не-

Таблиця 1. Значення щільностей тришарових планет (середнє, у ядрі, у мантиї, у корі)

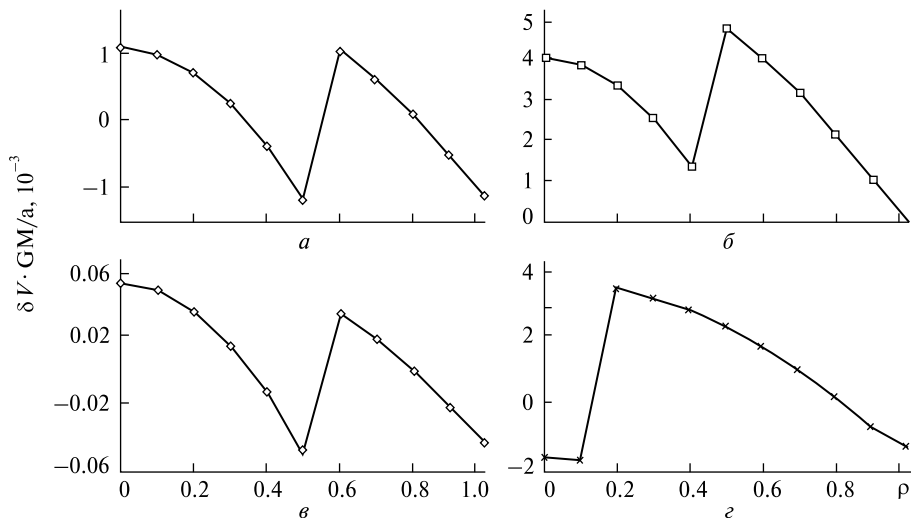
Планета	$R$ , км	$r_{я}$ , км	$r_{м}$ , км	$\delta_{ср}$ , г/см <sup>3</sup>	$\delta_1$ , г/см <sup>3</sup>	$\delta_2$ , г/см <sup>3</sup>	$\delta_3$ , г/см <sup>3</sup>
Земля	6371	3480	6346.6	5.514	10.998	4.4754	2.52
Венера	6050	3250	5990.8	5.25	9.6	3.29	2.8
Марс	3390	1662	3340	3.94	8.28	3.29	3.0
Місяць	1738	340	1678	3.3464	5.22	3.38	2.92

Таблиця 2. Геодезичні та астрономічні характеристики планет

Планета	Гравітаційна стала, $GM$ , $10^{-14}$ м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	Екваторіальний радіус, $a_e$ , км	Стиснення $\alpha = \frac{a-c}{a}$	Швидкість обертання, $\omega$ , $10^{-5}$ рад/с
Земля	3.9860044	6378	1:298.256	7.29211515
Марс	0.4282837	3399.1	1:191.19	7.08270
Венера	0.32485859	6051.54	0.0001652	0.0299
Місяць	0.0490280	1738	0.00039	0.26611

Таблиця 3. Сума обертової складової  $W$  і різниці потенціалів  $\Delta V$  кульової та еліпсоїдальної Землі для широт  $0^\circ \leq \varphi \leq 150^\circ$  на різних глибинах ( $0 \leq \rho \leq 1$ )

$\rho$	$\varphi$					
	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$
0.000	66515.25	66515.25	66515.25	66515.25	66515.25	66515.25
0.200	43994.09	45058.60	47187.61	48252.11	47187.61	45058.60
0.400	-23569.37	-19311.35	-10795.31	-6537.29	-10795.31	-19311.35
0.600	65041.50	74684.80	93968.05	103607.99	93968.05	74684.80
0.800	6512.18	23745.95	58186.33	75392.93	58186.33	23745.95
1.000	-70608.34	-43686.69	10118.73	37002.56	10118.73	-43686.69



**Рис. 2.** Різниця потенціалів кульової та еліпсоїдальної фігури Землі (а), Марса (б), Місяця (в) та Венери (г) для широти  $\varphi = 60^\circ$  на відносних радіусах  $0 \leq \rho \leq 1$  (різних глибинах)

бесних тіл, за винятком Землі, не проявляється, а тому не наводиться.

Аналіз приведених ілюстрацій дає можливість зробити висновок про наявність екстремальних різниць значень потенціалу у внутрішніх точках Землі, при цьому для модельного розподілу мінімуми та максимуми породжуються різкими змінами значень щільності (лежать в області стрибків). Для планет земної групи одне з максимальних відхилень лежить у центрі небесного тіла (виняток — Місяць). Для планети Земля та частково Марса обертова частина є визначальним фактором для зовнішнього потенціалу, а для Місяця і Венери її вклад незначний навіть для великих значень віддалей.

#### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

- Еліптичність планет земної групи є головним фактором відхилення їх потенціалу від сферичної симетрії.
- Екстремальні різниця потенціалів сферичних і еліпсоїдальних небесних тіл можливі при різкій зміні щільності розподілу мас всередині планет (на глибинах залягання стрибків).
- Вплив сили обертання на потенціал Землі та Марса проявляється для точок простору, розміщених зовні планет.
- На потенціал сили тяжіння для супутника Місяць і планети Венера практично не впливає їхнє обертання навколо власної осі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Каменский К. К. *Исследование глобальных особенностей урвеной и гипсометрической поверхностей Венеры*. Изучение Земли как планеты методами астрономии, геодезии и геофизики: Тр. II Орловской конф. Киев: Наук. думка, 1982. С. 80—83.
2. Мориц Г. *Фигура Земли: Теоретическая геодезия и внутреннее строение Земли*. Киев. 1994. 240 с.
3. Фис М. М., Голубінка Ю. І., Юрків М. І. Порівняльний аналіз формул для потенціалу та його радіальних похідних тришарових кульових та еліпсоїдальних планет. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2014. Вип. 1 (27). С. 46—52.
4. Фис М. М., Заяць О. С., Фоца Р. С., Волос В. О. Про один метод визначення потенціалу неоднорідної еліпсоїдальної планети. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2005. С. 236—239.
5. Фис М. М., Нікулішин В. І. Аналіз впливу еліпсоїдальності фігури Землі на її внутрішню структуру на прикладі моделі PREM. *Геодинаміка*. 2011. № 1 (10). С. 17—21.

6. Фис М. М., Согор А. Р., Нікулішин В. І. Потенціал та його радіальні похідні тришарових кульових планет. Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS- і GIS-технології: 36. матер. Міжнар. наук.-техн. симпозиуму. Алушта. 2013. С. 229—233.
7. Церклевич А. Л., Заяць О. С., Фис М. М. Гравітаційні моделі тривимірного розподілу густини планет земної групи. *Геодинаміка*. 2012. № 1(12). С. 25—34.
8. Dolifus A. New optical measurements of planetary diameters. P. 4. Planet Mars. *Icarus*. 1972. **17**, № 3. P. 525—539.
9. Fys M. M., Brydun A. M., Yurkiv M. I. On representation of the internal spherical functions and their derivatives in the planetary coordinate system. *Mathematical modeling and computing*. 2019. **6**, № 2. P. 251—257.
10. Fys M. M., Brydun A. M., Yurkiv M. I. On approach to determine the internal potential and gravitational energy of ellipsoid. *Mathematical modeling and computing*. 2021. **8**, № 3. P. 359—367.
11. Marchenko A. N., Zayats A. S. Estimation of the potential gravitational energy of the Earth based on reference density models. *Geodynamics*. 2008. № 1(7). P. 5—24.

## REFERENCES

1. Kamensky K. K. (1982). *Study of the global features of the level and hypsometric surfaces of Venus*. Study of the Earth as a planet by methods of astronomy, geodesy and geophysics: Tr. II Orlov Conf. Kyiv: Naukova Dumka, 80—83.
2. Moritz H. (1994). *The Figure of the Earth: Theoretical Geodesy and the Internal Structure of the Earth*. Kyiv, 240 p.
3. Fys M. M., Holubinka Y. I., Yurkiv M. I. (2014). Comparative analysis of formulas for the potential and its radial derivatives of three-layer spherical and ellipsoidal planets. *Modern achievements of geodetic science and production*, **I** (27), 46—52.
4. Fys M. M., Zayats O. S., Foca R. S., Volos V. O. (2005). On a method for determining the potential of an inhomogeneous ellipsoidal planet. *Modern achievements of geodetic science and production*, 236—239.
5. Fys M. M., Nikulishyn V. I. (2011). Analysis of the influence of the ellipsoidalness of the Earth's figure on its internal structure on the example of the PREM model. *Geodynamics*, № 1 (10), 17—21.
6. Fys M. M., Sohor A. R., Nikulishyn V. I. (2013). *Potential and its radial derivatives of three-layered spherical planets*. Geo-information Monitoring of the Environment: GNSS and GIS — Technologies: Proc. Int. Sci. and Tech. Symp. Alushta, 229—233.
7. Tserklevych A. L., Zayats O. S., Fys M. M. (2012). Gravitational models of three-dimensional distribution of the density of the planets of the terrestrial group. *Geodynamics*, № 1 (12), 25—34.
8. Dolifus A. (1972). New optical measurements of planetary diameters. P. 4. Planet Mars. *Icarus*, **17**, № 3, 525—539.
9. Fys M. M., Brydun A. M., Yurkiv M. I. (2019). On representation of the internal spherical functions and their derivatives in the planetary coordinate system. *Mathematical modeling and computing*, **6**, № 2, 251—257.
10. Fys M. M., Brydun A. M., Yurkiv M. I. (2021) On approach to determine the internal potential and gravitational energy of ellipsoid. *Mathematical modeling and computing*, **8**, № 3, 359—367.
11. Marchenko A. N., Zayats A. S. (2008) Estimation of the potential gravitational energy of the Earth based on reference density models. *Geodynamics*, № 1 (7), 5—24.

Стаття надійшла до редакції 10.06.2022  
 Після доопрацювання 10.06.2022  
 Прийнято до друку 20.07.2022

Received 10.06.2022  
 Revised 10.06.2022  
 Accepted 20.07.2022

Fys M. M., Dr. Sci. in Tech., Docent, Prof. at CGM Department  
 Zazuliak P. M., Dr. Sci. in Phys&Math., Prof., Prof. at CGM Department  
 Sohor A. R., Ph. D. in Tech., Docent, Associate Prof. at CGM Department  
 Lviv Polytechnic National University  
 12, Bandery Str., Lviv, 79013 Ukraine

## GRAVITY POTENTIAL AND ITS COMPONENT OF CENTRIFUGAL FORCE INSIDE THE ELLIPSOIDAL PLANET

A method for determining the gravitational potential of a celestial body whose surface is a sphere or ellipsoid with an abrupt mass distribution function is proposed. For these cases, the formulas for determining the internal potential and gravity are obtained. The calculations performed according to these formulas make it possible to analyze the contribution of the ellipticity of the planet to the value of its internal potential and compare it with the magnitude of the centrifugal force for the planets of the Earth group (Earth, Mars, Venus) and the Moon.

**Keywords:** ellipsoid, potential, centrifugal force, gravity, the concept of gravitational disks.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.04.078>  
УДК 001.891+346.23+347.85

**Я. С. ЯЦКІВ**, директор, д-р фіз.-мат. наук, акад. НАН України  
Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

## З ІСТОРІЇ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В УКРАЇНІ. 1. ВИКОНАННЯ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СТАНОМ НА 1991 р.

*У роботі подано матеріал 1991 року з архіву автора, в якому висвітлено проблеми виконання космічних досліджень та створення органу управління космічною галуззю у незалежній Україні. Подається коротка характеристика тодішнього рівня розвитку космічних досліджень в Україні. Висвітлюється активна участь України в роботі міжнародних організацій у космічній галузі і виконанні космічних програм СРСР. Підкреслюються значні досягнення та напрацювання наукових та науково-конструкторських колективів у космічній діяльності, серед яких ракетно-конструкторський центр КБ «Південне», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона АН України та багато інших підприємств і наукових установ України. У нових умовах зі здобуттям незалежності з метою збереження аерокосмічної галузі України, її конструкторського та наукового потенціалу, створення перспектив розвитку науково-технічного прогресу постало необхідним сформулювати концепцію та основні цілі національної політики України як суверенної держави у галузі дослідження та використання космічного простору; створити відповідне агентство України для координації космічних програм і розробити закон, що регламентував би його діяльність; прийняти Верховною Радою державну програму космічних досліджень, яка передбачала б розвиток фундаментальних і прикладних космічних досліджень.*

**Ключові слова:** космічні дослідження, історія космічних досліджень.

### 1. ВСТУП

У другій половині ХХ століття розвиток фундаментальних і прикладних досліджень, пов'язаних з освоєнням космічного простору, став невід'ємною частиною національної політики не тільки таких великих держав, як СРСР, США, Німеччина, Англія, Канада, Японія, але й країн, що розвиваються. В роботі Комітету ООН з використання космічного простору у мирних цілях станом на 1991 рік беруть участь 53 країни, зокрема Австралія, Аргентина, Бельгія, Бразилія, Венесуела, Індія, Китай та ін. У 1990 році до цих країн приєдналася Україна.

Активне прагнення багатьох країн світу до участі у програмах космічних досліджень від-

повідає їхнім стратегічним національним інтересам та базується на трьох основних факторах.

**Перший.** Створення космічної техніки та підготовка кадрів в інтересах державної оборони та безпеки. Як приклад відзначимо, що події у Перській затоці практично продемонстрували важливість космічних засобів розвідки та зв'язку для досягнення вирішальної військової переваги.

**Другий.** Ефективність застосування космічних засобів в інтересах розвитку національної економіки. У цій галузі, особливо актуальній останнім часом, слід виділити такі напрямки: а) дослідження (дистанційне зондування) Землі з космосу, що включає картування забрудненості рослинного покриву та водойм нітратами та

Цитування: Яцків Я. С. З історії космічних досліджень в Україні. 1. Виконання космічних досліджень станом на 1991 р. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 4 (137). С. 78—88. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.078>

важкими металами, контроль стану сільгоспу- гідь, мереж нафто- та газопроводів, радіолока- ційний контроль та виявлення зон забруднен- ня на поверхні морів та океанів, всепогодний контроль наслідків зон стихійних лих, штормів, циклонів, повеней, прогнозування погоди тощо; д) створення космічних систем передачі інфор- мації, зв'язку, навігації, телебачення, виявлення та пошук різних об'єктів.

Розвиток цього напрямку докорінно змінює форми інтелектуальної діяльності, а також ме- тоди та техніку управління національною еко- номікою. Наприклад, супутники ретрансляції дозволяють розробити глобальну інформаційну мережу, яка дасть можливість отримувати, опе- ративно обробити та передати замовнику інфор- мацію з будь-яких банків даних.

**Третій.** Участь у міжнародних кооперативних програмах космічних досліджень є для багатьох країн найдоступнішим шляхом до передових технологій, які дозволяють підтримувати за- гальний високий рівень освіти та науки та поряд з розумною організацією системи господарю- вання призводять до безперервного зростан- ня загального добробуту населення. В останні роки навіть з'явився новий термін «побічні ви- годи» космічних технологій. Йдеться про те, що такі складні галузі діяльності, як космічні дослідження, обов'язково носять міждисциплі- нарний характер і охоплюють широкий діапа- зон технічних напрямків. Часто передові зразки техніки та технології, розроблені суто для потреб космічних досліджень, знаходять застосування в «земних» галузях народного господарства. Як приклади «побічних вигод» можна навести за- стосування у промисловості розроблених для потреб космічної техніки різних матеріалів з унікальними механічними, хімічними, терміч- ними та іншими властивостями. Тільки засто- сування цих матеріалів принесло СРСР у 1990 р. за оцінкою зарубіжних експертів дохід розміром близько 600 млн руб. Інша область застосуван- ня космічних технологій — медичний контроль та діагностика стану організму людини. Напри- клад, прилад «Аргумент», розроблений в СРСР, сканує серце та основні судини за допомогою ультразвуку. В США для використання в умо-

вах космічного польоту був розроблений прилад «Ликсискоуп». Цей прилад дозволяв отримувати рентгенівські зображення за допомогою джерел дуже малої інтенсивності. Зараз цей прилад ви- готовляється на комерційній основі та засто- сується для швидкого виявлення переломів і трі- щин кісток у відділеннях швидкої допомоги, а також для контролю різних металоконструкцій.

Можна навести величезну кількість інших прикладів «побічного» використання космічних розробок. «Побічні» вигоди від використання космічної техніки були навіть предметом спе- ціального обговорення Комітету ООН з вико- ристання космічного простору у мирних цілях у травні — червні 1991 р.

Технократична діяльність отримала в ХХ сто- літті такий розмах, що впливає не тільки на умо- ви існування окремих людей і навіть окремих регіонів, а здійснює глобальний вплив на Землю як довкілля всього людства. На думку більшості експертів глобальні зміни клімату, зв'язані з тех- нократичною діяльністю людства («парниковий ефект»), танення льодів Арктики та Антарктиди, зміни кліматичних зон, утворення озонних дір в атмосфері неминучі уже до середини наступно- го сторіччя. В зв'язку з цим 1990-ті роки стануть десятиріччям активної міжнародної співпраці у здійсненні космічної «Місії до планети Земля» з метою вивчення динаміки та причин глобальних кліматичних змін.

Наведена інформація свідчить про те, що кос- мічна діяльність стала невід'ємною частиною жит- тя розвинених країн та країн, що розвиваються.

## 2. КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА РІВНЯ РОЗВИТКУ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В УКРАЇНІ

Наукові і конструкторські колективи України зробили важливий внесок у створення косміч- ної бази СРСР та виконання союзних космічних програм (див. огляди у роботах [32, 38]). У той час космічні дослідження в Україні велися за та- кими напрямками:

- створення і механіка космічних літальних апаратів;
- космічне приладобудування;
- дослідження Землі з космосу;
- космічна біологія та медицина;

- дослідження астрономічних об'єктів космічними методами та засобами;
- навігація та керування рухом космічних апаратів;
- космічне матеріалознавство.

На території України у м. Дніпропетровськ (зараз м. Дніпро) розташований один з найбільших в СРСР ракетно-конструкторський центр — Ракетно-космічний науково-випробувальний центр «Южкосмос» (КБ «Південне»). Це підприємство відіграло провідну роль в розробці ракети-носія «Космос» для всесвітньо відомої серії ШСЗ «Космос», а також у розробці супутників цієї серії та їхньої модифікації. Всього за період з 1963 р. за програмою «Космос» та «Інтеркосмос» було запущено близько 400 супутників. У 1980 р. було запущено розроблений в КБ «Південне» перший радянський океанографічний супутник, у 1981 р. — перший океанографічний супутник країн-членів РЕВ «Інтеркосмос-21», у 1983 р. — експериментальний океанографічний супутник «Космос-1500». Практично весь комплекс оптичної, радіофізичної та радіолокаційної апаратури цього супутника розроблено у Дніпропетровську та НДІ АН України у м. Харкові та м. Севастополі. З 1988 р. в експлуатації перебувала космічна океанографічна система I-го етапу на базі розробленого у м. Дніпропетровськ нового космічного апарата «Океан» [3, 6, 8, 22, 28].

Співробітникам інститутів АН України радіоелектроніки, геологічних наук, прикладних проблем математики, механіки і морського гідрофізичного інституту належить пріоритет у створенні теоретичних основ, методик та унікальної апаратури для дистанційного зондування земної поверхні, морів та океанів з космосу. Вказана апаратура встановлена на ШСЗ «Космос-1500», «Океан» та інших носіях, та дозволяє здійснити всі перерахунки у запровадження завдання з контролю та картування стану земної поверхні, стану технологічних мереж, параметрів зон стихійних лих тощо (див. подальші розробки цього напрямку космічних досліджень зокрема в роботах [12, 13, 25] та оглядовій статті [7]).

За допомогою зазначеної апаратури в той час велось складання діагностичних карт прогнозів льодової обстановки в Арктиці, було здійснено

проведення суден в екстремальних умовах у протоці Лонга в 1983 р. і у морі Росса в 1985 р. Було вжито своєчасних заходів щодо запобігання повені під час бурхливого танення снігів 1988 р. За допомогою літакового варіанта, розробленого в ІРЕ АН України (м. Харків) локатора бокового огляду виконано зйомки прибережних акваторій чорноморського шельфу Болгарії, що дозволило оперативно визначити зони забруднення вод нафтопродуктами. Платформи збору вказаної інформації, включаючи канал зв'язку через ШСЗ, розроблено та впроваджено у вигляді малих серій спеціалістами Севастополя та Львова. Великий інтерес до розробок українських вчених у цій галузі виявили канадські спеціалісти в часи радянсько-канадської наради щодо співробітництва в галузі мирного дослідження космосу (Київ, вересень 1989 р.).

Орбітальні комплекси нового покоління 1990-х років базуються на абсолютно нових принципах складання та розгортання в космосі великогабаритних конструкцій. Для їхнього створення безсумнівно знадобиться найширше застосування в космосі зварювання та інших методів нероз'ємного з'єднання матеріалів. Досвід, що не має аналогів у світі в даній галузі досліджень, накопичений в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона АН України. В цьому інституті створено першу у світі автоматичну зварювальну установку «Вулкан», що пройшла випробування на космічному кораблі «Союз-6» в жовтні 1969 р. У цьому ж інституті створено унікальну апаратуру для електронно-променевого зварювання, різання та паяння металоконструкцій в умовах відкритого космосу. З цією апаратурою працювали та високо оцінили її льотчики-космонавти СРСР В. Н. Кубасов, В. В. Рюмін, В. А. Джанібеков, С. Є. Савицька та інші. В цьому інституті розроблено також технологію складання в умовах відкритого космосу потужних силових фермових конструкцій [2, 11, 14, 16—21, 28, 31, 34, 36].

Вагомий вклад українських вчених у розвиток космічної біології. Цією проблемою в Україні займаються з 1975 року. У рамках національних та міжнародних космічних біологічних програм здійснено 38 експериментів, зокрема за радян-



сько-американською програмою «Союз-Аполлон», радянсько-французькою «Цитос», радянсько-чехословацькою «Хлорела», програмою Європейського космічного агентства «Протодин» та ін. В АН України отримано пріоритетні дані про вплив мікрогравітації на розвиток і метаболізм клітин. Пізніше ці ефекти були підтверджені вченими ФРН, Франції, США. На основі встановлених закономірностей висунуто принципово нові теоретичні уявлення про механізми впливу мікрогравітації на живі організми та їхньої адаптації до цього фактора космічного польоту. Результати фундаментальних досліджень використовуються в розробці методів космічного рослинництва та космічних клітинних біотехнологій [30, 32]; у 1990-х роках ці результати стали основою постановки космічних експериментів на американському космічному кораблі багаторазового використання «Колумбія» місії STS-87, які виконав у 1997 р. перший космонавт України Л. К. Каденюк [5, 31]). Безпосереднє значення для потреб практичної медицини має праця українських вчених з електрофорезу та електрофокусуванню білків в умовах космічного польоту з метою отримання високоочищених лікарських препаратів та високоефективних біологічно активних речовин. Запропоновано способи оцінки радіаційного ризику в умовах космічного польоту та при роботі з потужними джерелами іонізаційних випромінювань

Важливі результати з розробки фізичних основ і технологій створення матеріалів для космічної техніки, що забезпечує стабільність та надійність її тривалого функціонування, отримані українськими вченими у 1987—1990 роках у рамках загальносоюзної програми, затверджені постановою ДКНТ СРСР 27.05.1987 р. № 164 на 1987—2005 роки. Відомством, відповідальним за виконання цієї програми, була назначена АН України, а головною організацією — Інститут металофізики АН України. В Інституті проблем міцності АН України, Інституті проблем матеріалознавства АН України та Фізико-технічному інституті низьких температур АН України створено унікальну експериментальну базу для досліджень впливу екстремальних факторів космічного польоту на механічні, оптичні, тепло-

фізичні властивості матеріалів. Зокрема, на цій базі проводились роботи з вибору матеріалів для вузлів «Лунохода», проведено дослідження багатопарових елементів конструкцій панельного теплового захисту корабля багаторазового використання «Буран». Останнім часом проводилися роботи з вибору перспективних матеріалів для «Сонячного паруса» нового багатоцільового космічного апарата — Малої космічної лабораторії. На жаль, ці роботи були згорнуті через відсутність фінансування (у 1990-х роках результати досліджень з космічного матеріалознавства і технологій увійшли до програми, яку українські вчені і конструктори пропонували для Міжнародної космічної станції [35]).

Розроблені в Фізико-механічному інституті АН України прилади для діагностики космічної плазми успішно працювали на ШСЗ «Прогноз-8» та «Прогноз-10» і були включені до складу штатної апаратури міжпланетних станцій «Вега-1» і «Вега-2» для вивчення характеристик плазми в зоні взаємодій сонячного вітру з атмосферою комети Галлея. В цьому ж інституті створено мас-спектрометри для апаратів, для міжпланетних станцій «Венера-9» і «Венера-10», а також унікальні криогенні системи для забезпечення бортової ІЧ- та телевізійної апаратури. Головна астрономічна обсерваторія АН України була головною установою в СРСР щодо наземного забезпечення космічної місії до комети Галлея. Отримані нашими вченими дані забезпечили необхідну точність розрахунків та корекцію траєкторій апаратів «Вега-1» і «Вега-2» [15].

На початку 1990-х років у інститутах АН України розпочалася підготовка приладів для комплексних орбітальних навколосемних спостережень активного Сонця (проект КОРОНАС). Протягом багатьох років ПО «Завод Арсенал» виготовляв і постачав апаратуру для систем орієнтації та навігації космічних апаратів і комплексів, а також тренажери для підготовки космонавтів [10, 29, 33].

Спеціалісти з напрямків, пов'язаних з космічними дослідженнями, готуються в Київському політехнічному інституті, Київському, Дніпропетровському, Харківському держуніверситетах.

### 3. УЧАСТЬ УКРАЇНИ В РОБОТІ МІЖНАРОДНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ І ПРОГРАМ

Участь України у міжнародних космічних проєктах є важливим елементом інтеграції її науки та індустрії у міжнародну систему господарювання.

До 1990 р. Міжнародні контакти вчених України у сфері освоєння космічного простору підтримувались переважно через Раду «Інтеркосмос» АН СРСР і шляхом участі у міжнародних програмах.

На 45-й сесії Генеральної асамблеї ООН восени 1990 р. Україну було прийнято до складу Комітету ООН з використання космічного простору у мирних цілях. Участь представників України в роботі цього Комітету дозволило ще раз переконатися в тому, що без використання в соціально-економічній сфері тих гігантських можливостей, які дають засвоєння космічного простору, в сучасному світі неможливо подолати економічну, технологічну та соціальну відсталість, вивести країну на рівень сучасного науково-технічного прогресу, створити населенню гідні умови життя. Звертає на себе увагу прагнення східноєвропейських країн розширити свою участь в космічних програмах і активізувати використання отриманих результатів для вирішення народногосподарських завдань. Так, на 34-й сесії Комітету (травень 1991 р., Австралія) представники Чехословаччини та Болгарії оголосили про створення національних космічних агентств.

Порівняння наявного в Україні науково-технічного потенціалу з можливостями інших країн показує, що в той час було все необхідне для розширення взаємовигідної співпраці з іншими країнами, зокрема з нашими східноєвропейськими сусідами, зважаючи, що їхні космічні програми все ще значною мірою орієнтовані на систему «Інтеркосмос». Космічні дослідження це одна з галузей, де Україна володіє технологіями та системами, що відповідають міжнародним рівням і здатні з низки напрямків конкурувати навіть з розвиненими країнами капіталістичного світу.

Одним з найбільш перспективних напрямків є дистанційне зондування Землі. До робіт з цього напрямку виявляють великий інтерес спе-

ціалісти та провідні фірми США та інших країн. З 1987 р. ІРЕ та МГІ АН України очолюють океанографічні дослідження в робочій групі СРСР — США «Наука про Землю». З 1991 р. розпочато спільні роботи вчених ІРЕ АН України з спеціалістами Науково-інженерного космічного центру Вісконсинського університету (США) за програмою «Вимірювання параметрів вітру над морською поверхнею та зон дощів з космосу за допомогою радіолокатора бічного огляду та пасивного багаточастотного радіометра». Програма розрахована на три роки та передбачає розробку методів прогнозування ураганів та передбачення їхніх наслідків. Ці роботи включено до переліку найважливіших програм США. Урядом США вже виділено для їхнього проведення 349 000 доларів. США готові також приступити до спільної розробки і використання багатоцільової системи екологічного контролю на основі розроблених ІРЕ АН України радіолокаторів бічного огляду, вимірників розсіювання та радіолокаторів з синтезованою апаратурою [37, 38] (у нас в країні ця система називається «Янтар Еко»).

Для оперативного приймання та обробки екологічної та іншої інформації, використання супутникових ліній зв'язку необхідне створення на території України спеціалізованого стаціонарного пункту далекого космічного зв'язку. Такий пункт можна розгорнути на базі наявних можливостей в Євпаторії та Сімферополі, або ж в рамках конверсії на базі РЛС «Мукачево». У перспективі цей центр міг би використовуватися як регіональний за Міжнародною програмою «Глобальні зміни» в рамках космічної місії до планети Земля.

Вкрай важливим вважають фахівці США також накопичений в Інституті електрозварювання ім Є. О. Патона АН України досвід створення апаратів і технологій зварювання в умовах космосу. Наявні у нас розробки можуть істотно прискорити і здешевити роботи, що ведуться в США, зі створення космічної станції «Фрідом». Великий інтерес до цих робіт виявляють НАСА, фірми «Макдональд Дуглас», «Роквелл Інтернешнл». Нині укладено договір оренди зварювального апарата УРІ з метою його реклами. Макет пройшов випробування на літальній лабора-

торії США у м. Х'юстоні в серпні 1991 р. В кінці 1991 р. очікується укладання великого договору на розробку даної апаратури в АН України.

Експериментальні та теоретичні розробки, які має АН України, відкривають перспективу для широкої міжнародної співпраці в космічних біологічних програмах НАСА та ЄКА, що об'єднують науково-технічний потенціал США, ФРН, Франції, Швейцарії, Данії, Великобританії та інших країн [1, 9].

#### 4. КООРДИНАЦІЯ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В УКРАЇНІ

У перший рік Незалежності України координації космічних досліджень на урядовому рівні не було. Не було також закону, який регламентував би статус, структуру і права установ, відповідальних за функціонування цієї найважливішої галузі національного господарства. Це не тільки вкрай ускладнювало роботу наукових та конструкторських колективів з розробки космічної техніки, а й не дозволяло ефективно використовувати у народному господарстві вже наявні розробки. При Академії наук України функціонує Комісія космічних досліджень, яка здійснює координацію фундаментальних та прикладних досліджень в цій області. Однак за своїм статусом це громадський орган, що об'єднує групу висококваліфікованих експертів, проте не має ані фінансових, ані матеріальних повноважень, і тому не має можливостей реально впливати на розвиток цілої галузі.

Наведемо приклади організації космічних досліджень в інших країнах. Державні програми та діяльність США в галузі дослідження космічного простору регулюються національним законом про аеронавтику та дослідження космічного простору. Згідно з цим законом головною державною установою, відповідальною за підготовку та керівництво космічними програмами, що здійснюються США, є Національне управління з аеронавтики та дослідження космічного простору (НАСА). Дослідна діяльність та конструкторські розробки зосереджено у восьми периферійних центрах НАСА. Розробкою рекомендацій для НАСА займаються Рада з космічних досліджень та Рада із застосування космічної техніки при Національній академії наук США, Консуль-

тативна рада НАСА і ряд інших більш спеціалізованих органів.

Повчальним для України є приклад Австрії. Там координація космічних досліджень здійснюється космічним агентством, що діє як секретаріат Консультативного комітету з космічних досліджень та техніки австрійського федерального правління.

Основними завданнями цього агентства є:

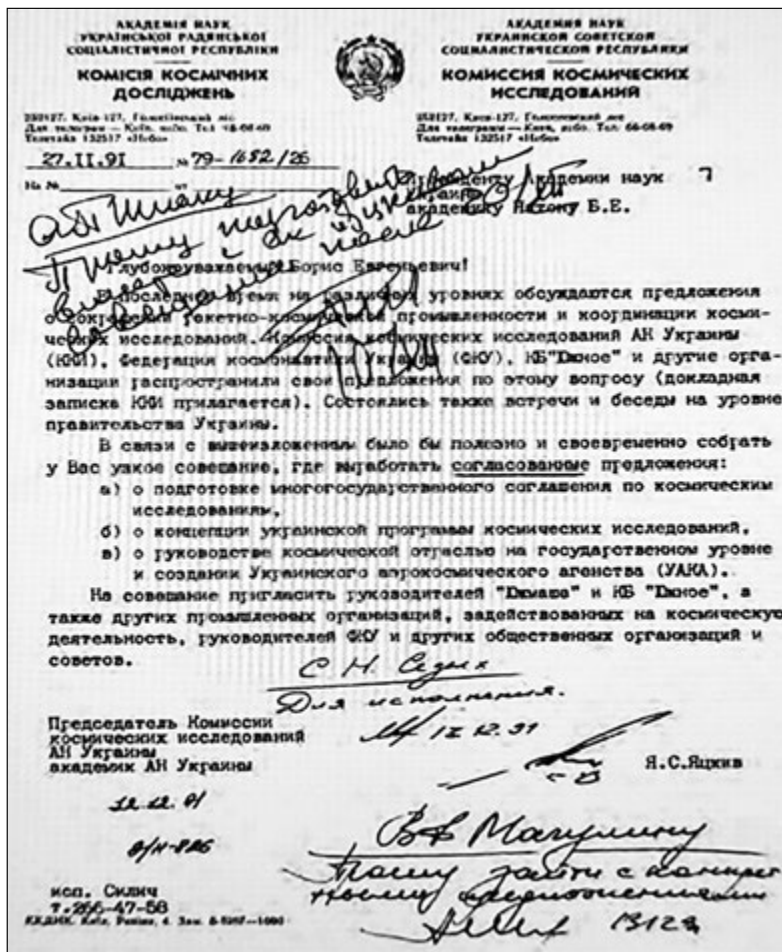
- координація проектів у галузі космічних досліджень і технологій в Австрії та за кордоном, а також в рамках міжнародних угод та організацій;
- консультування австрійського уряду з питань, що стосуються космічних досліджень та техніки;
- обробка та розповсюдження даних про космічні проекти та публікації відповідних документів;
- сприяння підготовці фахівців у галузі космічних досліджень та технологій в університетах та науково-дослідних організаціях Австрії та за кордоном.

З 1987 року Австрія є повноправним членом Європейського космічного агентства (ЄКА). Щорічний внесок Австрійської республіки до ЄКА становить близько 200 млн австрійських шилінгів, що становить близько 2 % бюджету ЄКА. Проте основна частина внеску (понад 90 %) повертається до Австрії у вигляді контрактів ЄКА з австрійськими промисловими підприємствами та науковими установами. На думку федерального міністра Австрії др. Е. Бусека, для Австрії, яка має порівняно обмежені фінансові та природні ресурси, участь у космічних дослідженнях є єдиною можливістю розвитку нових технологій та виходу на світовий ринок.

#### 5. ВИСНОВКИ

1. Україна має достатньо розвинутий науково-технічний потенціал в галузі мирного дослідження та використання космічного простору станом на 1991 рік.

2. Започаткування власної космічної програми та участь у міжнародних проектах, зокрема у операції з іншими державами, принесе не лише наукові результати, але й обіцяє значні матеріальні вигоди. Участь у міжнародних космічних про-



грамах надасть Україні можливість інтегруватися природним чином у міжнародну систему господарювання на основі наявних високих технологій. При цьому, однак, потрібно чітко сформулювати фінансові умови угод. Необхідно знати, які кошти передає Україна до загального бюджету та яка їхня частка повертається до нас у вигляді контрактів, обладнання, технологій та ін.

3. Припинення наявних зв'язків та відмова від проведення космічних досліджень призведе до втрати створених з величезними труднощами протягом десятиліть наукових та конструкторських кадрів, матеріально-технічної бази і, як підсумок, — до незворотного відставання не лише від розвинених країн, але й від країн, що розвиваються.

4. Розвиток космічних досліджень, а також впровадження здобутих результатів у народне господарство України значною мірою гальму-

ється через відсутність управління цією галуззю на державному рівні.

## 6. ПРОПОЗИЦІЇ

1. З метою збереження аерокосмічної галузі України, конструкторського та наукового потенціалу, створення перспектив розвитку науково-технічного прогресу необхідно: сформулювати концепцію та основні цілі національної політики України як суверенної держави у галузі дослідження та використання космічного простору.

2. Створити державний керівний орган — Українське аерокосмічне агентство (УАКА), відповідальний за організацію та координацію космічних програм.

3. Розробити закон, що регламентує структуру, права та відповідальність УАКА за розвиток космічної галузі в Україні.

4. Розробити та прийняти Верховною Радою державну програму космічних досліджень, що передбачає розвиток фундаментальних і прикладних космічних досліджень.

5. Взяти участь у підготовці міжурядової угоди суверенних держав колишнього СРСР про здійснення прийнятих раніше та підготовці нових космічних програм.

6. Переглянути питання про створення центрів УАКА з метою забезпечення української національної космічної програми.

## 7. ПІСЛЯМОВА

Ми — щасливе покоління людства, котре стало свідком (а дехто творцем) епохи драматичних змін у космічній сфері. Серед таких творців нашої новітньої історії, зокрема й космічної, — Леонід Макарович Кравчук, перший Президент України, який 10 травня 2022 року відійшов у Вічність. Президенту АН України Б. Є. Патону та Л. М. Кравчуку належить честь створення першого у незалежній Україні космічного відомства — Національного космічного агентства (зараз — Державне космічне агентство України). Ось як це відбувалося:

27 листопада 1991 р. — лист Комісії космічних досліджень АН УРСР президенту АН УРСР, академіку Патону Б.Є.

13 грудня 1991р. — засідання Президії АН УРСР на тему «Про космічні дослідження СРСР і України».

30 січня 1992 р. — зустріч Президента України Л. М. Кравчука з науковцями АН України.

29 лютого 1992 р. — Указ Президента України «Про створення Національного космічного агентства України».

1992—1994 рр. — призначення В. П. Горбуліна Генеральним директором НКАУ. Період його діяльності на цій державній посаді був надзвичайно продуктивним та увійшов у аналі космічної історії України.

Наприкінці статті зазначу, що про важливі науково-організаційні проекти з космічних досліджень в Україні в 1957—1997 роках та нариси про Ю. В. Кондратюка, М. В. Келдиша, С. П. Корольова, Р. З. Сагдеева, А. П. Завалишина описано у моїй книзі «Мое земне тяжіння» у розділі «Наукові будні. Справа Космос UA», відповідно, «Космічні нариси», «Україна космічна в складі СРСР. 1957—1990», «Перші кроки незалежної космічної України: 1991—1997», «Україна космічна в персоналіях» [27].

*Автор висловлює щирю вдячність І. Б. Вавиловій та В. М. Клименку за обговорення цієї статті та допомогу у підготовці її до друку.*

## ЛІТЕРАТУРА

1. Горбулін В. П., Шевцов А. І., Шеховцов В. С. Міжнародний космічний ринок послуг: місце і перспективи України. *Космічна наука і технологія*. 2000. 6, № 1. С. 64—71. <https://doi.org/10.15407/knit2000.01.064>
2. Горбулін В. П., Яцків Я. С. Б. Є. Патон і розвиток космічної науки та технології. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 5. С. 43—52. URL: <https://doi.org/10.15407/knit2018.05.043> (дата звернення: 15.05.2022).
3. Дегтярєв А. В. *Призваны временем. От противостояния к международному сотрудничеству*. Днепропетровск: Арт-Пресс, 2009.
4. *История развития сварки в космосе*. URL: <https://blog.svarcom.net/statii/svarka-v-kosmose.html> (дата звернення: 26.04.2022).
5. Каденюк Л. *Місія — Космос*. Київ: ТОВ «Новий друк», 2017. 516 с.
6. Козырев В. И., Никитин С. А. Полеты по программе «Интеркосмос». *Сер. Космонавтика, астрономия*. 1980. № 4. 64 с.
7. Коротаев Г. К., Пустовойтенко В. В., Терехин Ю. В., Драновський В. Й., Кавелін С. С., Салтиков Ю. Д., Ємельянов О. Л., Цимбал В. М., Єфімов В. Б., Курекін О. С., Комяк В. О., Пічугін О. П. Тридцять років вітчизняної супутникової океанології. 2. Прикладні аспекти використання супутникової інформації. *Космічна наука і технологія*. 2007. 13, № 5. С. 44—57. <https://doi.org/10.15407/knit2007.05.044>
8. *Космический аппарат АУОС-3-Р-П-ИК. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное»*. Под общей ред. С. Н. Конюхова. Днепропетровск: ООО «КолорГраф», 2001. С. 168—169.
9. *Космічне право України*. Збірник нормативно-правових актів та міжнародних документів. Ред.: О. О. Негода, Ю. С. Шемшученко. Упорядники: О. В. Беглий, А. І. Дмитрієв. Київ: Ін-Юре, 1998. 216 с.

10. Костык Р. И., Кесельман И. Г., Осипов С. Н., Лебедев Н. И., Ораевский В. Н., Жугжда Ю. Д., Копаев И. Н. Гелиосейсмологический эксперимент КОРОНАС-ДИФОС. *Космічна наука і технологія*. 1996. **2**, № 1. С. 34—40. <https://doi.org/10.15407/knit1996.01.034>
11. Лебедев В. К., Шелягин В. Д., Мохнач В. К., Назаренко О. К., Чалов В. И., Масалов Ю. А. Новая система стабилизации тока и ускоряющего напряжения электронных пушек. *Автомат. сварка*. 1971. № 9. С. 46—48.
12. Лялько В. І. Стан і перспективи розвитку аерокосмічних досліджень Землі в Україні. *Космічна наука і технологія*. 2002. **8**, № 1. С. 8—14. <https://doi.org/10.15407/knit2002.01.007>
13. Лялько В. І., Федоровський О. Д. Україна з космосу. Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів. *Космічна наука і технологія*. 1997. **3**, Додаток 2. С. 3—32. <https://doi.org/10.15407/knit1997.02s.003>
14. Патон Б. Е. 25 лет сварке в открытом космосе. *Космічна наука і технологія*. 2018. **24**, № 5. С. 14—18.
15. Патон Б. Е., Вавилова І. Б., Негода О. О., Яцків Я. С. Важливі віхи космічної ери. *Космічна наука і технологія*. 2001. **7**, № 1. С. 2—92. <https://doi.org/10.15407/knit2001.01.002>
16. Патон Б. Е., Гавриш С. С., Шулым В. Ф., Булацев А. Р., Демьяненко В. В., Крюков В. А. и др. Ручные электронно-лучевые технологические работы в космосе. *Автомат. сварка*. 1999. № 10. С. 7—22.
17. Патон Б., Джанибеков В., Савицкая С. Испытано на орбите. *Наука и жизнь*. 1986. № 2. С. 2—7.
18. Патон Б. Е., Дудко Д. А., Бернадский В. Н., Лапчинский В. Ф., Загребельный А. А., Стесин В. В. и др. *Выполнение ручной электронно-лучевой сварки в космосе*. Космическое материаловедение и технология. Под ред. А. С. Охотин. Москва: Наука, 1977. С. 17—22.
19. Патон Б. Е., Кубасов В. Н. Эксперимент по сварке металлов в космосе. *Автомат. сварка*. 1970. № 5. С. 7—12.
20. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. *Сварка и родственные технологии в космосе*. Киев: Наук. думка, 1998.
21. Патон Б. Е., Назаренко О. К., Чалов В. И., Непорожний Ю. В., Лебедев В. К., Заруба И. И. и др. Особенности аппаратуры и процессов электронно-лучевой сварки и резки в условиях космоса. *Автомат. сварка*. 1971. № 3. С. 3—8.
22. *Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное»*. Под общей ред. С. Н. Конохова. Днепропетровск: ООО «КолорГраф», 2001. 240 с. ISBN 966-7482-00-6.
23. Стесин В. В. Е. Патон в работах по космическим технологиям. *Космічна наука і технологія*. 2018. **24**, № 5. С. 24—27.
24. Стрелко О. Г., Пилипчук О. Я., Бердниченко Ю. А. До п'ятдесятиріччя першого експерименту зі зварювання у космосі. *Космічна наука і технологія*. 2019. **25**, № 5. С. 76—84. <https://doi.org/10.15407/knit2019.05.076>
25. Федоровський О. Д., Гриневецький В. Т., Костюченко Ю. В., Кувшинов О. Ю. Ландшафтознавчий підхід при дешифруванні космічних знімків. *Космічна наука і технологія*. 1998. **4**, № 1. С. 39—45. <https://doi.org/10.15407/knit1998.01.039>
26. Яцків Я. С. Наукові космічні проекти України. *Космічна наука і технологія*. 2002. **8**, № 1. С. 3—6. <https://doi.org/10.15407/knit2002.01.003>
27. Яцків Я. С. *Моє земне тяжіння: У 2-х томах*. К.: Академперіодика, 2015. Том 2. Розділ «Наукові будні: Справа Космос UA». С. 3—88. ISBN 978-966-360-295-0 (Т.2).
28. INTERCOSMOS 21. URL: <https://www.n2yo.com/satellite/?s=12162> (дата звернення: 15.05.2022).
29. Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G. Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes. *Astron. and Astrophys.* 2001. **369**. P. 660—671. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010129>
30. Kordyum E. L. Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity. *Review: Plant Biol. in Space*. 2014. **16**, № 1. P. 79—90. <https://doi.org/10.1111/plb.12047>.
31. Kordyum E. L., Chapman D. K. *Plants in Space*. Kyiv: Akademperiodika, 2007.
32. Kordyum E. L., Hasensteinb K. H. Plant biology for space exploration — Building on the past, preparing for the future. *Life Sci. in Space Res.* 2021. **29**. P. 1—7. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.01.003>
33. Kostik R. I., Osipov S. N., Khomenko E. V., Lebedev N. I. *Helioseismology space and ground based studies*. Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity: IAU Symposium. Eds A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004. Vol. 223. P. 273—274. <https://doi.org/10.1017/S1743921304005897>
34. Paton B. E., Lapchinskii V. F. *Welding in space and related technologies*. Cambridge: Int. Sci. Publ., 1997.
35. Paton B. E., Negoda A. A., Yatskiv Ya. S., Konyukhov S. N., Kordyum E. L., Kuntsevich V. M., Litvinenko L. N., Nemoshkalenko V. V., Prisyakov V. F., Trefilov V. I., Bass V. P., Bondarenko S. I., Frolkis V. V., Kordyum V. A., Korkushko O. V., Lobanov L. M., Lyalko V. I., Morozhenko O. V., Pilipenko V. V., Pokhyl Yu. A., Yampolski Yu. M., Cheremnykh O. K., Dranovsky V. J., Fedorov O. P., Sedykh S. N., Vavilova I. B. Ukrainian scientific research and technological experiments proposed for the International Space Station: brief overview. *Kosm. nauka tehnol.* 2000. **6**, № 4. P. 10—19. <https://doi.org/10.15407/knit2000.04.010>
36. Paton B. E. Welding in space. *Welding Engineering*. 1972. **57**, № 1. P. 25—29.
37. Vavriv D. M. *Cloud Radar Activities at the Institute of Radio Astronomy of the NAS of Ukraine*. Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves: Symposium proceedings (Kharkov, Ukraine, June 4—9, 2001). Kharkov, 2001. P. 85.

38. Vavriv D. M., Volkov V. A., Bormotov V. N., Vynogradov V. V., Kozhyn R. V., Trush B. V., Belikov A. A., Semenyuta V. Ye. Millimeter-Wave Radars for Environmental Studies. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2002. 7. P. 121.

## REFERENCES

1. Gorbun V. P., Shevtsov A. I., Shekhovtsov V. S. (2000). International space service market: place and future prospects of Ukraine. *Kosm. nauka tehnol.*, 6(1), 64–71 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/knit2000.01.064>
2. Horbulin V. P., Yatskiv Ya. S. (2018). B. E. Paton and the development of space science and technology. *Space Sci. & Technol.*, 24(5), 43–52 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/knit2018.05.043>.
3. Degtyarev A. V. (2009). *Called by Time. From confrontation to international cooperation*. Dnepropetrovsk: Art-Press. ISBN 978-966-348-180-7. (History of DB “Yuzhnoye”) [in Russian].
4. The history of the development of welding in space. URL: <https://blog.svarcom.net/statii/svarka-v-kosmose.html> (Last accessed: 15.05.2022) [in Russian].
5. Kadenyuk L. (2017). *Mission — the Cosmos*. Kyiv: TOV “Novyi Druk”, 516 p. ISBN 978-617-635-102-3/
6. Kozyrev V. I., Nikitin S. A. (1980). Flights under the Intercosmos program. *Knowledge. Ser. Cosmonautics, Astronomy*, № 4, 64 p.
7. Korotaev G. K., Pustovoitenko V. V., Terekhin Yu. V., Dranovsky V. I., Kavelin S. S., Saltykov Yu. D., Yemelyanov O. L., Tsybmal V. N., Efimov V. B., Kurekin A. S., Komyak V. A., Pichugin A. P. (2007). Thirty years of domestic space oceanology. 2. Practical aspects of the application of satellite information. *Kosm. nauka tehnol.*, 13(5), 44–57. <https://doi.org/10.15407/knit2007.05.044>
8. *Spacecraft AUOS-3-R-P-IK*. (2001). *Rockets and spacecraft of the Design Bureau “Yuzhnoye”*. Ed. S. N. Konyukhov. Dnepropetrovsk: LLC “ColorGraph”, 168–169.
9. Space Law of Ukraine: A Collection of Regulatory Acts and International Agreements. Eds O. O. Negoda, Yu. S. Shemshuchenko, 264 p. (In Jure, Kyiv, 1999) [in Ukrainian].
10. Kostyk R. I., Keselman I. G., Osypov S. N., Lebediev N. I., Oraevskiy V. N., Zhugzhda Y. D., Kopaiev I. M. (1996). Helioseismological CORONAS—DIFOS experiment. *Kosm. nauka tehnol.* 2(1), 34–40 [in Russian]. <https://doi.org/10.15407/knit1996.01.034>
11. Lebedev V. K., Shelyagin V. D., Mokhnach V. K., Nazarenko O. K., Chalov V. I., Masalov Yu. A. (1971). New system of current stabilization and accelerating voltage of electron guns. *Automatic welding*, № 9, 46–48 [in Russian].
12. Lyalko V. I. (2002). Present state and prospects for the aerospace research of the Earth in Ukraine. *Kosm. nauka tehnol.*, 8(1), 7–14. <https://doi.org/10.15407/knit2002.01.007>
13. Lyalko V. I., Fedorovskiy O. D. (1997). Ukraine from space. Atlas of decoded images of the area of Ukraine from space platforms. *Kosm. nauka tehnol.*, 3, Suppl. 2, 3–32. <https://doi.org/10.15407/knit1997.02s.003>
14. Paton B. E. (2018). 25 years of welding in open space. *Space Sci. & Technol.*, 24(5), 14–18 [in Russian].
15. Paton B. E., Vavilova I. B., Negoda O. O., Yatskiv Ya. S. (2001). Important Cornerstones in the Cosmic Era. *Kosm. nauka tehnol.*, 7(1), 92 p. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/knit2001.01.002>.
16. Paton B. E., Gavrish S. S., Shulym V. F., Bulatsev A. R., Demyanenko V. V., Kryukov V. A. et al. (1999). Manual electron beam technological work in space. *Automatic welding*, № 10, 7–22 [in Russian].
17. Paton B., Dzhanibekov V., Savitskaya S. (1986). Tested in orbit. *Science and life*, № 2, 2–7 [in Russian].
18. Paton B. E., Dudko D. A., Bernadskij V. N., Lapchinskij V. F., Zagrebel'nyj A. A. Stesin V. V. et al. (1977). *Performance of manual electron beam welding in space*. Space materials science and technology. Ed. A. S. Ohotin. Moskva: Nauka, 17–22 [In Russian].
19. Paton B. E., Kubasov V. N. (1970). Experiment on metal welding in space. *Automatic welding*, № 5, 7–12 [in Russian].
20. Paton B. E., Lapchinskij V. F. (1998). *Welding and related technologies in space technology*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
21. Paton B. E., Nazarenko O. K., Chalov V. I., Neporozhniy Yu. V., Lebedev V. K., Zaruba I. I., et al. (1971). Features of equipment and processes of electron beam welding and cutting in space. *Automatic welding*, № 3, 3–8 [in Russian].
22. *Rockets and spacecraft of the Design Bureau “Yuzhnoye”*. (2001). Ed. S. N. Konyukhov. Dnepropetrovsk: LLC “ColorGraph”, 240 p. ISBN 966-7482-00-6 [in Russian]
23. Stesin V. V. (2018). V. E. Paton in works on space technologies. *Space Sci. & Technol.*, 24(5), 24–27. [in Russian].
24. Strelko O. H., Pylypchuk O. Ya., Berdnychenko Yu. A. (2019). The fiftieth anniversary of the first space welding experiment. *Space Sci. & Technol.*, 25 (5), 76–84 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/knit2019.05.076>
25. Fedorovskiy O. D., Grinevetskiy V. T., Kostyuchenko Yu. V., Kuvshinov A. Yu. (1998). Landscape-investigation approach in decoding space images. *Kosm. nauka tehnol.*, 4(1), 39–45. <https://doi.org/10.15407/knit1998.01.039>
26. Yatskiv Ya. S. (2002). Scientific space projects in Ukraine. *Kosm. nauka tehnol.*, 8 (1), 3–6 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/knit2002.01.003>

27. Yatskiv Ya. S. (2015). *My earthly gravity*: In 2 vol. K.: Academperiodika, Vol. 2. Section “Scientific everyday life: The case of Space UA”, 3—88. ISBN 978-966-360-295-0 (V.2).
28. *INTERCOSMOS 21*. URL: <https://www.n2yo.com/satellite/?s=12162> (дата звернення: 15.05.2022).
29. Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G. (2001). Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes. *Astron. and Astrophys.*, **369**, 660—671. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010129>
30. Kordyum E. L. (2014). Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity. Review: *Plant Biol (Stuttg)*, 16 Suppl. 1, 79—90. <https://doi.org/10.1111/plb.12047>.
31. Kordyum E. L., Chapman D. K. (2007). *Plants in Space*. Kyiv: Akademperiodika.
32. Kordyum E. L., Hasenstein K. H. (2021). Plant biology for space exploration — Building on the past, preparing for the future. *Life Sci. in Space Res.*, **29**, 1—7. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.01.003>
33. Kostik R. I., Osipov S. N., Khomenko E. V., Lebedev N. I. (2004). *Helioseismology space and ground based studies*. Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity: IAU Symposium. Eds A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, **223**, 273—274. <https://doi.org/10.1017/S1743921304005897>
34. Paton B. E., Lapchinskii V. F. (1997). *Welding in space and related technologies*. Cambridge: Int. Sci. Publ., 1997.
35. Paton B. E., Negoda A. A., Yatskiv Ya. S., Konyukhov S. N., Kordyum E. L., Kuntsevich V. M., Litvinenko L. N., Nemoshkalenko V. V., Prisyakov V. F., Trefilov V. I., Bass V. P., Bondarenko S. I., Frolkis V. V., Kordyum V. A., Korkushko O. V., Lobanov L. M., Lyalko V. I., Morozhenko O. V., Pilipenko V. V., Pokhyl Yu. A., Yampolski Yu. M., Cheremnykh O. K., Dranovsky V. J., Fedorov O. P., Sedykh S. N., Vavilova I. B. (2000). Ukrainian scientific research and technological experiments proposed for the International Space Station: brief overview. *Kosm. nauka tehnol.*, **6**(4), 10—19. <https://doi.org/10.15407/knit2000.04.010>
36. Paton B. E. (1972). Welding in space. *Welding Engineering*, **57**(1), 25—29.
37. Vavriv D. M. (2001). *Cloud Radar Activities at the Institute of Radio Astronomy of the NAS of Ukraine*. Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves: symposium proceedings (Kharkiv, Ukraine, June 4—9, 2001). Kharkiv, 85.
38. Vavriv D. M., Volkov V. A., Bormotov V. N., Vynogradov V. V., Kozhyn R. V., Trush B. V., Belikov A. A., Semenyuta V. Ye. (2002). Millimeter-Wave Radars for Environmental Studies. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **7**, 121.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2022

Після доопрацювання 17.05.2022

Прийнято до друку 17.05.2022

Received 26.04.2022

Revised 17.05.2022

Accepted 17.05.2022

Ya. S. Yatskiv, Director, Dr. Sci, Member of the National Academy of Sciences of Ukraine

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine

27 Akademik Zabolotny St., Kyiv, 03143 Ukraine

## FROM THE HISTORY OF SPACE RESEARCH IN UKRAINE.

### 1. THE PERFORMANCE OF SPACE RESEARCH AS OF 1991 YEAR

The article displays the material of 1991 from the author’s archive, which is devoted to the problems of space research arrangement and the space industry authority in independent Ukraine. A brief description of the space research level in Ukraine at that time is given. The active participation of Ukraine in the activity of international organizations and the implementation of USSR space programs are highlighted. The significant achievements and acquirements of scientific and design teams in the space research branch are emphasized. Among them, there were the rocket design center DB “Pivdenne” (now — Yangel Yuzhnoye State Design Office), E. O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, and many other enterprises and scientific institutions in Ukraine. In new conditions, under the newly acquired independence, the formidable task of preserving the aerospace industry of Ukraine arose. Within this task, it was necessary to preserve scientific and developing potential and to provide perspectives for scientific and technical progress. All this was possible only within the framework of the concept that had to be developed and which would contain the main goals of the national politics of Ukraine as an independent state in the branch of exploration and exploitation of space. It was necessary to create the aerospace agency of Ukraine for the coordination of space programs and to develop a law to regulate its activities. One more task was to adopt the state program of space exploration by the Verkhovna Rada, the program, which had to provide for the progress of fundamental and applied space research.

**Keywords:** independent Ukraine, aerospace industry, space exploration and exploitation, history of space research.