

УДК 52"731"(15)-13:523.31-853"742"
КП 72.19.50-00.00
№ 0118U003989
Інв. №

Національна академія наук України
Державне космічне агентство України
Інститут космічних досліджень
(ІКД)

03187, Київ, проспект Академіка Глушкова, 40, корпус 4/1;
тел./факс: (044) 526 41 24, e-mail: ikd@ikd.kiev.ua, <http://www.ikd.kiev.ua/>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
Інституту космічних досліджень
Національної академії наук України та
Державного космічного агентства України,
член-кор. НАН України

О.П. Федоров

ЗВІТ ПРО ВИКОНАННЯ НАУКОВОГО ПРОЕКТУ

«Забезпечення виконання проектів:

- розроблення нової універсальної методики токсичності планетарного пилу для перспективних космічних місій (Конкурс молодіжних проектів);
- створення штучної екосистеми для проведення біологічних експериментів на наносупутниках «Мікрокосм-М» (Конкурс молодіжних проектів);
- космічний проект «Кластеріон»: вивчення динамічних процесів в іоносфері з використанням кластера супутників YuzhSat (Конкурс проектів YuzhSat);
- розробка алгоритмів роботи та обробки інформації приладу «Піон» для вивчення іоносферної плазми на борту мікросупутників (Конкурс проектів YuzhSat)»

Етап 1: Науково-методичний супровід перспективних космічних проектів

Науковий керівник роботи
старший науковий співробітник
к.т.н., с.н.с.

Л.П. Семенов

Відповідальний виконавець
н.с. лаб. № 28

Т.В. Скороход

2018

Рукопис закінчено 05 грудня 2018 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник роботи
старший науковий
співробітник
к.т.н., с.н.с.

Л.П. Семенов
(реферат, вступ, висновки)

Відповідальний виконавець
н.с. лаб. № 28

Т.В. Скороход
(реферат, вступ, всі розділи,
висновки)

М.н.с.

О.В. П'янкова
(всі розділи)

РОБОТИ ЗА ПРОЕКТАМИ БУЛИ ВИКОНАНІ АВТОРАМИ:
(Згідно до ЦПХ)

(РОЗДІЛ 1)

Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України,
відділу клітинної біології та анатомії,
н.с., к.б.н. **В.О. Бриков** (vbrykov@gmail.com)

(РОЗДІЛ 2)

Інститут біохімії ім. О.В. Палладіна НАН України,
д.б.н., **Т.О. Борисова** (tatianabiochem@gmail.com)

(РОЗДІЛ 3)

Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України,
лабораторія супутникових досліджень ближнього космосу,
к.ф.-м.н., с.н.с. **Г.В. Лізунов** (georgii.lizunov@gmail.com)

(РОЗДІЛ 4)

Одеський Національний політехнічний Університет МОН України,
кафедра радіотехнічних пристроїв,
науковий керівник: зав. кафедри, д.т.н., доцент **О.Б. Коханов**
відповідальний виконавець: ст. викладач **М.О. Барабанов**

(bmo@opu.ua)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 100 стор., 18 рис., 8 таблиць, 55 джерел.

Мета роботи – науково-методичний супровід перспективних космічних проектів. Розроблення програмних документів.

Об'єкт дослідження – перспективні наукові проекти з використанням малих космічних апаратів.

Основний напрям наукової діяльності установи, за яким виконується проект:

Розробка та створення перспективних приладів для космічних досліджень

Методи дослідження – збір та узагальнення даних, системний аналіз.

Анотація. За результатами проведення конкурсів в 2017 році «Розроблення науково-технічних пропозицій щодо корисного навантаження на платформу «YuzhSat» та «Перспективні космічні проекти» було обрано переможців та надано фінансування на описання концепцій їх проектів.

У звітний період надана підтримка на виконання наступних проектів:

– розроблення нової універсальної методики токсичності планетарного пилу для перспективних космічних місій (Конкурс молодіжних проектів);

– створення штучної екосистеми для проведення біологічних експериментів на наносупутниках «Мікрокосм-М» (Конкурс молодіжних проектів);

– космічний проект «Кластеріон»: вивчення динамічних процесів в іоносфері з використанням кластера супутників YuzhSat (Конкурс проектів YuzhSat);

– розробка алгоритмів роботи та обробки інформації приладу «Піон» для вивчення іоносферної плазми на борту мікросупутників (Конкурс проектів YuzhSat)

КОСМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, КОСМІЧНІ СИСТЕМИ, КОСМІЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ, ОБРОБЛЕННЯ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ, ОСВІТНЯ ПРОГРАМА

Умови одержання звіту: за договором. 01030, м. Київ, вул. Володимирська, 54; тел.: (044) 239 64 44, факс: (044) 234 32 43, e-mail: prez@nas.gov.ua

ЗМІСТ

Список авторів.....	2
Передмова.....	9
Вступ	10
Розділ 1 Створення штучної екосистеми для проведення біологічних експериментів на наносупутниках «Мікрокосм-М» (Конкурс молодіжних проектів).....	12
1.1 Сутність досліджуваної проблеми	12
1.2 Коротка історія та стан питання в даний час	15
1.3 Обґрунтування проведення КЕ в умовах космічного простору	18
1.4 Опис КЕ (порядок проведення, вимоги до умов проведення, технічні особливості наукової апаратури).....	18
1.5 Очікувані результати та їх використання	22
Розділ 2 Розроблення нової універсальної методики токсичності планетарного пилу для перспективних космічних місій (Конкурс молодіжних проектів)	24
2.1 Актуальність та наукове обґрунтування завдань проекту	24
2.2 Опис КЕ (порядок проведення, вимоги до умов проведення, технічні особливості наукової апаратури).....	31
2.3 Очікувані результати та їх використання	32
2.4 Обґрунтування технічної можливості створення експериментального обладнання	34
2.5 Розробка Технічної пропозиції з наукової апаратури (ГОСТ 2.118-2013) – в узгодженому обсязі	38
2.5.1 Матеріали.....	39
2.5.2 Етичні норми	39
2.5.3 Синтез карбонових точок	40
2.5.5 Визначення накопичення L-[¹⁴ C]глутамату синаптосомами.....	41
2.5.6 Визначення вивільнення глутамату з синапсом.....	42
2.5.7 Визначення вивільнення [³ H]ГАМК з синапсом.....	43
2.5.8 Визначення накопичення [³ H]ГАМК синаптосомами.....	43
2.5.9 Аналіз препаратів синапсом та симулянтів місячного та марсіанського ґрунту за допомогою фотонної кореляційної спектроскопії.....	44
2.5.10 Статистичний аналіз даних	44
Розділ 3 Космічний проект «Кластеріон»: вивчення динамічних процесів в іоносфері з використанням кластера супутників YuzhSat (Конкурс проектів YuzhSat).....	45
3.1 Вступ	45
3.2 Призначення проекту (сутність проблеми, наукове обґрунтування та постановка задачі досліджень).....	46
3.2.1 Аналіз перспектив розвитку ринку КА.....	46
3.2.2 Наукове підґрунтя проекту «Кластеріон»	47
3.2.3 Обґрунтування необхідності реалізації проекту в умовах космічного простору	49

	6
3.2.4 Призначення проекту «КластерІон»	50
3.2.5 Очікувані результати	50
3.3 Обґрунтування технічної можливості створення наукових приладів, КА та орбітального угруповання	51
3.3.1 Комплекс наукової апаратури.....	51
3.3.2 Платформа КА.....	55
3.3.3 Наземний сегмент збирання, обробки та розповсюдження наукової інформації	56
3.3.4 Інноваційні аспекти проекту «КластерІон».....	57
3.3.5 Орбітальна конфігурація	58
3.4 Організаційні питання	60
Розділ 4 Розробка алгоритмів роботи та обробки інформації приладу «Піон» для вивчення іоносферної плазми на борту мікросупутників (Конкурс проектів YuzhSat)	62
4.1 Вступ	62
4.2 Сутність досліджуваної проблеми, коротка історія та стан питання в даний час	64
4.2.1 Сутність досліджуваної проблеми	64
4.2.2 Коротка історія та стан питання в даний час	64
4.3 Технічна пропозиція по космічному експерименту «Піон»	68
4.3.1 Сутність КЕ	68
4.3.2 Обґрунтування проведення КЕ в умовах космічного простору	69
4.3.3 Опис КЕ «Піон»	70
4.3.4 Очікувані результати КЕ та їх використання	76
4.4 Розробка структурної схеми, алгоритмів роботи та обробки інформації приладу «Піон»	77
4.4.1 Структурна схема приладу «Піон».....	77
4.4.2 Алгоритм роботи приладу під час вимірювань.....	84
4.4 Обґрунтування технічної можливості створення приладу «Піон»	88
4.4.1 Конструкція приладу	88
4.4.2 Оцінка сумарного енергоспоживання приладу	91
4.6 Висновки	92
Висновки	93
Перелік використаних джерел	94

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АГП	аналізатор з гальмуючим потенціалом
АЦП	аналогово-цифровий перетворювач
БД	база даних
БСЖ	біорегенеративних систем життєзабезпечення
ВАХ	вольт-амперної характеристики
ДКА	Державне космічне агентство України
ДП	«КБ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне»
«Південне»	ім. М. К. Янгеля
ІКД	Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
КА	космічний апарат
КД	конструкторська документація
КЕ	космічний експеримент
КНА	комплекс наукової апаратури
КПА	контрольно-повірочна апаратура
ЛАС	лінійні альтернансні сплайни Чебишева – алгоритм стиснення даних
ЛЦ ІКД	Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
МКС	Міжнародна космічна станція
НАН України	Національна академія наук України
НАСА	Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору
НДР	Науково-дослідна робота
НЧА	найкраща чебишевська апроксимація поліномами – алгоритм стиснення даних

ПЕОМ	персональна електронно-обчислювальна машина
ПТК	програмно-технічний комплекс
СЗНІ	блок системи збору, обробки та збереження даних вимірювань і управління на борту КА (від Система Збору Наукової Інформації)
СУБД	Система управління базами даних
ТМІ	телеметрична інформація
УП	упакування приросту – алгоритм стиснення даних
API	інтерфейс прикладного програмування
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems (Консультативний комітет з космічних систем даних)
FK	Foreign Key – зовнішній ключ записів реляційних баз даних
IPSEC	Набір протоколів для забезпечення захисту даних які передаються по мережевому протоколу IP
JSON	формат даних зручних для використання людиною, може використовуватись у якості структури обміну даними (від JavaScript Object Notation)
ODBC	Open Database Connectivity – програмний інтерфейс доступу до БД
ORM	Object-Relation Mapping (об’єктно-реляційне відображення)
PK	Primary Key – первинний ключ записів реляційних баз даних
PROMIS	Центр даних супутникових спостережень в ІКД (від англ. PROcessed Measurements of Ionospheric Satellites – оброблені вимірювання іоносферних супутників
REST	передача стану представлення
Sciway	уніфікований швидкісний інтерфейс для розподілених бортових систем збирання даних та управління КА
SOA	сервіс-орієнтована архітектура компонентів
SAP HANA	база даних розробки фірми SAP (від High-Performance Analytic Appliance)

ПЕРЕДМОВА

Цей звіт складено Інститутом космічних досліджень НАН України та ДКА України за результатами проведення роботи за договором № 6-02/18 від 08.02.2018, відповідно до Концепції Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми на 2018–2022 роки затвердженою Розпорядженням КМУ №629 від 05.09.2018р та проектом ЗКПУ 2018–2022 передбачено виконання наукових досліджень з використанням малих космічних апаратів.

Завданням наукового проекту було забезпечення виконання наступних робіт:

- розроблення нової універсальної методики токсичності планетарного пилу для перспективних космічних місій (Конкурс молодіжних проектів);
- створення штучної екосистеми для проведення біологічних експериментів на наносупутниках «Мікрокосм-М» (Конкурс молодіжних проектів);
- космічний проект «Кластеріон»: вивчення динамічних процесів в іоносфері з використанням кластера супутників YuzhSat (Конкурс проектів YuzhSat);
- розробка алгоритмів роботи та обробки інформації приладу «Піон» для вивчення іоносферної плазми на борту мікросупутників (Конкурс проектів YuzhSat)

ВСТУП

Космічна наука світу вимагає постійного руху у створенні та реалізації ідей нових космічних місій та інноваційних розробок галузі космічного приладобудування та інформаційних технологій. Трендом сьогодення є космічного приладобудування є малі космічні апарати. Інститутом космічних досліджень НАН України та ДКА України за ініціативою Ради з космічних досліджень НАН України була забезпечена підтримка проектів-переможців двох конкурсів перспективних космічних проектів з використанням малих космічних апаратів, проведених в 2017 році: молодіжного конкурсу та конкурсу проектів корисного навантаження для платформи «YuzhSat». На 17-й Українській конференції з космічних досліджень (м. Одеса, 21–25 серпня 2017 р.) керівники проектів-переможців представили свої роботи:

молодіжний конкурс перспективних космічних проектів

– Розробка, виготовлення та випробування ультрафіолетового поляриметра для дослідження поляризаційної складової стратосферного озонового шару Землі (УФП);

– Динамічні і фізичні характеристики геостаціонарних супутників за фотометричними спостереженнями, орбітальне супроводження українського ГСС "Либідь" на ГЕО;

– Розроблення нової універсальної методики оцінювання токсичності позаземного планетарного пилу;

– Створення штучної екосистеми для біологічних експериментів на малих супутниках «Мікрокосм-М»;

конкурс проектів корисного навантаження платформи «YuzhSat»

– Космічний проект «КластерІон»: вивчення динамічних процесів в іоносфері з використанням кластера супутників YuzhSat;

– Дослідження природи мікросплесків високоенергетичних електронів і протонів в радіаційних поясах Землі та поза їхніми межами;

– Прилад "Піон" для вивчення іоносферної плазми на борту мікросупутника (ПІОН-ОНПУ);

– Штучна міні-магнітосфера як засіб керування рухом космічного апарату в іоносфері Землі.

З метою подальшого опрацювання можливості реалізації запропонованих проектів чотири з них були внесені до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018-2022рр., зокрема:

– Розроблення нової універсальної методики токсичності планетарного пилу для перспективних космічних місій (Конкурс молодіжних проектів);

– Створення штучної екосистеми для проведення біологічних експериментів на наносупутниках «Мікрокосм-М» (Конкурс молодіжних проектів);

– Космічний проект «Кластеріон»: вивчення динамічних процесів в іоносфері з використанням кластера супутників YuzhSat (Конкурс проектів YuzhSat);

– Розробка алгоритмів роботи та обробки інформації приладу «Піон» для вивчення іоносферної плазми на борту мікросупутників (Конкурс проектів YuzhSat).

Протягом 2018 року за кожним з обраних проектів були запропоновані та виконані наступні роботи:

науково-технічне обґрунтування космічного експерименту (КЕ):

– сутність досліджуваної проблеми;

– обґрунтування проведення КЕ в умовах космічного простору;

– опис КЕ (порядок проведення, вимоги до умов проведення, технічні особливості наукової апаратури);

– обґрунтування технічної можливості створення експериментального обладнання;

розробка технічної пропозиції з наукової апаратури:

– пояснювальна записка;

– креслення загального виду (електронна модель);

– електричні схеми.

Результати проведеної роботи представлені в розділах 1–4 звіту.

РОЗДІЛ 1

СТВОРЕННЯ ШТУЧНОЇ ЕКОСИСТЕМИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ НА НАНОСУПУТНИКАХ «МІКРОКОСМ-М» (КОНКУРС МОЛОДІЖНИХ ПРОЕКТІВ)

1.1 Сутність досліджуваної проблеми

Рослини є безальтернативним компонентом біорегенеративних систем життєзабезпечення (БСЖ) довготривалих космічних місій (тривалі перельоти та позаземні бази), оскільки рослини виступають в якості регенерантів кисню та води, джерелом їжі та утилізації продуктів життєдіяльності. Іншими словами освоєння людиною космосу не можливе без фактичної присутності рослин і тому спонукає до проведення широкого спектру біологічних експериментів на орбітальних платформах для з'ясування впливу факторів космічного польоту на функціонування рослинного організму. Узагальнюючи чисельні біологічні експерименти, проведені на різних космічних апаратах, можна зробити висновок, що мікрогравітація не є фактором, що лімітує ріст, розвиток і репродукцію рослин (Wolff et al., 2013; Kordyum, 2014). В умовах мікрогравітації було експоновано більше 20 видів рослин, з яких тільки *Arabidopsis thaliana* (L) Heynh. (Merkys et al., 1984; Link et al., 2003), *Brassica rapa* L. (Musgrave et al., 2000), *Triticum aestivum* L. (Levinskikh et al., 1999) та *Pisum sativum* L. (Sychev et al., 2007) розвивалися від насіння до насіння, тобто здійснили повний життєвий цикл в умовах реального космічного польоту. Чотири покоління карликового гороху було отримано в космічному польоті (Sychev et al., 2007). Важливою умовою успішного вирощування рослин в умовах космосу є використання елітного насіння та підтримання певних умов культивування рослин, а саме високого рівня штучного освітлення, системи примусового нагнітання води у субстрат, вентиляції повітряного середовища та субстрату, наявність в ростових камерах речовин, що поглинають етилен. Дослідні ростові камери малого об'єму

мають складну конструкцію і не є ефективними у відношенні регенерації кисню та продукуванні їжі, що унеможливорює застосування їх технологічних систем для створення повноцінної бортової оранжереї (Heyeng, 1997; Brykov, 2015; Zabel et al., 2016). На наш погляд ключовими завданнями на шляху створення майбутніх БСЖ є з'ясування мінімально достатніх параметрів середовища для отримання задовільного приросту біомаси рослин, підбір стійких до факторів космічного середовища рослинних угруповань, що потребують мінімального втручання людини, для створення наднадійної субсистеми регенерації кисню, яка є ключовою у здійсненні тривалих позаземних місій. Інформації, щодо впливу реальної мікрогравітації на рослинні асоціації, алелопатичні взаємовідносини рослин на даний час не отримано.

Іншим важливим питанням біології рослин у космосі, яке потрібно вирішити, є з'ясування стійкості рослин до тривалої дії мікрогравітації як у онтогенезі так і у поколіннях. Використані рослинні об'єкти, що були вирощені на борту пілотованих космічних апаратів, є однорічними рослинами з коротким життєвим циклом. Багаторічні рослини, що є перспективними продуцентами кисню в тривалих космічних місіях, оскільки не потребують постійної рекультивації, не є дослідженими, хоча питання про стійкість геному, стресову стійкість, особливо до патогенів за дії тривалої комбінованої дії зменшеної мікрогравітації та космічної радіації є на часі актуальними.

Слід відзначити, дослідження біології рослин в космосі на даний час можна проводити лише на борту МКС з лімітованою кількістю обладнання та ресурсів, що вкрай обмежує проведення необхідних біологічних експериментів для з'ясування адаптивного потенціалу, продуктивності та репродукції рослин, міжвидової взаємодії, стійкості до патогенів, а також оптимізації та випробовування нових технологій і зразків техніки, що необхідні для створення БСЖ. Вітчизняні дослідники зараз, нажаль, не мають доступу до біологічного обладнання МКС внаслідок того, що космічні держави зацікавлені у реалізації власних дослідницьких програм та відсутності фінансової підтримки з боку держави. Разом з тим, ми впевнені, що наявні зараз в Україні технології є достатніми для постановки

оригінальних експериментів з дослідження актуальних питань біології рослин в космосі.

Ми вперше пропонуємо застосувати наносупутник для проведення біологічних досліджень з вищими рослинами в умовах мікрогравітації, та продемонструвати фактичну можливість здійснення подібних експериментів та отримання наукової інформації на наносупутниках. Для цього пропонується провести космічний експеримент (КЕ) «Мікрокосм-М», метою якого є з'ясування впливу факторів космічного польоту на екологічні взаємовідносин рослин за довготривалої дії факторів космічного польоту за параметрами візуального спостереження, темпів росту рослин, стану фотосинтезу та дихання.

Сумісно з дослідницькою групою д.т.н. Рассомакіна Б.М. (КПІ) запропоновано створити та випробувати вітчизняний наносупутник PolyITAN-5-BioSat за стандартом CubeSat, з системою життєзабезпечення рослин для проведення космічного біологічного експерименту «Мікрокосм-М» та запропонувати в майбутньому супутник до реалізації різноманітних біологічних дослідів в умовах мікрогравітації. Зараз супутник серії PolyITAN-2-SAU, задіяний у проекті QB50, вдало використовується на орбіті. Відомо, що рослини здатні тривалий час перебувати у замкненому гермооб'ємі, тобто в ізольованому від зовнішнього середовища стані. Така технологія отримала назву мікрокосм (від грець. *мікрós* – малий, та *κόσμος* – порядок, світ, всесвіт) або замкнена екологічна система, і є унікальним інструментом для дослідження фундаментальних процесів і взаємовідносин у екосистемі. Потенційно мікрокосми можуть бути використані для створення систем життєзабезпечення для дослідження космосу та влаштування осель поза межами земної біосфери (Nelson et al., 2010). У Національному ботанічному саду ім. М.М. Гришка НАН України було продемонстровано здатність орхідеї дорітіс рости у мікрокосмі об'ємом 3 дм² більше 12 років. Таким чином мікрокосм є вдалою моделлю для реалізації модельних експериментів на не обслуговуваних космічних платформах, подібних до PolyITAN-2-SAU. Власне підбір рослинної асоціації, демонстрація можливості співіснування рослин тривалий час в умовах гермооб'єму, підбір оптимальних параметрів середовища, тестування

системи життєзабезпечення та отримання інформації про стан рослин в умовах гермооб'єму є цілями презентованого проекту.

1.2 Коротка історія та стан питання в даний час

Наносупутники формату CubeSat, а саме завдяки розробкам наносупутникової платформи НАСА, були використані для проведення біологічних досліджень на орбіті. В основу серії наносупутників лягла розробка GeneSat-1 (3U) з термостатованою камерою для дослідження експресії генів бактерії *E. coli* зі застосуванням спеціалізованих датчиків (рис. 1.1). Шляхом його модифікації під конкретні наукові цілі було створено наступні наносупутники:

1. EcAMSat (6U) для дослідження антибіотикорезистентності бактерій;
2. SporeSat (3U) для дослідження впливу мікрогравітації ($< 1g$) на гравізалежний рух іонів Ca при проростанні спор папоротей;
3. O/OREOS, що включає 2 незалежні модуля для дослідження росту та репродукції бактерій та стійкості біологічних молекул в умовах мікрогравітації;
4. PharmaSat (3U) для дослідження росту та стану дріжджів в умовах мікрогравітації.

Дані супутники вдало зарекомендували себе на орбіті та відпрацювали біологічні завдання. Їх об'єднує те, що всі біологічні об'єкти були дрібними (бактерії, гриби та спори).

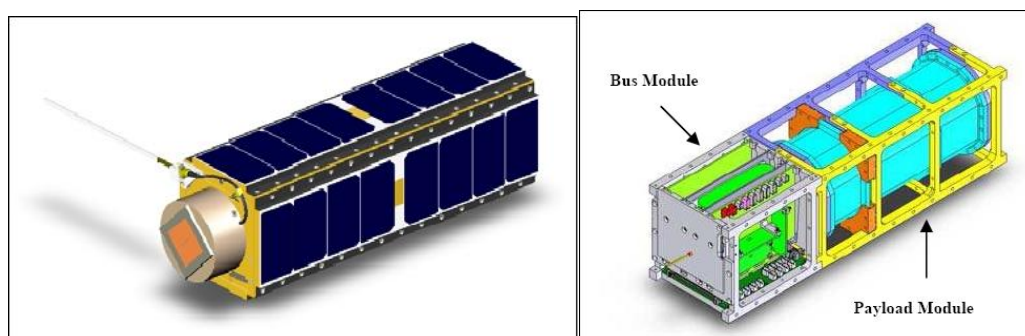


Рис. 1.1. Наносупутник GeneSat-1 (3U)

Зараз у Самарському національному дослідницькому центрі ім. акад. С.П.

Корольова проводиться робота по створенню універсального біологічного модуля BiNOM для наносупутників родини SamSat для проведення багатоцільових біомедичних експериментів з широким спектром біологічних об'єктів (бактерії, водорості, гриби, водорості, багатокомпонентні біосистеми) (Захаров и др., 2018). Даний модуль передбачає систему життєзабезпечення (підтримання температури, освітлення, газо-рідинного середовища) та системи моніторингу камери біологічного матеріалу (датчики та фотокамера) (рис. 1.2). Розробники модуля BiNOM позиціонують продукт, як універсальний, що дозволяє планувати експерименти на широкому колі біологічних об'єктів, включно з вищими рослинами та дрібними тваринами. Разом з тим розмір камери біологічного об'єкта є надзвичайно малим для проведення дослідів з вищими рослинами, більшість об'єму модуля BiNOM займають технічні вузли (рис. 1.2). Ще одним недоліком конструкції даного типу ми вбачаємо наявності системи газозабезпечення, що разом з достатньо великими габаритами все рівно не зможе забезпечити підтримання газового середовища всередині камери біологічного об'єкта протягом тривалих експериментів з біологічними об'єктами, що є надзвичайно цікавими з точки зору біології рослин у космосі.



Рис. 1.2. Модуль BiNOM для наносупутників родини SamSat

Ми пропонуємо не виключити систему газозабезпечення для проведення КЕ «Мікрокосм-М», що дозволить значно збільшити вертикальний розмір ростової

камери (до 156 мм). Відомо, що рослини здатні тривалий час перебувати у замкненому гермооб'ємі, тобто в ізолюваному від зовнішнього середовища стані. (рис. 1.3 а). Така технологія отримала назву мікрокосм (від грець. *тікρός* – малий, та *κόσμος* – порядок, світ, всесвіт) або замкнена екологічна система, і є унікальним інструментом для дослідження фундаментальних процесів і взаємовідносин у екосистемі. Потенційно мікрокосми можуть бути використані для створення систем життєзабезпечення для дослідження космосу та влаштування осель поза межами земної біосфери (Nelson et al., 2010). У Національному ботанічному саду ім. М.М. Гришка НАН України було продемонстровано здатність орхідеї дорітіс рости у мікрокосмі об'ємом 3 дм² більше 13 років (рис. 1.3 б). Таким чином мікрокосм є вдалою моделлю для реалізації модельних експериментів на не обслуговуваних космічних платформах.



Рис. 1.3. Стабільний стан рослин в мікрокосмах, віком 1 (а) та 13 (б) років, створених в Національному ботанічному саду ім. М.М. Гришка НАН України.

1.3 Обґрунтування проведення КЕ в умовах космічного простору

Створення різних ланок БСЖ для довготривалого перебування людини поза межами Землі потребує отримання інформації про стійкість вищих рослин до дії факторів космічного польоту, основними з яких є комбінована дія мікрогравітації та радіація на живі системи.

1.4 Опис КЕ (порядок проведення, вимоги до умов проведення, технічні особливості наукової апаратури)

Реалізація КЕ «Мікрокосм-М» на першому етапі включає два незалежні напрямки роботи – створення мікрокосму та створення гермоблоку – ростової камери для рослин. Після чого разом з випробовуваннями гермоблоку буде створений льотний зразок наносупутника PlantSat, що дозволить реалізувати КЕ



Рис. 1.4. Схема реалізації КЕ «Мікрокосм-М»

«Створення мікрокосму»

Робота полягає у адаптації технології вирощування рослин у замкнутих

гермооб'ємах до застосування її як дослідної екосистеми на наносупутниковій платформі для проведення космічного експерименту «Мікрокосм-М». Відомо, що не всі вищі рослини, особливо в асоціаціях, здатні рости у мікрокосмах. Тому планується знайти рослинну асоціацію, що тривалий час (більше 6 місяців) може співіснувати в умовах мікрокосму. В майбутньому КЕ планується експонування мікрокосму на орбіті до 3-х років. Крім того суттєві обмеження на видовий відбір накладає малий об'єм ростової камери наносупутника ($<1 \text{ дм}^3$) і означає, що рослинні об'єкти повинні бути невеликого розміру. Одним з кандидатів до мікрокосму є орхідея дорітіс, що здатна тривалий час (>13 років) рости в умовах мікрокосму та експонувалася у бортовій оранжереї «Малахит» в умовах мікрогравітації. До неї планується долучити ще 2 види вищих рослин. Найбільш цікавим моментом є те, що рослини будуть знаходитися в мікрокосмі у не стерильних умовах, тобто з часом відбудеться розвиток занесених ззовні мікроорганізмів і відбудеться формування певного стабільного біоценозу. Після завершення експерименту планується детальне дослідження їх видового та кількісного складу, факторів, що впливають на їх розвиток та виявлення серед них потенційних патогенів, які можуть становити загрозу вищим рослинам під час тривалого космічного польоту. Чистота експериментів з мікрокосмами полягає у забезпеченні їх герметичності протягом всього часу, а також підтриманні та постійному моніторингу температурного та світлового режиму.

«Створення гермоблоку»

Необхідні технічні характеристики гермоблоку для проведення КЕ:

1. Розміри гермоблоку 80x80x160 мм, вага не перевищить 2 кг
2. Непрозорі стінки гермоблоку для ізоляції від сонячного освітлення.
3. Система поглинання рідини з повітряної частини гермоблоку.
4. Температурний режим $18 \pm 1^\circ\text{C}$ з можливістю регулювання (за можливістю $14 - 24^\circ\text{C}$, можливий менший діапазон)
5. Освітлення зверху світлодіодне з інтенсивністю $200 \text{ мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($2 \text{ Вт}/0,0064 \text{ м}^2$: червоні світлодіоди 1,58 Вт, сині – 0,27 Вт, зелені – 0,16 Вт (10:1,6:1). Світловий період еквівалентний наземному (16 год день та 8 год ніч).

6. Вентилятор з захистом для забезпечення конвекції газів всередині гермоблоку на стінці повітряної частини гермоблоку (мала потужність мала кількість обертів)
7. Фотокамери: дві RGN та RGB камери (по 4 знімка на добу).
8. Датчик вологості ґрунту та повітря (4 виміри на добу)
9. Датчик CO_2 відкритого типу у повітряній частині гермоблоку (2 виміри/хв)
10. Датчик кисню (2 виміри/хв).
11. Датчик освітлення.
12. Датчик радіації.
13. Датчик тиску.

Зараз створено перший ескіз гермоблоку наносупутникового формату (2U) (рис. 1.5). Розробляється дизайн технічних вузлів гермоблоку.

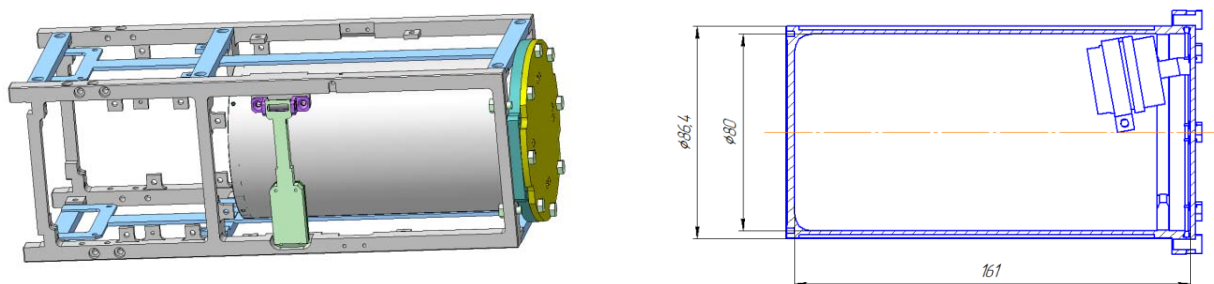


Рис. 1.5. Ескіз та креслення гермоблоку наносупутника PlantSat

«Моделювання КЕ».

Включає в себе тестування дослідного зразка гермоблоку, відпрацювання системи моніторингу стану рослин (датчики, камери). Буде створена база даних інформації, що надходить з гермоблоку, а саме зміни концентрації CO_2 , зміни рівня вологості субстрату, коливань температури, росту та просторової орієнтації рослин та скоректована кількість вимірів протягом доби. По завершенні експерименту буде проаналізовано дані про вплив замкнутого гермооб'єму на темпи росту рослин анатомію листків та ультраструктуру фотосинтетичного апарату, перебіг процесів фотосинтезу, розвиток мікроскопічних грибів та водоростей. За даними показниками буде сформовано уявлення про функціонування модельної екосистеми

мікрокосму в умовах стаціонарного контролю. На основі отриманої інформації будуть запропоновані методичні протоколи по проведенню КЕ «Мікрокосм-М»

«КЕ»

Реалізація даного етапу потребує наявності 3-х гермоблоків, один з яких буде експоновано на орбіті, інші два – лабораторний контроль. Старт лабораторного контролю повинен бути від термінований на 3 – 7 діб з метою відтворення в лабораторії параметрів гермоблоку (температура, освітлення) польотного варіанту. Зміна параметрів гермоблоку наземного контролю буде здійснюватися на основі даних телеметрії польотного варіанту досліду. Це надасть можливість з'ясувати вплив саме факторів космічного польоту. На основі отриманої інформації протягом КЕ будуть порівняння ростових характеристик рослин в космічному експерименті та наземному контролі: приріст біомаси, фотосинтезу та дихання, орієнтації вегетативних органів.

Попередній план проведення КЕ:

1. В лабораторних умовах рослини (молоді проростки) будуть висаджені в штучний субстрат (волокна), закріплені сіткою, щоб запобігти його розповсюдженню всередині гермоблоку. Субстрат буде зволожений поживним розчином. Паралельно до льотного зразка (0 g) буде висаджено рослини у лабораторний зразок гермоблоку, де будуть підтримуватися ті ж самі умови. Лабораторний зразок гермоблоку буде надавати інформацію про ростові характеристики у стаціонарному контролі (1 g)

2. Після вкорінення рослин (14 днів) гермоблок наносупутника буде герметизований та відправлений на стартовий майданчик. Весь час до старту буде працювати система освітлення та термостатування для підтримання життєдіяльності рослин всередині.

3. Після запуску буде проведена стабілізація наносупутника, щоб уникнути прискорень, що можуть бути викликані обертанням супутника.

Щодобово буде отримана інформація про стан рослин та показників середовища гермоблоку. Дані будуть вноситися до бази даних. Буде порівняно дані темпів росту рослин, стану фотосинтезу та дихання, розміщення вегетативних

органів рослин, циклічних змін газового складу середовища протягом всього часу експерименту між 1g та 0g варіантами експерименту.

1.5 Очікувані результати та їх використання

Запропонований нами космічний експеримент «Мікрокосм-М» що не має поки аналогів у світі, має на меті встановити потенційну тривалість життя рослин під дією факторів космічного польоту, а також відповісти на питання, чи збережеться екологічна рівновага між мікроорганізмами та вищими рослинами в екосистемі за тривалого перебування в умовах мікрогравітації? Технологія мікрокосмів (вирощування рослин у замкнутому гермооб'ємі), запропонований нами для космічного експерименту, за своєю суттю є замкненою штучною здатної до саморегуляції біосферою. Інформація про її стан протягом тривалого космічного експерименту може стати новою технологією у космічному рослинництві, а саме створення пасивної системи життєзабезпечення та/або прийомом для збереження життєздатності рослин на позаземних об'єктах за відсутності людини.

Для адаптації технології мікрокосмів до її використання на наносупутниках потрібно дослідити закономірності міжвидових взаємовідносин, що формуються в гермооб'ємах. В результаті дослідження стану різних рослинних угруповань протягом тривалого культивування в гермооб'ємах буде встановлена рослина асоціація, що найкраще адаптована до цих умов. Крім того буде підібрано оптимальні субстрати, кількісні та якісні характеристики поживного середовища.

Моделювання КЕ з використанням дослідного зразка гермоблоку нановупутника PlantSat дасть можливість відпрацювати хід майбутнього КЕ, а саме системи керування системою життєзабезпечення рослин, оптимального режиму отримання інформації про зміни складу газового середовища та вологості субстрату, систему моніторингу стану рослин. Буде створена база даних, необхідна для систематизації отриманої інформації.

Завдяки аналізу рослинного матеріалу, видового та кількісного складу мікроорганізмів буде з'ясовано особливості структурно-функціональної адаптації рослин до існування в закритій екологічній системі малого об'єму, ролі мікроорганізмів в формуванні біотичних взаємозв'язків з вищими рослинами, а також виявлено потенційно небезпечні види патогенних мікроорганізмів, що можуть розвиватися в замкнутому просторі. Будуть підготовані протоколи перед польотної підготовки гермоблоку з рослинними угрупованням та ходу КЕ.

Реалізація даного проекту дасть можливість вітчизняним науково-технічним установам реалізувати власні ідеї на практиці у КЕ, що сприятиме підвищення іміджу українських вчених на світовому рівні. Крім того, вдале проведення даного КЕ дасть можливість запропонувати створений супутник в якості платформи для проведення нових КЕ для зацікавлених дослідників. Оскільки проект присвячений питанням освоєння космосу, здійснення вітчизняного КЕ та відповідна популяризація його в ЗМІ може покращити громадську думку щодо стану наукової сфери в країні та сприяти ствердженню думки, що сфера наука є невід'ємною складовою прогресу і процвітання соціуму.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ НОВОЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ ТОКСИЧНОСТІ ПЛАНЕТАРНОГО ПИЛУ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ КОСМІЧНИХ МІСІЙ (КОНКУРС МОЛОДІЖНИХ ПРОЕКТІВ)

2.1 Актуальність та наукове обґрунтування завдань проекту

Позаземні пілотовані місії, які включають вихід у відкритий космос, вимагають оцінки ризику токсичності планетарного пилу. Показано, що частинки місячного ґрунту сорбуються на скафандрах і потрапляють всередину космічних кораблів [1, 2, 3].

Дослідження, що проводяться у рамках даного проекту, ґрунтуються на наших попередніх результатах. Робоча група має значний досвід роботи з частинками пилу. Нещодавно робочою групою у вперше показана відсутність значного нейротоксичного впливу місячного та марсіанського пилу (*Krisanova et al., Astrobiology, 2013*) та суттєві токсичні властивості суміші частинок марсіанського пилу та карбонових наночастинок (*Pozdnyakova et al., Microgravity Science and Technology, 2017*), вперше були відкриті нейротоксичні властивості карбонових точок (*Borisova et al., Int.J.Biochem.Cell.Biol, 2015*) та наноалмазів (*Pozdnyakova et al., J.Nanobiotechnology, 2016*), також виявлені певні нейротоксичні властивості наночастинок маґеміту $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (*Borisova et al., Beilstein J. Nanotechnol., 2014; Horak et al., Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2017*).

Мета роботи полягає у розробленні нової методології, алгоритму оцінки, а також відповідних моделей, які можуть передбачувати, прогнозувати та визначати біобезпеку частинок планетарного пилу у перспективних космічних місіях.

На основі проведених досліджень передбачається розроблення та створення макету (а згодом і польотного зразка) установки для експрес-аналізу токсичності пилу.

Завданнями даної роботи є:

1) Провести оцінку токсичності різних класів частинок, а саме, місячного та марсіанського пилу, якій включає неорганічні наночастинки (JSC-1a, Lunar Soil Simulant; JSC, Mars-1A, ORBITEC Orbital Technologies Corporation, Медісон, штат Вісконсин, США), до якого планується додати вуглецеві частинки різного типу гібридизації (наноалмази та вуглецеві нанорозмірні частинки), а також магнітні частинки, кристали рідкоземельних елементів. Для створення «предиктивних» моделей необхідними є знання щодо впливу розміру, форми, структури поверхні та наявності функціональних груп на поверхні мікро- та нанорозмірних частинок на їхню токсичність.

2) Провести оцінку токсичних ризиків для здоров'я від впливу симулянтів місячного та марсіанського пилу. Оцінку токсичних ризиків для здоров'я проведено відповідно до рекомендацій з оцінки ризику нейротоксичності (US Environmental Protection Agency, 1998 року, згідно пункту 3 Оцінка небезпеки: 3.1.2 Дослідження на тваринах; 3.1.2.3 Нейрохімічні наслідки нейротоксичності; 3.1.3.4. In vitro дані нейротоксикології).

3) Провести верифікацію даних, отриманих з використанням біохімічних методів (радіоізотопного аналізу транспорту нейромедіаторів у нервових терміналях, мембранного потенціалу нервових клітин та тромбоцитів, а також ацидифікації синаптичних везикул та секреторних гранул тромбоцитів), з даними, отриманими за використання електрофізіологічного обладнання «Пласка бішарова ліпідна мембрана» (вимірювання проникності, ємності бішарової ліпідної мембрани, а також змін поверхневого заряду бішарової мембрани за дії мікро- та нанорозмірних частинок до утворення іон провідних трансмембранних каналів).

4) Розробити методологію та алгоритм швидкого оцінювання токсичності частинок пилу за використання обладнання «Пласка бішарова ліпідна мембрана», та ввести, якщо потрібно, кореляційні показники.

5) Розробити технічні пропозиції щодо створення макету установки з експрес-аналізу токсичності пилу.

Верифікація експериментальних даних, методологія та алгоритм оцінювання

токсичного потенціалу частинок пилу створять базу для розроблення та оптимізації польотної космічної установки «Пласка бішарова ліпідна мембрана». Передбачається, що це обладнання буде використано у непілотованих та пілотованих космічних місіях. У обох випадках установка дозволить проводити моніторинг потенційної загрози з боку пилового оточення космічного апарату та частинок пилу, які згідно з даними літератури здатні сорбуватися на скафандрах і потрапляти всередину космічних кораблів. Також установка може бути використана для оцінки біобезпеки та ризиків використання пилу *in situ* в космічних технологіях.

– коротка історія та стан питання в даний час;

В результаті прямого контакту з частинками місячного пилу протягом декількох місій Apollo спостерігалось подразнення очей, дихальних шляхів та шкіри. В організмі ссавців, ультрадисперсні частинки можуть тривалий час зберігатись в носовій порожнині, бронхах та альвеолах за рахунок дифузії, і окрім перерозподілу між різними органами, транспортуються вздовж сенсорних аксонів нюхового нерва до центральної нервової системи [4–7]. Показано, що тверді ультрадисперсні частинки (<100 нм), введені інтраназально, після відкладення на слизовій оболонці носоглотки можуть транспортуватись у центральну нервову систему через нюховий нерв [4]. У щурів, приблизно 20% ультрадисперсних частинок, що осідають на слизовій оболонці, можуть переміщатися до нюхової цибулині мозку. Це може забезпечити шлях надходження ультрадисперсних частинок в ЦНС в обхід гемато-енцефалічного бар'єру. Наночастки TiO_2 були виявлені в мозку 6-тижневих мишей після підшкірного введення їх вагітним самкам. Було показано, що крім головного мозку ультрадисперсні частинки можуть відкладатися у печінці у межах від 4 до 24 годин після контакту [4–11]. Тверді частинки можуть потрапляти в клітини шляхом ендоцитозу. Проте припускають, що *in vitro* поглинання ультрадисперсних частинок в клітинах не відбувається за жодним з очікуваних типів ендоцитозу, а шляхом дифузії або адгезії. Ці частинки здатні проникати крізь клітинні мембрани в легенях і в культурі клітин, але не за рахунок фагоцитозу. У клітинах вони знаходяться у незв'язаній з мембраною формі і

можуть безпосередньо взаємодіяти з внутрішньоклітинними білками, органелами, і ДНК, що може значно підвищити їх токсичний потенціал [4–11]. Було продемонстровано, що місячний пил, а також тверді наночастинки є причиною запалення, яке, як відомо, може змінювати проникність гемато-енцефалічного бар'єру [4–11]. Нейротоксична дія марсіанського пилу може реалізовуватись через інгібування синтезу нейромедіатора, зміну потоку іонів через клітинні мембрани, блокування транспорту нейромедіаторів в нервових закінченнях головного мозку. В той же час механізми формування, склад і фізичні властивості планетарного пилу (у тому числі і марсіанського) та його вплив на здоров'я людини недостатньо охарактеризовані.

– обґрунтування проведення КЕ в умовах космічного простору;

Пілотовані позаземні місії та плани освоєння нових планет вимагають оцінки ризику токсичності планетарного пилу. Підготовка перспективних місій (особливо найближчі плани створення навколomisячної станції) вимагають якнайшвидшого розроблення методології експрес-аналізу токсичних компонентів оточуючого середовища.

Нещодавній *nanoSIMS*-аналіз вуглецю з Тісінтського марсіанського метеориту надав докази існування в минулому підземних органічних рідин на Марсі. Наявність органічних речовин, інкапсульованих у внутрішніх лакунах, наводить на думку, що вони утворилися ще до падіння, і це є надійним доказом їх марсіанського походження та відсутності земного забруднення. Ці органічні речовини можуть бути результатом осадження багатих на органіку рідин біля поверхні Марсу [12, 13]. Крім того, щодня на Землю падають тонни вуглецевих молекул в частинках пилу та в метеоритах.

З використанням модифікованого симулянту марсіанського пилу, що містив наноалмази чи карбонові точки, ми показали значне зниження початкової швидкості накопичення та акумуляції, а також зростання позаклітинного рівня L-[¹⁴C]глутамата та [³H]ГАМК в нервових терміналях. Таким чином, карбонвмісний симулянт марсіанського пилу значною мірою впливає на ключові характеристики

збуджуючої та інгібіторної нейропередачі, що призводить до порушення балансу між збуджуючими/інгібіторними сигналами. Неорганічний компонент симулянта марсіанського пилу, обробленого ультразвуком, що містив мінорну фракцію наночастинок розміром 50-60 нм, майже не впливав на захват та позаклітинний рівень обох нейромедіаторів в нервових терміналях. Було показано що ефект вуглецевмісного симулянта марсіанського пилу зумовлений переважно його вуглецевою, а не неорганічною складовою. Раніше було показано, що симулянт марсіанського пилу не спричинює змін мембранного потенціалу. В той же час, карбонові точки та наноалмази здатні змінювати мембранний потенціал синапсом, отже було зроблено припущення, що порушення транспорту нейромедіаторів, спричинені симулянтом марсіанського пилу, що містив наноалмази або карбонові точки, можуть бути спричинені хоча б частково деполяризацією мембрани. Наші попередні дані щодо спільного впливу марсіанського пилу та наноалмазів на мембранний потенціал синапсом показали, що попередня обробка синапсом симулянтом марсіанського пилу не впливає на здатність наноалмазів викликати деполяризацію мембрани. Таким чином, збагачення неорганічного симулянта марсіанського пилу карбовоними компонентами призводить до виникнення нейротоксичності. З іншого боку було показано, що неорганічний компонент, а саме симулянт марсіанського пилу, в суспензії карбовоних наночастинок (наноалмази або карбонові точки) не змінює негативний вплив останніх на глутамат- та ГАМКергічну нейротрансмісію.

Здатність вуглецевмісного симулянта марсіанського пилу зменшувати початкову швидкість транспортер залежного накопичення глутамату та ГАМК, що спричинює значне зростання позаклітинного рівня обох нейромедіаторів, може розглядатися як ключовий фактор, що зумовлює розвиток нейрологічних порушень. Певна концентрація позаклітинного глутамату та ГАМК врівноважує процеси збудження та інгібування в нейропередачі, а викликане симулянтом зростання позаклітинного рівня обох нейромедіаторів може викликати порушення такої рівноваги. Неясно, який тип взаємодії відбувається між частинками симулянта марсіанського пилу та плазматичною мембраною нервових закінчень без зміни

мембранного потенціалу та цілісності мембрани, який в той же час підвищує зв'язування глутамату. Крім гравітації, стрес, УФ та радіація в умовах *in situ* можуть посилити шкідливу дію ґрунту на організм ссавців. Контакт з частинками ґрунту викликає подразнення, запалення. Було чітко продемонстровано, що місячний пил, а також тверді наночастинки викликають запалення [4–11]. Обробка альвеолярних макрофагів симулянтами місячного та марсіанського ґрунту показала дозо-залежне підвищення цитотоксичності, викликані пошкодженням переважно субпопуляції клітин супресорів, що загалом призводить до збільшення співвідношення кількості активаторів (RFD1+) та супресорів (RFD1+7+). Помітного збільшення відсотка нейтрофілів не спостерігалось в жодній з груп, через 4 години після обробки симулянтом ґрунту, але виявлялось у всіх оброблених групах після 24 год. Це спостереження вказує на те, що пил не володіє гострою токсичністю, а ефект був поступовим, для нейтрофілів потрібен деякий час для спрямування та накопичення в легенях [4–11]. Lam і співавт. [14] прийшли до висновку, що гострі наслідки дії ґрунту в легенях вказують на те, що місячний пил є більш токсичним, ніж TiO_2 , а ефект марсіанського ґрунту можна порівняти з кварцом. У довгострокових місіях очевидне збільшення тривалості впливу планетарного пилу. Lam і співавт. [6, 7] показали, що при збільшенні тривалості знаходження симулянтів місячного та марсіанського ґрунту в легенях від 7 до 90 днів гострі запальні реакції переходять у хронічне запальне ураження. Ушкодження легень були більш тяжкими при попередній обробці симулянтів ґрунту озоном. Вплив озону на симулянт місячного ґрунту був неадитивним [14]. За умов мікрогравітації: 1) відкладення в легенях людини частинок діаметром 1 мкм не зменшувалось, 2) функції макрофагів, у тому числі процес фагоцитозу, були пригнічені, 3) реакції запалення в легенях змінювались. За умов мікрогравітації ризик вдихання ґрунту збільшений за рахунок меншого осідання частинок. Частинки, що вдихаються, відкладаються в легенях і можуть зберігатись там протягом тривалого часу. Вдихання частинок різного розміру може негативно впливати на дихальну і серцево-судинну систему, внаслідок запалення дихальних шляхів. Запропоновано кілька сигнальних механізмів, які можуть брати участь у реакціях запалення і пов'язані з цитотоксичністю ґрунту.

Дослідження залежності концентрація-ефект симулянтів місячного ґрунту було проведено на лінії мишачих макрофагів mRAW 264.7. Результати показали, що симулянт місячного ґрунту в концентрації 50-2000 мкг/мл викликає підвищення експресії індукцибельної NO-синтази [4–14].

Узагалі, наші власні дослідження були зосереджені на аналізі комбінованого впливу комплексів наноалмази-марсіанський пил та карбонові нанодоти-марсіанський пил на Na^+ -залежне поглинання глутамату та ГАМК, яке є одним з найважливіших характеристик глутамат- та ГАМК-ергічної передачі. Додавання комплексів наноалмази-марсіанський пил та карбонові нанодоти-марсіанський пил до синапсом призводило до зменшення інтенсивності поглинання глутамату та ГАМК нервовими терміналами головного мозку. Найбільш важливим є те, що карбонова компонента нативного марсіанської пилу може мати шкідливий вплив на позаклітинний гомеостаз нейромедіаторів в ЦНС, і токсична дія карбонових структур у складі марсіанського пилу може бути значно більшою у порівнянні з його неорганічної компонентою.

Таким чином, нами створена методика виготовлення вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу та проведена оцінка його токсичного ефекту на організм людини, зокрема на нервову систему. Показано, що нейротоксичність вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу пов'язана виключно з його вуглецевим компонентом, при цьому неорганічна складова пилу залишається інертною.

Ця методика буде використана для створення зразків для подальшого тестування на електрофізіологічному устаткуванні, що плануються для проведення космічних експериментів.

2.2 Опис КЕ (порядок проведення, вимоги до умов проведення, технічні особливості наукової апаратури)

Технічні пропозиції для створення установки «Пласка бішарова ліпідна мембрана» для оцінювання токсичності планетарного пилу базуватимуться на наступних даних попередньої роботи.

Обладнання «Пласка бішарова ліпідна мембрана» для вимірів трансмембранного струму надано і встановлено власником фірми Eastern Scientific LLC, Rockville, США. Для вимірів провідності мембрани використовують підсилювач струму BBA-02 (Eastern Scientific, LLC, Rockville, США) та два хлор-срібляних електрода (Warner Instruments Inc., США) або EAG-2 (Eastern Scientific, LLC, Rockville, США) занурені в розчин 2 М КСl з агаровими містками, розміщеними з різних боків БЛМ. Базовий водно-сольовий розчин, що оточує мембрану, містить 10 мМ Трис-НСl (рН 6 або 4,8) („Sigma”, США) і необхідну кількість хлоридів металів КСl („Sigma-Aldrich”, Германия), NaCl (USB, Cleveland, США), CaCl₂, CsCl, LiCl („Sigma-Aldrich”, Германия). Трансмембранний струм реєструють підсилювачем струму та фільтрують записи струму при полосі пропускання 0,1 кГц. Запис мікро- та макроскопічного струмів здійснюють самописом або комп’ютером за допомогою аналого-цифрового перетворювача ADA-1210 (Eastern Scientific, LLC, Rockville, США), сполученого з комп’ютером і підсилювачем струму за допомогою спеціального програмного забезпечення (Cole-Palmer Instrument Company, Illinois, США).

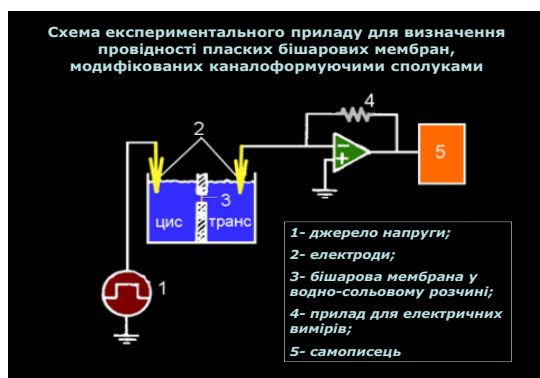


Рис. 2.1

Одним з виконавців проекту є д.б.н.Шатурський О.Я., відомий фахівець

міжнародного рівня щодо роботи на обладнанні «Пласка бішарова ліпідна мембрана», яке знаходиться у відділі нейрохімії інституту. Виконавцями проекту є 6 молодих вчених під керівництвом завідуючого відділом нейрохімії Інституту біохімії ім. О.В. Палладіна НАН України та студенти кафедри біохімії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Науковий колектив цього проекту та інститут у цілому мають необхідний науковий досвід (відображений у наведених публікаціях), моделі та обладнання для виконання наземної частини експериментів в рамках даного проекту. Виконавцями проекту опубліковано більш ніж 10 статей у фахових міжнародних журналах космічного напрямку. Також автори проекту мають дві спільні статті у міжнародних виданнях з німецькими колегами, науковими партнерами даного проекту (Dunne et al., 2010; Krisanova et al., *Astrobiology*, 2013, Pozdnyakova et al., *Microgravity Science and Technology*, 2017 (див. публікації).

Інститут біохімії ім. О.В. Палладіна НАН України має усе необхідне обладнання для виконання запланованих досліджень: лабораторна центрифуга, настільна центрифуга Eppendorf Centrifuge 5415 C (США), ультрацентрифуга Beckman, холодильники, морозильна камера, лічильник радіоактивності Tracor Analytic Delta 300, спектрофлуориметр Hitachi, pH-метр Mettler Toledo MP 220 (США), ваги WT (Польща), Denver Instrument company XD-100A, термостат Unipan, (Польща), U-10 (Германия), дозатори Gilson Pipetman (Франція), протоковий цитофлуориметр COULTER® EPICSTM XLTM, лазерний конфокальний мікроскоп LSM 510 META, Carl Zeiss, фотонний кореляційний спектрометр.

2.3 Очікувані результати та їх використання

Даний проект є інноваційним і перспективним, він ґрунтується на результатах наших попередніх досліджень. Результати, які будуть отримані при реалізації цього проекту, а саме з'ясування механізмів взаємодії неорганічних наночастинок з

клітинами буде основою для розробки нових нанотехнологічних підходів не тільки у космічній біотехнології, але й нанонейротехнології. Ці дані будуть мати високу практичну значимість, та будуть патентоспроможними.

Характеристика науково-технічної продукції, яку буде створено

1. Буде проведена оцінка токсичності різних класів частинок, а саме, місячного та марсіанського пилу, якій включає неорганічні наночастинки (JSC-1a, Lunar Soil Simulant; JSC, Mars-1A, ORBITEC Orbital Technologies Corporation, Медисон, штат Вісконсин, США), до якого планується додати вуглецеві частинки різного типу гібридизації (наноалмази та вуглецеві нанорозмірні частинки), а також магнітні частинки, кристали рідкоземельних елементів. Для створення «предиктивних» моделей необхідними є знання щодо впливу розміру, форми, структури поверхні та наявності функціональних груп на поверхні мікро- та нанорозмірних частинок на їхню токсичність.
2. Буде проведена верифікація даних, отриманих з використанням біохімічних методів (радіоізотопного аналізу транспорту нейромедіаторів у нервових терміналях, мембранного потенціалу нервових клітин та тромбоцитів, а також ацидифікації синаптичних везикул та секреторних гранул тромбоцитів), з даними, отриманими за використання обладнання «Пласка бішарова ліпідна мембрана» (вимірювання проникності, ємності бішарової ліпідної мембрани, а також змін поверхневого заряду бішарової мембрани за дії мікро- та нанорозмірних частинок до утворення іон провідних трансмембранних каналів).
3. Буде розроблена методологія та алгоритм швидкого оцінювання токсичності частинок пилу за використання обладнання «Пласка бішарова ліпідна мембрана», та ввести, якщо потрібно, кореляційні показники.
4. Будуть розроблені технічні пропозиції щодо створення макету установки з експрес-аналізу токсичності пилу.

Розроблення запропонованої методології для довгострокових космічних місій буде значним внеском в позицію України як потужної космічної Держави з значним науковим потенціалом.

Проект передбачає співпрацю з іноземними колегами, разом з якими

плануються подальші космічні дослідження, Prof. K. Slenzka, завідуючим відділу наук про життя OHB Corporation, Bremen, Germany, та Др. Річардом Боуле, Директором Біотехнологічного Центру Національного управління з авіації і дослідження космічного простору.

2.4 Обґрунтування технічної можливості створення експериментального обладнання

У 2018 р. в рамках даного проекту проведена аналітична робота по узагальненню власних експериментальних даних та даних літератури. Результати цієї аналітичної роботи опубліковані у престижному міжнародному виданні з імпакт фактором 3,5:

T.Borisova Nervous system injury in response to contact with environmental, engineered and planetary micro- and nano-sized particles. *Frontiers in Physiology*, 2018, doi: 10.3389/fphys.2018.00728

Також у 2018 році опрацьовано біосенсор для вимірювання транспорту глутамату.

Результати роботи за 2018 рік, що проведені у рамках проекту, опубліковані у журналі *Космічна наука і технологія*:

Борисова Т.О., Крисанова Н.В., Позднякова Н.Г., Пастухов А.О., Борисов А.А., Дударенко М.В., Палієнко К.О., Шатурський О.Я. Розроблення нової універсальної методики оцінювання токсичності планетарного пилу для перспективних космічних місій // *Космічна наука і технологія*. – 2018. – Т. 24, № 6.

У цілому, обґрунтування необхідності та технічної можливості виконання космічного експерименту викладено у публікаціях виконавців проекту (в реферованих журналах) за темою проекту за останні три роки:

- 1) Pozdnyakova N., Pastukhov A., Dudarenko M., Borysov A., Krisanova N., Nazarova A. Borisova T. Enrichment of inorganic Martian dust simulant with carbon component can provoke neurotoxicity. *Microgravity Sci. Technol.*, 2017, 29: 133–144.
- 2) Horák D, Beneš M, Procházková Z, Trchová M, Borysov A, Pastukhov A, Paliienko K, Borisova T. Effect of O-methyl- β -cyclodextrin-modified magnetic nanoparticles on the uptake and extracellular level of l-glutamate in brain nerve terminals. *Colloids Surf B Biointerfaces*. -2017- 149:P.64-71 (IF – 4.3)
- 3) Pozdnyakova N, Pastukhov A, Dudarenko M, Galkin M, Borysov A, Borisova T. Neuroactivity of detonation nanodiamonds: dose-dependent changes in transporter-mediated uptake and ambient level of excitatory/inhibitory neurotransmitters in brain nerve terminals. *J Nanobiotechnol*. 2016; 14:25. DOI 10.1186/s12951-016-0176-y. (IF - 4.24)
- 4) Borisova T, Dekaliuk M, Pozdnyakova N, Pastukhov A, Dudarenko M, Borysov A, Vari SG, Demchenko AP. Harmful impact on presynaptic glutamate and GABA transport by carbon dots synthesized from sulfur-containing carbohydrate precursor. *Environ Sci Pollut Res.*, 2017, 24(21):17688-17700.
- 5) Sojka B, Kociolek D, Banski M, Borisova T, Pozdnyakova N, Pastukhov A, Borysov A, Dudarenko M, Podhorodecki A. Effects of surface functionalization of hydrophilic NaYF₄ nanocrystals doped with Eu³⁺ on glutamate and GABA transport in brain synaptosomes. *J Nanopart Res*. 2017;19(8):275.
- 6) Borisova T., Sojka B., Kociolek D., Banski M., Pozdnyakova N., Pastukhov A., Malysheva M., Borysov A., Dudarenko M., Podhorodecki A. Hydrophilic NaYF₄ nanocrystals doped with Eu³⁺: Effects of surface functionalization on glutamate and GABA transport in brain nerve terminals // *TechConnect Briefs, Advanced Materials*. - 2017. - Vol. 1. - P.130 – 133.
- 7) Borisova T., Dekaliuk M., Pozdnyakova N., Pastukhov A., Dudarenko M., Galkin M., Borysov A., Vari, S.G. Demchenko A.P. Neuroactive Carbon Dots: Perspective Neurotheranostic Agents and Harmful Environmental Pollutant // *TechConnect Briefs, Advanced Materials*. - 2017. - Vol. 1. - P. 337 – 340.

- 8) Пастухов А. О., Дударенко М. В., Галкін М. О., Крисанова Н. В., Назарова А. Г., Позднякова Н. Г., Борисова Т. О. Створення вуглецевовмісного аналогу марсіанського пилу та оцінка його впливу на транспорт нейромедіаторів нервовими терміналами головного мозку щурів // Космічна наука і технологія. – 2017. – Т. 23. – № 2. – с.32- 40.
- 9) Galkin M. A., Chunihin O. Yu., Pastukhov A. O., Sivko R. V., Leshchenko O. V., Bochechka O. O., Pozdnyakova N. G, Borisova T. O. Comparative study of the effects of detonation nanodiamonds with varied properties on functional state of brain nerve terminals // *Biotechnologia Acta.* - 2016- Vol. 9. - Issue 6. - P. 28-38.
- 10) Д. Ю. Кучеренко, І. С. Кучеренко, Д. В. Седюко, Д. В. Книжникова, О. О. Солдаткін, А. А. Борисов, А. Г. Назарова, Н. В. Крисанова, Т. О. Борисова, О. П. Солдаткін Оптимізація амперометричного біосенсора для оцінки швидкості накопичення глутамату ізольованими нервовими терміналами мозку. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies* 2016 – Т. 13, № 1 – С.98-113.
- 11) T. Borisova, A. Nazarova, M. Dekaliuk, N. Krisanova, N. Pozdnyakova, A. Borysov, R. Sivko, A.P. Demchenko Neuromodulatory properties of fluorescent carbon dots: effect on exocytotic release, uptake and ambient level of glutamate and GABA in brain nerve terminals. *Int.J. Biochem.Cell Biol.* – 2015.-V.59-P.203-215. (IF - 4.172)
- 12) O. Soldatkin, A. Nazarova, N. Krisanova, A. Borysov, D. Kucherenko, I. Kucherenko, N. Pozdnyakova, A. Soldatkina, T. Borisova Monitoring of the velocity of high-affinity glutamate uptake by isolated brain nerve terminals using amperometric glutamate biosensor *Talanta* -2015-V 135.-P. 67–74. (IF - 3.749)
- 13) Д. Ю. Кучеренко, І. С. Кучеренко, О. О. Солдаткін, Т. О. Борисова, В.Дзядевич, О. П. Солдаткін Розробка амперметричного біосенсора для визначення глутамату *Sensor Electronics and Microsystem Technologies* 2015 – Т. 12, № 1, С.79-88.
- 146) А. Г. Назарова, Н. Г. Позднякова, О. О. Воронова, О. Ю. Чуніхін, М. В. Піскова, А. О. Пастухов, А. А. Борисов, Н. В. Крисанова, Т. О. Борисова Оцінка біомодуляторних властивостей та нейротоксичності аналогу місячного ґрунту. *Космічна наука і технологія.* 2015. Т. 21. № 4 С.103-111.

15) Shatursky OY, Kasatkina LA, Rodik RV, Cherenok SO, Shkrabak AA, Veklich TO, Borisova TA, Kosterin SO, Kalchenko VI. Anion carrier formation by calix[4]arene-bis-hydroxymethylphosphonic acid in bilayer membranes. *Org Biomol Chem*. 2014-12(48)-P. 9811-21.

16)Krisanova N., Kasatkina L, Sivko R, Borysov A, Nazarova A, Slenzka K, Borisova T. Neurotoxic potential of lunar and martian dust: influence on em, proton gradient, active transport, and binding of glutamate in rat brain nerve terminals. *Astrobiology*, - 2013. – Vol.13, № 8. - P. 679-692.

Відповідні авторські свідоцтва та патенти також містять обґрунтування необхідності та технічної можливості виконання космічного експерименту:

1) Салих К.К., Кучеренко Д.Ю., Борисова Т.О., Солдаткін О.О., Буржу А.К., Кучеренко І.С., Крисанова Н.В., Берна О.К., Солдаткін О.П., Дзядевич С.В., Борисов А.А. Амперометричний біосенсор для визначення глутамату, який складається з платинового дискового електроду та нанесених на електрод двох мембран цеолітної та ферментної на основі глутаматоксидази, робоча область біосенсора знаходиться у робочій комірці для досліджуваного розчину, в яку встановлені також допоміжний електрод та електрод порівняння, а виходи електродів і біосенсора під'єднані до потенціостату, виходи якого підключені до відповідних входів комп'ютера. патент України на корисну модель, № u 2015 02750; заявл. 26.03.15 МПК (2015.01)G01N 33/00, G01N 27/00; заявник та патентовласник Інст. мол.біології та генетики.

2) Заявка на корисну модель № u201606902, МПК (2016.01) C01B 31/06, A61K 9/14, A61K 49/00, G01N 33/483. Наноалмази, отримані методом детонаційного синтезу, що викликають збільшення позаклітинного рівня глутамату і гамма-аміномасляної кислоти в препараті нервових терміналей головного мозку щурів / Борисова Т.О., Позднякова Н.Г., Пастухов А.О., М.В. Дударенко, М.О. Галкін, А.А.Борисов, О.В. Лещенко, Г.Д.Ільницька. Заявники та патентовласники Інститут біохімії ім. О.В.Палладіна НАН України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. – заявл. 24.06.2016.

3) Заявка на корисну модель № u201606903, МПК (2016.01) C01B 31/06, A61K 9/14, A61K 49/00, G01N 33/483. Наноалмази, отримані методом детонаційного синтезу, що викликають зниження транспортер-залежного накопичення глутамату і гамма-аміномасляної кислоти (ГАМК) нервовими терміналами головного мозку щурів / Борисова Т.О., Позднякова Н.Г., Пастухов А.О., М.В. Дударенко, М.О. Галкін, А.А.Борисов, О.В. Лещенко, Г.Д.Ільницька. Заявники та патентовласники Інститут біохімії ім. О.В.Палладіна НАН України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. – заявл. 24.06.2016.

4) Заявка на корисну модель № u201606904, МПК (2016.01) C01B 31/06, A61K 9/14, A61K 49/00, G01N 33/483. Наноалмази, отримані методом детонаційного синтезу, що викликають дисипацію протонного градієнту синаптичних везикул у нервових терміналах головного мозку щурів / Борисова Т.О., Позднякова Н.Г., Пастухов А.О., М.В. Дударенко, М.О. Галкін, А.А.Борисов, О.В. Лещенко, Г.Д.Ільницька. Заявники та патентовласники Інститут біохімії ім. О.В.Палладіна НАН України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. – заявл. 24.06.2016.

Заявка на корисну модель № u201606905, МПК (2016.01) C01B 31/06, A61K 9/14, A61K 49/00, G01N 33/483. Наноалмази, отримані методом детонаційного синтезу, що викликають деполяризацію плазматичної мембрани нервових терміналей головного мозку щурів / Борисова Т.О., Позднякова Н.Г., Пастухов А.О., Дударенко М.В., Галкін М.О., А.А.Борисов, О.В. Лещенко, Г.Д.Ільницька. Заявники та патентовласники Інститут біохімії ім. О.В.Палладіна НАН України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. – заявл. 24.06.2016.

2.5 Розробка Технічної пропозиції з наукової апаратури (ГОСТ 2.118-2013) – в узгодженому обсязі

Методи, що використовуються у даній роботі для верифікації даних біологічних експериментів в умовах лабораторії з даними електрофізіологічної

установки, яка планується для проведення космічного експерименту.

2.5.1 Матеріали

В роботі були використані наступні матеріали та реактиви: HEPES, (N-2-hydroxyethylpiperazine-n-2-ethanesulfonic acid), «Fluka» (Швейцарія); EDTA, «Calbiochem» (США); фіколл-400, амінооксиоцтова кислота, фільтри GF/C Whatman, «Sigma» (США); [^3H]ГАМК (γ -[2,3- ^3H (N)]-аміномасляна кислота), «Perkin Elmer» (США); L-[^{14}C]глутамат, сцинтиляційні рідини OCS, ACS «Amersham», (Велика Британія); інші реактиви категорії х.ч. та ос.ч. були вітчизняного виробництва («Реахім», Україна). Симулянт марсіанського ґрунту JSC (Orbites, Orbital Technologies Corporation, Медісон, штат Вісконсин, США).

2.5.2 Етичні норми

Всі експерименти були виконані згідно “Правил проведення робіт з використанням експериментальних тварин”, затверджених Комісією з догляду, утримання й використання експериментальних тварин Інституту біохімії ім. О.В. Палладіна НАН України (Протокол №1 від 19 / 09-2012).

Дослідження проводили на білих щурах-самцях лінії Wistar. Щурів утримували на стандартному раціоні віварію.

2.5.3 Синтез карбонових точок

К-точки виготовляли за методом, який найчастіше використовується для мікрохвильової обробки гістидину. 0,5 г бета-аланіну розчиняли в 2 мл дистильованої води у відкритому посуді і обробляли в мікрохвильовій печі (600 Вт, 1,5 хв). Отриманий матеріал розводили дистильованою водою і піддавали декількократному центрифугуванню (10 хв $\times$ 5000 г) зі збором супернатанта. Щоб отримати точну концентрацію частинок, супернатант висушували для досягнення постійної ваги, після чого готували препарат К-точок з концентрацією 7 мг/мл для проведення подальших експериментів. За літературними даними структура водорозчинних К-точок характеризується неорганічним вуглецевим ядром у вигляді sp^2 гібридизованих графенових острівців з включенням алмазоподібних sp^3 гібридизованих елементів. Оболонка представлена аморфним вуглецем та кисневовмісними полярними групами (карбоксили, карбоніли і гідроксили). Також на поверхні можуть знаходитись азотвмісні групи, які представлені $-NH_2$ та ароматичними амінами, включеними у пірольні кільця.

Отримані К-точки контролювались за спектрами поглинання (спектрофотометр «Perkin Elmer Lambda-bio»), а також за спектрами збудження та емісії (спектрофлуориметр QuantaMaster 40 (PTI, Canada). Квантовий вихід флуоресценції ϕ -синтезованих карбонових точок розраховувався традиційним способом за допомогою сульфату хініну як стандарту з $\phi = 0,55$.

2.5.4 Виділення синаптосом з головного мозку щурів

Синаптосоми виділяли за методом Котмана [15] із незначними модифікаціями. У декапітованих тварин брали великі півкулі головного мозку, відокремлюючи стовбурову частину та мозочок. Моторну зону кори, гіпокамп і таламус швидко

виділяли під мікроскопом. Для отримання фракції синапсом готували 20% гомогенат, використовуючи скляний гомогенізатор Поттера (зазор 0.2мм). Середовище виділення містило 0.32М сахарози, 5мМ HEPES-NaOH pH 7.4, 0.2мМ EDTA. Гомогенат центрифугували при 2,500g 5хв для відокремлення ядер, кровоносних судин, зруйнованих нервових клітин. Надосадову фракцію центрифугували при 15000 g протягом 12 хв, осаджуючи фракцію неочищених синапсом – P2-фракцію. Для одержання очищеної фракції синапсом попередньо одержаний осад ресуспендували у середовищі виділення та наносили на градієнт фіколлу, який містив 13%, 6%, 4% фіколл, приготований на середовищі виділення, і центрифугували при 70,000g 45 хв на бакет-роторі. Фракцію синапсом, що отримували в інтерфазі між 13% і 6% розчинами фіколлу, збирали, розводили середовищем виділення 1:4 та центрифугували при 15,000g 20хв. Одержаний осад суспендували в стандартному сольовому розчині, який містив (в mM): NaCl, 126; KCl, 5; CaCl₂, 2; MgCl₂, 1.4; NaH₂PO₄, 1.0; HEPES-NaOH, 20, pH 7.4; D-glucose, 10. Всі операції проводили при 0-4°C. Всі розчини, які використовували в операціях виділення синапсом та подальшого дослідження процесів вивільнення нейромедіатору постійно насичалися киснем. Концентрацію протеїну визначали за методом Ларсона [23].

2.5.5 Визначення накопичення L-[¹⁴C]глутамату синапсом

Накопичення L-[¹⁴C]глутамату синапсом визначали наступним чином: зразки суспензії з концентрацією протеїну 250 мкг/мл преінкубували 8 хв. при 37°C, потім додавали симулянти марсіанського пилу та інкубували 2 хв. Реакцію ініціювали додаванням суміші L-глутамату та L-[¹⁴C]глутамату (0,1 мкКи/мл 251 мКи/ммоль), та інкубували при 37°C. Аліквоти відбирали через 1-10 хв, а потім швидко осаджували в мікроцентрифузі «Eppendorf» (20с при 10 000 g). Захват визначали в аліквотах надосаду (100 мкл) та солюбілізованого в SDS осаду на

сцинтиляційному лічильнику Tracor Analytic Delta 300 з сцинтиляційною сумішшю ACS (aqueous counting scintillate– сцинтиляційна рідина для водних зразків) (1,5 мл).

Кількість поглинутого синаптосомами глутамату визначали, використовуючи данні по активності міченого препарату (251 мКи/ммоль).

Для визначення неспецифічного зв'язування мітки синаптосоми синаптосоми інкубували з L-[^{14}C]глутаматом при 0°C. При розрахунках активного накопичення глутамату значення неспецифічного зв'язування віднімалось від отриманих даних.

2.5.6 Визначення вивільнення глутамату з синаптосом

Суспензія синаптосом розводилася стандартним сольовим розчином так, що містила 1 мг протеїну/мл, і після 10 хв преінкубації при 37°C навантажувалася L-[^{14}C]глутаматом (500 нМ, 238 мCi/ммол) в кальцієвому стандартному сольовому розчині упродовж 10 хв. Після цього суспензія синаптосом відмивалася 10-ма об'ємами стандартного сольового розчину і розводилася до концентрації 1мг протеїну/мл і відразу використовувалася для визначення вивільнення L-[^{14}C]глутамату з синаптосом.

Аліквоти (120 мкл; 25-30 мкг навантажених L-[^{14}C]глутаматом синаптосом), преінкубували 8 хв. при 37°C, потім додавали симулянти марсіанського ґрунту та інкубували 2 хв. Нестимульоване вивільнення L-[^{14}C]глутамату з синаптосом у безкальцієвому середовищі визначали за 6 хв. Суспензію синаптосом швидко осаджували в мікроцентрифугу, та центрифугували при 10000 g протягом 20 с. Аліквоти надосаду (90 мкл) та солубілізованого додецилсульфатом натрію осаду (90 мкл) змішували з сцинтиляційною рідиною ACS (Amersham, Великобританія) (1,5 мл) та визначали радіоактивність за допомогою сцинтиляційного лічильника Tracor Analytic Delta 300 (США). Загальний вміст радіоактивності визначали як суму радіоактивності у аліквоті надосаду та у аліквоті солубілізованого осаду.

2.5.7 Визначення вивільнення [^3H]ГАМК з синапсом.

Синаптосоми (2мг протеїну/мл) в оксигенованому стандартному сольовому розчині, який містив 10 мкМ амінооксиоцтової кислоти, інкубували 5 хвилин при 37°C в присутності $5 \times 10^{-7}\text{M}$ (0,1 Кі/мл) [^3H]ГАМК. Після охолодження на льоду, суспензію втричі розводили охолодженим сольовим розчином і центрифугували при 4000g 5 хвилин. Осад суспендували при температурі 4°C і концентрації протеїну 1 мг/мл в сольовому розчині, який містив 10мкМ амінооксиоцтової кислоти. Синаптосоми, що акумулювали [^3H]ГАМК (1 мг протеїну/мл), негайно використовували для вивчення процесів вивільнення ГАМК. Синаптосоми (120мкл суспензії) преінкубували 8 хв. при 37°C, потім додавали симулянти марсіанського пилу та інкубували 2 хв. Зразки інкубували 5 хв., після чого центрифугували у мікроцентрифузі Eppendorf (10,000×g, 20 s). Рівень радіоактивності вивільненої [^3H]ГАМК в аліквотах супернатанту (90мкл) вимірювали в лічильнику Delta 300 (“Tracor Analytic”, США) з використанням сцинтиляційної рідини ACS (1мл на 1аліквоту). Вміст міченої ГАМК у супернатантах був виражений у відсотках від загального вмісту [^3H]ГАМК в синаптосомах.

2.5.8 Визначення накопичення [^3H]ГАМК синаптосомами

В дослідях з акумуляції [^3H]ГАМК синаптосомами стандартний сольовий розчин містив 100мкМ амінооксиоцтової кислоти, інгібітора ГАМК-трансамінази, для запобігання утворення метаболітів ГАМК. Концентрація протеїну синаптосом в пробі дорівнювала 200мкг/мл, об'єм проби дорівнював 0,6мл. Синаптосоми преінкубували при 37°C 5 хв. з симулянтами марсіанського пилу, після чого ініціювали процес акумуляції внесенням суміші ГАМК (1мкМ ГАМК та 50nM - 0,2 мкКі/мл [^3H]ГАМК). Через 1 та 5хв аліквоти (0,5мл) фільтрували через GF/C

фільтри. Фільтри двічі промивали охолодженим стандартним сольовим розчином, висушували та вимірювали рівень радіоактивності у сцинтиляційній рідині OCS в лічильнику Delta 300 ("Tracor Analytic", США).

2.5.9 Аналіз препаратів синапсом та симулянтів місячного та марсіанського ґрунту за допомогою фотонної кореляційної спектроскопії

Розмір частинок симулянтів марсіанського пилу, а також синапсом оцінювали на лазерному кореляційному спектрометрі "Zetasizer-3" (Malvern Instrument, UK), який оснащений гелій-неоновим лазером LGN-111 ($P = 25$ мВт, $\lambda = 633$ нм). Діапазон приладу складає від 1 нм до 50 мкм. 1 мл суспензії синапсом або симулянту в циліндричній кварцовій кюветі, 10 мм в діаметрі, знаходиться в лунці спектрометру з підтриманням постійної температури. Реєстрація та обробка сигналу від динамічно розсіяного світла (під кутом 90°) від суспензії частинок, виконується протягом 120 с при $+22^\circ\text{C}$. Результати вимірювань обробляються за допомогою комп'ютерною програми PCS-Size mode v1.61. Спектрометр обладнаний корелятором типу 7032 CE.

2.5.10 Статистичний аналіз даних

Результати представлені як середнє $\pm$ S.E.M. в n незалежних експериментах. Різниця між двома групами порівнювали за допомогою двостороннього тесту Стюдента. Різниця вважалася значущою при $P \leq 0,05$. Статистична обробка даних, побудова графіків і розрахунки функцій проводили з використанням програми Excel.

РОЗДІЛ 3

КОСМІЧНИЙ ПРОЕКТ «КЛАСТЕРІОН»: ВИВЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ІОНОСФЕРІ З ВИКОРИСТАННЯМ КЛАСТЕРА СУПУТНИКІВ YUZH SAT (КОНКУРС ПРОЕКТІВ YUZH SAT)

3.1 Вступ

Метою виконання даної НДР є обґрунтування можливості і доцільності реалізації масштабного наукового проекту в області геокосмічних досліджень – проекту «КластерІон». Проект задуманий як відповідь на виклики, поставлені, з одного боку, сучасним розвитком знань про фізику геокосмосу, а з іншого боку, тенденцією до мініатюризації платформ космічних апаратів (КА) та приладів корисного навантаження і зниження вартості пускових послуг.

Стрижневою ідеєю проекту «КластерІон» є створення на іоносферних висотах кластера з декількох (доцільно 3-х) КА, оснащених комплексами наукової апаратури для діагностики газоплазмових і електродинамічних параметрів космічної середовища. З цією метою пропонується адаптувати платформу мікросупутника YuzhSat, розроблену ДП «КБ «Південне». Комплекс наукової апаратури, ідентичний для всіх апаратів в кластері, включає: іонний дрейфометр IDM/RPA, що забезпечує реєстрацію концентрації, температури, трьох компонент швидкості дрейфу та спектру дрібномасштабних неоднорідностей іонної компоненти космічної плазми; зонд температури і концентрації електронної компоненти плазми TeNeP; електромагнітний комплекс ЕМС у складі трикомпонентного ферозондового магнітометру FGM, трикомпонентного індукційного магнітометру SCM та 2-х зондів електричного потенціалу плазми EP для реєстрації 1-ї компоненти електричного поля.

3.2 Призначення проекту (сутність проблеми, наукове обґрунтування та постановка задачі досліджень)

3.2.1 Аналіз перспектив розвитку ринку КА

Комерціалізація космічної техніки призвела до зниження вартості пускових послуг і підвищення надійності доставки КА на орбіту. Прогрес електронної техніки забезпечує істотне зниження маси як цільового навантаження КА, так і службових систем. Крім того, космічні апарати, створювані на замовлення університетів і, особливо, приватних компаній, як правило, не несуть великої кількості додаткового навантаження, в зв'язку з чим сформувалася концепція космічних апаратів мікро- і нано- класу, суть якої можливо лаконічно виразити формулою «один апарат – одне навантаження – одна функція». Зведені дані по запусках КА в 2010-2015 рр. і прогноз в припущенні лінійного тренда представлений на [рис. 3.1](#).

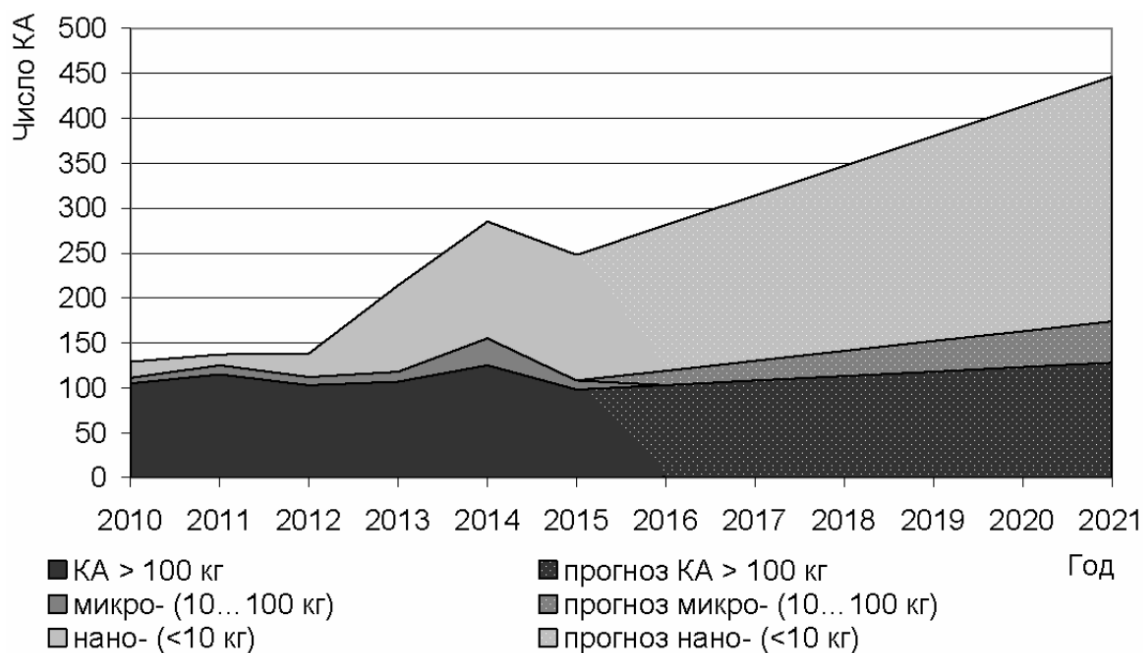


Рисунок 3.1 – Розподіл пусків КА по масі.

На основі аналізу наведених даних можна зробити наступні висновки по

перспективі пусків КА до 2021 року:

- Число пусків КА мікро-класу зросте не менш ніж до 40–50 КА. З урахуванням прогресу в області мікроелектроніки очікується збільшення річного числа пусків КА мікро-класу до 50–60 одиниць;
- Число пусків КА нано-класу складе більше 250 одиниць, це сегмент ринку, що максимально динамічно розвивається. Найбільш масовим форматом КА є CubeSat 3U–6U. Для формату 12U і 24U передбачається одиничне використання;
- Ринок КА масою понад 100 кг (в т.ч. геостаціонарних і пілотованих) залишиться на рівні близько 100 од. / рік.

Отже, логіка розвитку ринку КА призводить до скорочення можливостей використання великих платформ в наукових цілях. Принаймні, конкуренція в середині наукової спільноти за доступ на борт великих КА буде зростати. Необхідно усвідомлювати, що шанси українських вчених на успіх в цій конкуренції малі. З іншого боку, стрімко зростає сегмент запусків КА нано- і піко-класу, і це є об'єктивною тенденцією, яка висуває на порядок денний наступні стратегічні завдання:

- пристосувати можливості нано- і піко-супутників до потреб наукових експериментів,
- скорегувати постановки задач наукових експериментів до можливостей нано- і піко-супутників.

3.2.2 Наукове підґрунтя проекту «КластерІон»

Актуальність реалізації проекту «КластерІон» обумовлена низкою обставин, пов'язаних, по-перше, з сучасним розумінням космічної погоди. Нещодавно міжнародними науковими комітетами COSPAR і ILWS складена дорожня карта досліджень космічної погоди [16], яка передбачає вивчення і розробку прогностичних моделей динаміки іоносфери як основного космічного чинника, що

впливає на радіозв'язок і точність роботи глобальних навігаційних супутникових систем. З метою реєстрації параметрів іоносфери *in situ* реалізується або готується до скорої реалізації ціла серія масштабних супутникових проектів: Swarm та QB50 (Євросоюз), Chinese Seismo-Electromagnetic Satellite Mission (Китай), Ionospheric Connection Explorer (США), «Іоносат – Мікро» (Україна) та ін. Не викликає сумніву, що в майбутньому аналогічні місії будуть спрямовані для вивчення факторів космічного простору в околі Місяця і планет сонячної системи. Проект «КластерІон» лежить в руслі зазначених ініціатив.

Іншим спонукальним мотивом до реалізації проекту «КластерІон» є необхідність вивчення іоносферних відгуків на розподілені по Земній кулі природні і штучні джерела енерговиділення. В останні роки опубліковані роботи, де такий відгук був скрупульозно документований – в спостереженнях за рухомими іоносферними збуреннями над землетрусами і цунамі [17–19], пульсаціями магнітного поля Землі під час руху погодних фронтів [20], випромінюваннями ліній електропередач і навігаційних радіостанцій, що створюють в іоносфері специфічний електромагнітний слід [21, 22] тощо Спеціального дослідження вимагають дані про іоносферні провісники землетрусів [23]. Науковий проект, спрямований на послідовне та систематичне вивчення вказаних явищ, дозволить оцінити практичну можливість використання іоносферних спостережень для моніторингу природних і техногенних катастроф, які відбуваються на землі [24, 25].

Підсумовуючи, проект «КластерІон» ставить за мету вивчення динамічних процесів в іоносфері для пошуку взаємозв'язку іоносферних збурень з процесами на Сонці, в магнітосфері, атмосфері і внутрішніх оболонках Землі. У висотному шарі 400–600 км буде з високою роздільною здатністю виміряна розподіл плазмових параметрів і електромагнітних полів УНЧ – ННЧ – ДНЧ діапазону. Отримані дані складуть експериментальний базис для уточнення референсних моделей геокосмосу і розробки методів прогнозу індексів космічної погоди. На великий статистику буде проведено дослідження іоносферних відгуків на фактори сонячної активності (сильні сонячні спалахи, корональні викиди мас, магнітні бурі), тектонічні катаклізми (сильні і надсильні землетруси, виверження вулканів), техногенні

чинники (робота ліній електропередач, запуски потужних ракет-носіїв тощо).

3.2.3 Обґрунтування необхідності реалізації проекту в умовах космічного простору

Необхідність спостереження факторів космічного простору *in situ* на борту низькоорбітальних КА обумовлена тим, що такі спостереження відкривають глибину діагностики, недосягну при використанні наземних засобів зондування. Встановлювані на супутниках приладові комплекси забезпечують вимір первинних газокінетичних параметрів космічного середовища (температури, концентрацій частинок, електричного і магнітного полів тощо; всього до декількох десятків найменувань параметрів), і це дозволяє проводити безпосереднє порівняння експериментальних даних з магнітогідродинамічною теорією, і здійснювати розробку моделей геокосмосу на надійній фактичній основі. Крім того, іонозондові методи в своїй більшості не дозволяють реєструвати параметри іоносфери над максимумом електронної концентрації $h_m F2 = 250 \dots 300$ км, що кардинально обмежує використання таких даних для калібрування моделей іоносфери і дослідження ефектів іоносферно-магнітосферної взаємодії. Також слід зазначити, що з супутника спостерігається глобальна картина іоносферних процесів: навіть короткі сеанси включень вимірювальної апаратури протягом одного орбітального витка створюють уявлення про планетарний розподіл збурень, і це дозволяє судити про розташування їх джерел і про еволюцію збурень по мірі віддалення від джерел – питаннях, вивчення яких наземними методами зажадало б проведення узгоджених спостережень у багатьох рознесених пунктах іоносферного зондування.

3.2.4 Призначення проекту «КластерІон»

Задум пропонованого проекту об'єднує дві складові – фундаментально-наукову та технологічно-інноваційну. Завданнями проекту є:

1. Розробити перспективну мікро-/нано- супутникову систему для дослідження навколопланетного космічного простору (атмосфер, іоносфер і магнітосфер Землі і інших планет сонячної системи);

2. Реалізувати проект у космосі в інтересах:

- досліджень в галузі фізики геокосмосу,
- льотної демонстрації ефективності і комерційної привабливості розробки.

3.2.5 Очікувані результати

В результаті здійснення проекту «КластерІон» буде радикально розширена статистика спостережень іоносфери. Отримані дані створять базис для уточнення і розробки референцних моделей геокосмосу (в тому числі регіональних моделей іоносфери) і прогностичних моделей космічної погоди. Дані проекту будуть використані для вивчення іоносферних відгуків на розподілені по Земній кулі природні і антропогенні джерела енерговиділення. Буде встановлена (обґрунтована або дезавуйована) можливість практичного використання іоносферних спостережень для діагностики приземних катастроф. Особливу увагу передбачається приділити вивченню: 1) іоносферних провісників землетрусів, реєстрація яких представляє значний інтерес в контексті проблеми короткострокового попередження землетрусів, 2) випромінюванню ліній електропередач, діагностика яких з космосу відкриває перспективу дистанційного контролю енергоспоживання в глобальному та регіональному масштабах.

Соціальні аспекти. Проект виконується за участю зарубіжних партнерів, що є

кроком інтеграції вітчизняної науки в міжнародну наукову спільноту та демонстрацією здатності України виступати партнером західних країн і міжнародних організацій у вирішенні завдань сучасної космонавтики. Реалізація проекту сприятиме популяризації космічної діяльності в Україні; з цією метою має бути здійснена відповідна освітня програма.

Важливішим очікуваним внеском реалізації проекту в світову науку має стати створення веб-ресурсу і бази даних проведених спостережень, з перспективою їх подальшого використання науковою спільнотою, а також широким загалом викладачів, студентів і просто осіб, які цікавляться космічними дослідженнями.

3.3 Обґрунтування технічної можливості створення наукових приладів, КА та орбітального угруповання

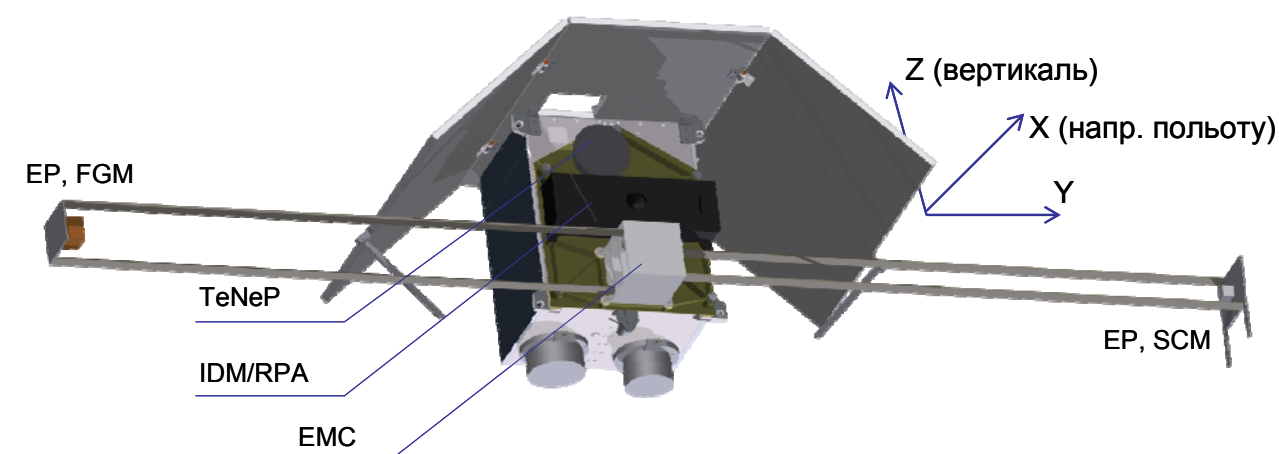
3.3.1 Комплекс наукової апаратури

Склад наукової апаратури, ідентичний для всіх КА угруповання «КластерІон», представлений в [табл. 3.1](#). Параметри приладів підлягають уточненню. Розташування вимірювальних датчиків на платформі YuzhSat вимагає додаткового опрацювання ДП «КБ «Південне». Пояснювальний варіант можливого розташування датчиків показаний на [рис. 3.2](#).

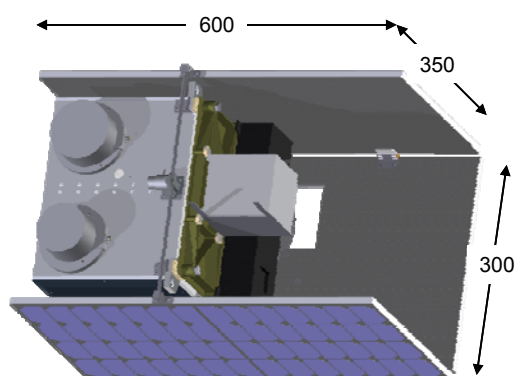
Таблиця 3.1 - Склад наукової апаратури

Наукові прилади	Параметри, що вимірюються / інше	Параметри приладів / вимоги до розміщення	Науковий керівник
Плазмовий комплекс			
Іонний дрейфметр IDM/RPA	Параметри іонної компоненти плазми: концентрація, швидкість, температура, спектр неоднорідностей	Паралелепіпед 100/100/70 мм 1 кг/ 1.5 Вт У набігаючому потоці плазми. «Дивиться» по ходу КА.	Л.Г. Банков, Болгарія

Електронний зонд TeNeP	Температура та щільність електронної компоненти плазми	Диск: D 100 мм, товщина 30 мм 0,5 кг / 1 Вт. Поза сліду КА. В тіні.	К.І. Ояма, Тайвань / Японія
Електромагнітний комплекс EMC			
Ферозондовий магнітометр FGM	3 компоненти магнітного поля 0–100 Гц	Датчик: куб 30 / 30 / 30мм / 40г. Блок електроніки: 0,5 Вт. На штанзі	С.М. Беляєв Україна
Індукційний магнітометр SGM	3 компоненти магнітного поля 10 Гц – 20 кГц	Куб 40/40/40 мм / 70 г / 0,2 Вт. На штанзі поза слідом КА.	С.М. Беляєв Україна
2 електричні зонди EP	1 комп. електричного поля 10 Гц - 20 кГц	Прямокутні пластини 70/70 мм / 0,06 Вт. Сумішені з SGM / FGM	С.М. Беляєв, Україна
Модуль EMC з системою штанг	1 кг, 100/100/100 мм, довжина штанг > 1 метра		Підлягає уточненню
Інтерфейсний модуль корисного навантаження IMP			
Запис та попередня обробка даних. Управління роботою наукових приладів.		1 кг/ 2 Вт	Підлягає уточненню
Загалом:	вага: до 4 кг, потужність: до 6 Вт, інформаційний потік: до 500 МБ за добу		



а



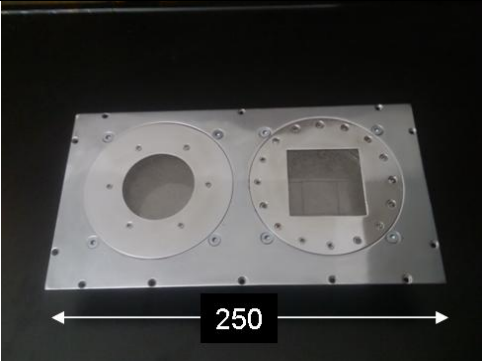
б

Рисунок 3.2 – а. Розташування датчиків на платформі YuzhSat з розгорнутими штангами. б. КА в упакованому виді.

Іонний дрейфометр IDM/RPA призначений для реєстрації концентрації, температури, трьох компонент швидкості дрейфу та спектру дрібномасштабних неоднорідностей іонної компоненти плазми. Характеристики приладу наведені в [табл. 3.2](#). Науковий керівник розробки доктор Л.Г. Банков (Інститут космічних досліджень і технологій, Болгарія). Вперше прилад такого типу було встановлено на супутнику COSMOS-184 [26]. У різних модифікаціях, вдосконалюючись від проекту до проекту, аналогічні прилади встановлювалися на супутниках Dynamics Explorer 2, Інтеркосмос-Болгарія-1300, Активний, DSMP-F13, DSMP-F15, Swarm, Chinese Seismo-Electromagnetic Satellite Mission та ін.

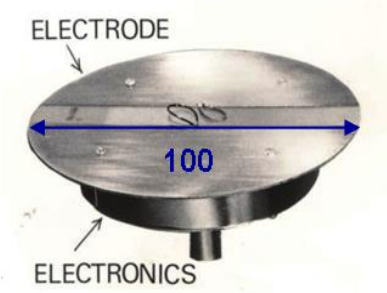
До складу приладу IDM/RPA входить два датчики: IDM (власне іонний дрейфометр) і RPA (іонна пастка). Дані вимірювань дозволяють розрахувати поперечну компоненту постійного електричного поля в плазмі $\vec{E}_\perp = -\vec{V}_i \times \vec{B}$, де V_i – швидкість плазмового дрейфу за даними IDM, B – магнітне поле за даними магнітометра FGM або відповідно до моделі магнітного поля Землі.

Таблиця 3.2 – Іонний дрейфометр IDM/RPA

Зображення	Характеристики
	250x90x55 мм³ / < 1.6 кг / < 1 Вт (В набігаючому потоці, «дивиться» по ходу КА) Швидкість дрейфу іонів ± 5000 м/с, похибка 5 м/с Концентрація іонів 10⁶–10¹² м⁻³, похибка 10⁶ м⁻³ Температура іонів 300–10000 К, похибка 25 К Частота зйому даних 1–10 Гц

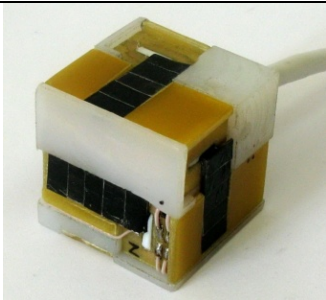
Зонд TeNeP – апробований інструмент для вимірювання температури і концентрації електронної компоненти плазми. Характеристики приладу наведені в [табл. 3.3](#). Науковий керівник розробки професор К.-І. Ояма (К.-І. Оуама, Університет Ченг-Кунг, Тайвань). Прилад TeNeP був розроблений в Японії в 1970-х роках і з тих пір використовувався в багатьох експериментах на борту зондуєчих ракет, супутників, і в Японської марсіанської місії [27].

Таблиця 3.3 – Електронний зонд TeNeP

Зображення	Характеристики
	Датчик – диск 100 мм (діаметр) / 30 мм (товщина), 20 г, блок електроніки <300 г / 1Вт (В тіні поза сліду КА) Концентрація електронів 10^9 - 10^{12} м ⁻³ Температура електронів 500-4000 К Частота зйому даних 1-2 Гц

Електромагнітний комплекс EMC включає трикомпонентний ферозондовий магнітометр FGM для вимірювання квазіпостійного магнітного поля, трикомпонентний індукційний магнітометр SCM для вимірювання змінного магнітного поля, 2 зонда електричного потенціалу плазми EP для реєстрації 1-ї компоненти змінного електричного поля. Характеристики датчиків наведені в [табл. 3.4](#). Науковий керівник розробки кандидат техн. наук С.М. Беляєв (Львівський центр Інституту космічних досліджень, Україна). Прототип приладу EMC був розроблений для космічної місії «Small Explorer for Advances Mission» на платформі CubeSat 3U в рамках проекту 7-ї Рамкової програми «SEAM» [28]. Сенсори EMC встановлюються на висувних керамічних панелях. Штанги довжиною більше 1 м являють собою пружні стрічки з композитного матеріалу, намотані на котушки. В упакованому стані прототип EMC має вигляд блоку ~ 100/100/100 мм. Після розчеховки штанги розгортаються під дією власної пружності.

Таблиця 3.4 – Датчики магнітного поля в складі комплексу ЕМС

Зображення	Характеристики
Ферозондовий магнітометр FGM (постійне магнітне поле)	
	20x20x20 мм 3/25 грам / <0,4 Вт динамічний діапазон $\pm$: 64 000 nT шум на частоті 1 Гц <20 pT / $\sqrt{\text{Hz}}$ частотний діапазон DC – 10 Гц
Індукційний магнітометр SCM (змінне магнітне поле)	
	38x38x38 мм ³ /76 грам / <0,1 Вт (Поза сліду КА) коефіцієнт перетворення 20 mV / nT шум на частоті 1 кГц < 0,3 pT / $\sqrt{\text{Hz}}$ частотний діапазон 10 Гц – 20 кГц

3.3.2 Платформа КА

Тренд до мініатюризації космічних апаратів містить в собі певне протиріччя. Чим менше і легше КА, тим менше його вартість і вартість його запуску, коротше терміни створення КА, але тим жорсткіше обмеження на можливості розміщення корисного навантаження на його борту. Платформа YuzhSat здається вдалим рішенням цієї дилеми. А саме:

- Платформа повинна нести солідний приладовий комплекс;
- Платформа повинна бути орієнтованою, оскільки датчики параметрів космічної середовища повинні перебувати в зоні, необуреним рухом КА, а деякі з них повинні «дивитися» вперед по ходу КА;

– Оскільки на перше місце ставиться реалізація високоінформативних моніторингових вимірювань, для передачі даних на землю необхідна швидкісна радіолінія Х-діапазону;

– Кластерні вимірювання висувають високі вимоги до синхронізації шкал часу і точності позиціонування КА. До складу КА повинен входити приймач GPS;

– Потрібні штанги максимально можливої довжини, щоб винести електромагнітні датчики в «чисту» зону.

Зазначені вимоги значною мірою знецінюють використання популярних нині платформ CubeSat 1U / 2U / 3U для проведення досліджень в галузі фізики космічного простору. Платформа YuzhSat, навпаки, здається оптимальною.

Технічні вимоги до адаптації платформи YuzhSat наступні:

- Орієнтація з точністю до 5 град. Точність орієнтації ~ 1 град .;
- Радіолінія для передачі наукової інформації на землю – Х-діапазону;
- Синхронізація бортових шкал часу КА, що становлять кластер, не гірше 0.1 мсек;
- Позиціонування КА з точністю до декількох десятків метрів;
- Наявність 2-х штанг для датчиків магнітно-хвильового комплексу.

3.3.3 Наземний сегмент збирання, обробки та розповсюдження наукової інформації

В результаті реалізації проекту «КластерІон» очікується отримати більше терабайта наукових даних, які будуть розподілені між приблизно 15-ю каналами реєстрації фізичних параметрів, сегментовані в записи і прив'язані до індивідуальних орбітальних витків КА. Загалом буде створено кілька сотень тисяч записів даних, які підлягають розшифровці і сумісному аналізу. Обробку інформації в таких масштабах неможливо вести силами тільки виробників приладів, в зв'язку з чим в Інституті космічних досліджень створюється спеціальна структура - Центр

збору, обробки і поширення даних геокосмічних супутникових проектів.

Інформаційна система центру включає в себе служби збору даних з серверів приймальних станцій, засоби їх декодування, систематизації і геоприв'язки, сховище даних різних рівнів обробки, яке поповнюється по мірі проведення космічних вимірювань, базу метаданих для швидкого пошуку даних в сховищі, і веб-інтерфейс, який забезпечує доступ до даних кінцевих користувачів.

Розміщення даних проекту «КластерІон» у всесвітній мережі Інтернет є пріоритетом, націленим на залучення в обробку даних міжнародної наукової спільноти, як в ході проведення проекту, так і після його завершення. Відомо, що солідні наукові проекти не завжди досягають своїх задекларованих цілей, але нерідко призводять до відкриттів, які навіть не планувалися авторами проектів. Тому створення належним чином організованого каталогу експериментальних результатів, доступного для широкого кола вчених-користувачів, є одним з найважливіших завдань.

3.3.4 Інноваційні аспекти проекту «КластерІон»

В табл. 3.5 наведені інноваційні переваги проекту «КластерІон».

Таблиця 3.5 – Інноваційні аспекти розробки

Сфера інновації	Поточний статус	Очікуваний прогрес
Мініатюрний ферозондовий магнітометр	Чутливість аналогів, які використовуються в космосі, ~ 10 нТ	Зменшення приладових шумів нижче 20 пТ / $\sqrt{\text{Гц}}$. Розробка комерційно привабливої моделі.
Мініатюрний індукційний магнітометр	Немає моделі, прийнятною для піко- / нано- супутників	Розробка комерційно привабливої моделі.
Іонний дрейфометр	Те ж	Те ж
Електронний зонд	Те ж	Те ж
Електромагнітна чистота КА	Не забезпечується для піко- / нано- супутників	Розробка відповідної технології
Платформа КА	Не має аналогів	Проблемно-орієнтована платформа нано- /

		мікро- супутника для геокосмічних досліджень
Наземна інформаційна система	Структури архівів даних специфічні для кожної місії. Системи вибірки даних примітивні. Web-інтерфейс недружні.	Розробка цілісної системи збору, обробки та розповсюдження даних геокосмічних місій, що розширюється для додавання нових приладів і нових супутників без модифікації ядра. Розробка протоколу геокосмічних API. Розробка стандарту метаданих геокосмічних спостережень. Геопривязка на основі OpenGIS технології.

3.3.5 Орбітальна конфігурація

Можливості побудови орбітального кластера, який в повній мірі задовольняє дослідним цілям проекту, залежать від багатьох чинників: кількості КА в кластері, наявності / відсутності коректувальної рушійної установки (КРУ) на борту КА, можливостей ракети-носія (РН), що залежать, в свою чергу, від фінансування проекту. В ході проектування буде розроблений сценарій створення орбітального угруповання з урахуванням зазначених факторів. Як ілюстрацію опишемо один з можливих варіантів: запуск однієї РН кластера з трьох КА без КРУ:

- Два апарати КА1 і КА2 виводяться РН на близькі кругові орбіти, висота яких забезпечить політ КА протягом дворічного терміну гарантійного функціонування платформи YuzhSat. Згідно з попередніми оцінками, якщо початкова висота орбіт КА складе ~ 450 км, то під дією гальмуючих дій атмосфери через два роки апарати знизяться в область щільною іоносфери 250–350 км (рис. 3.3).

- Величина і напрямок імпульсів відділення, а також інтервал часу між відділенням КА1 і КА2 вибираються так, щоб забезпечити гарантоване їх незіткнення і невелику швидкість розбіжності уздовж орбіти (до кінця дворічного періоду відстань між КА1 і КА2 має бути порядку декількох тисяч кілометрів).

- КА3 виводиться РН на кругову орбіту висотою ~ 600 км. Внаслідок відмінності періодів обертання навколо Землі, КА3 систематично зближується з парою КА1, КА2 і віддаляється від неї на іншу сторону геоїда.

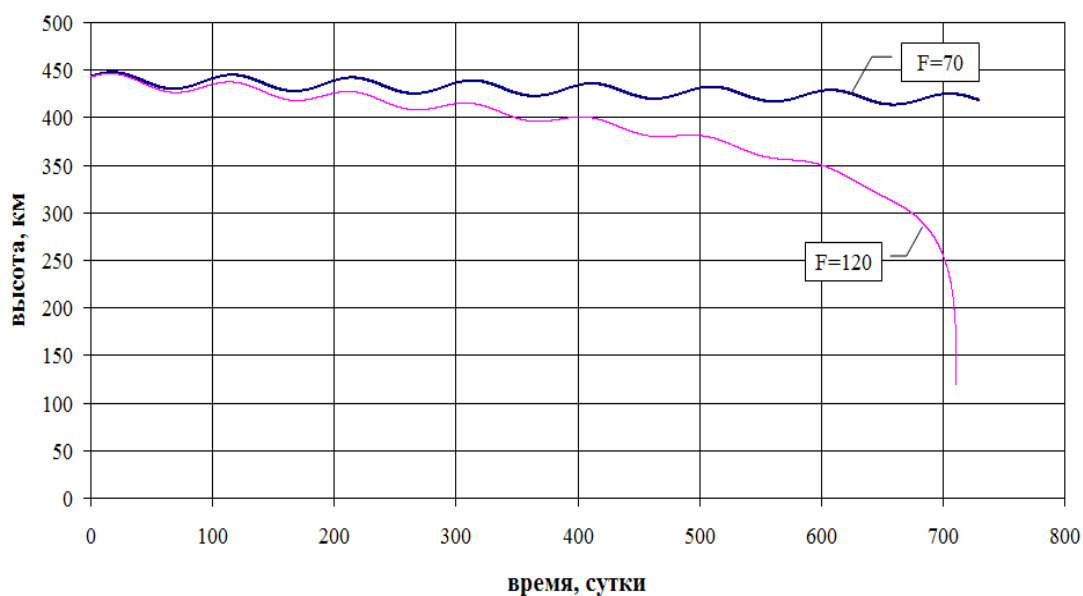


Рисунок 3.3 – Зниження угруповання внаслідок атмосферного гальмування

У даній конфігурації пара КА1 і КА2 реалізує двоточкову діагностику параметрів іоносфери в діапазоні від малих до великих горизонтальних масштабів іоносферних збурень. Призначення КА3 полягає в проведенні аналогічних вимірювань на іншому висотному рівні. Зміна взаємно-відносної відстані між КА представлена на [рис. 3.4 і 3.5](#).

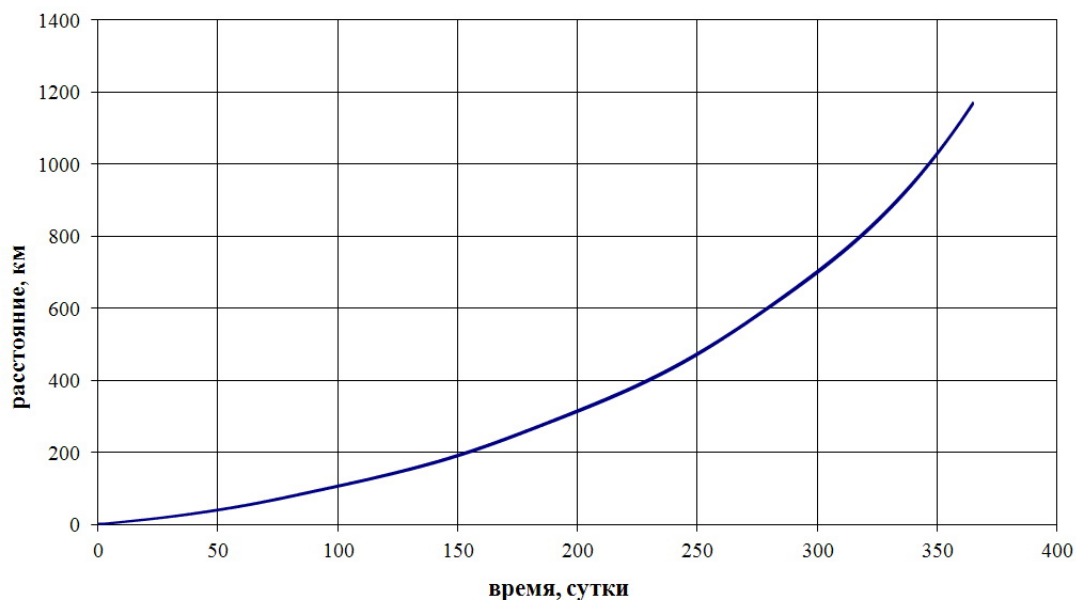


Рисунок 3.4 – Зміна взаємно-відносного відстані КА1 – КА2.

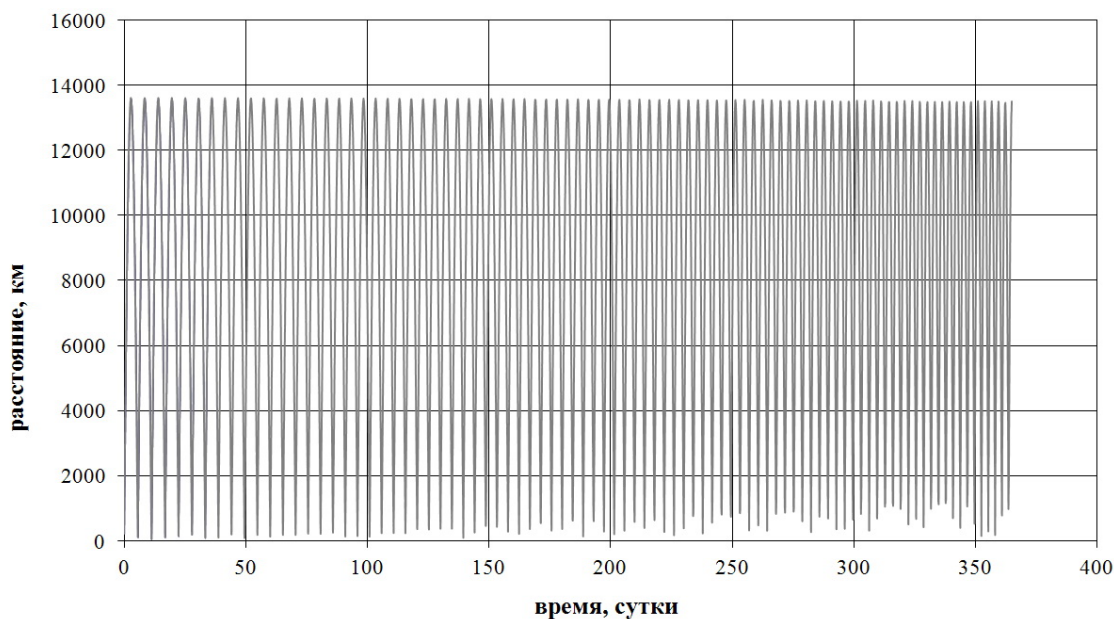


Рисунок 3.5 – Зміна взаємно-відносного відстані КА1 – КА3.

3.4 Організаційні питання

Консорціум учасників проекту представлений у [табл. 3.6](#). Проект плану-графік підготовки до запуску при наявності належного фінансування приведений у [табл. 3.7](#).

Таблиця 3.6 – Організації-учасники проекту «КластерІон»

Організація – учасник	Участь в проекті
УКРАЇНА	
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України	Координація виконання наукової програми. Забезпечення функціонування центру управління ходом космічного експерименту і центру обробки наукової інформації.
Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України	Електромагнітний комплекс ЕМС
Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля	Адаптація платформи YuzhSat. Інтеграція КА. Управління польотом. Прийом даних.

Підлягає уточненню	Інтерфейсний модуль корисного навантаження ІМР
Підлягає уточненню	Штанг з системою розгортання
ТАЙВАНЬ	
Університет Ченг-Кунг	Електронний зонд TeNeP
БОЛГАРІЯ	
Інститут космічних досліджень та технологій болгарської академії наук	Іонний дрейфометр IDM / RPA

Таблиця 3.7 – Проект плану-графік підготовки проекту «КластерІон»

1-й рік	2-й рік	3-й рік
Розробка і виготовлення КНА. Розробка наземної інформаційної системи. Технічні вимоги до платформи КА.		
	Розробка (адаптація) платформи КА. Виготовлення та інтеграція КА.	
		Тестування і комплексні випробування всіх систем

Орієнтовний бюджет підготовки проекту, включаючи розробку, створення і запуск кластеру КА «КластерІон» складає 6 М €.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ПРИЛАДУ «ПІОН» ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ НА БОРТУ МІКРОСУПУТНИКІВ (КОНКУРС ПРОЕКТІВ YUZH SAT)

4.1 Вступ

Дослідження іоносферної плазми за допомогою наукових приладів на борту супутників актуальне не тільки з точки зору фундаментальної космічної науки, а й сприяє вирішенню ряду практичних завдань пов'язаних з підвищенням надійності роботи бортової апаратури, надійності космічного зв'язку, пошуком ознак-провісників землетрусів за зміною стану іоносфери і ін .

Простим і надійним датчиком для вимірювання параметрів іонів іоносферної плазми є плоский аналізатор з гальмуючим потенціалом (АГП), що складається з металевого корпусу, системи сіток що аналізують іони і колектора, який збирає іони, які пройшли систему сіток. По суті АГП є різновидом багато електродного зонда Ленгмюра. На відміну від найпростіших датчиків АГП дозволяє здійснювати селекцію іонів плазми і пригнічувати фотоелектрони і вторинні електрони з поверхні зонда.

Принцип вимірювань за допомогою АГП заснований на знятті на борту супутника вольт-амперної характеристики (ВАХ) у вигляді залежності струму колектора від напруги гальмівної сітки. В результаті наземної обробки даних вимірювань визначаються параметри іонів плазми, шляхом наближення експериментальної ВАХ до її математичної моделі, що залежить від шуканих параметрів. Слід зазначити, що АГП дозволяє здійснювати мас-спектрометричний аналіз іонів. При цьому на відміну від більш досконалих мас-спектрометрів, прилади з АГП значно простіші, надійніші і дешевші [29, 33].

Вперше для вивчення космічної плазми подібний АГП датчик (іонна пастка)

був встановлений на борту Третього штучного супутника Землі К.І.Грінгаузом [30].

Надалі АГП широко використовувався для вивчення як іоносферної плазми, так і "сонячного вітру" на борту різних супутників. Результати безлічі космічних експериментів (КЕ) показали, що АГП є потужним інструментом для вимірювання параметрів іонів космічної плазми [31-32].

В ОНПУ розробляється проект приладу «Піон» на базі АГП для проведення КЕ з вивчення іоносферної плазми на борту малих супутників (нано-супутників і мікро-супутників). Цей проект посів третє місце в конкурсі на корисне навантаження мікро-супутників YuzhSat. Кінцевою метою проекту є адаптація приладу до вимог нано-супутників CubeSat, що відкриває широку можливість проведення КЕ [42].

Розробка проекту здійснюється силами співробітників кафедри радіотехнічних пристроїв і лабораторії технічних засобів захисту інформації з широким залученням студентів. ОНПУ має майже півстолітній досвід створення подібних приладів, які встановлювалися на борту цілого ряду космічних апаратів (КА) серій Марс, Венера, Прогноз, Вертикаль, Авроральний і Хвостовий зонд проекту «Інтербол-1» і ін.

До фізичної інтерпретації інформації, отриманої за допомогою приладу «Піон» в ході проведення КЕ, планується залучити різні наукові установи України: КНУ, ІКД НАНУ-ДКАУ, Радіоастрономічний інститут НАНУ та ін .

Метою виконання даної НДР є: розробка технічної пропозиції по космічному експерименту «Піон»; розробка структурної схеми, алгоритмів роботи і обробки інформації приладу «Піон»; обґрунтування технічної можливості створення приладу «Піон».

4.2 Сутність досліджуваної проблеми, коротка історія та стан питання в даний час

4.2.1 Сутність досліджуваної проблеми

З початком інтенсивного використання малих супутників (наносупутників і мікросупутників) для дослідження навколоземного простору, починаючи з 2000 р., з'явилася проблема суттєвого зменшення габаритів, ваги і споживання раніше розробленої наукової апаратури для проведення космічних експериментів на борту цих супутників.

У роботі досліджуються проблеми, пов'язані зі створенням бортового наукового приладу на базі АГП для малих супутників. Такий прилад повинен мати:

- широкий діапазон виміру струму колектора (5 порядків і вище);
- послідовний інтерфейс зв'язку з бортовою системою збору наукової інформації (СЗНІ) супутника;
- малі габарити, адаптовані під механічний інтерфейс супутників;
- мала вага;
- низьке енергоспоживання від системи електроживлення супутника;
- можливість управління енергоспоживанням від максимального (в активному режимі вимірювань) до мінімального (в режимі засинання) значення;
- невисоку інформативність циклу вимірювань (не більше 1 кбайт / с);
- можливість управління періодом повторення циклу вимірювань для зниження середнього енергоспоживання і інформативності за добу.

4.2.2 Коротка історія та стан питання в даний час

На ранній стадії космічних досліджень аналогічні прилади мали великі

габарити, вагу, енергоспоживання і низьку інформативність. Перш за все, це було пов'язано з можливостями електроніки тих часів, і недосконалістю СЗНІ [34]

Найдосконалішим приладом на базі АГП для великих супутників, розробленим в кінці 70-х років минулого століття, можна вважати Аналізатор з гальмуючим потенціалом ORPA для орбітальної місії Піонер-Венера (НАСА). Прилад мав вагу 2.8 кг, споживав 4.8Вт. У ньому був застосований ряд нових рішень: оригінальна конструкція АГП, компенсація фоновому струму; автоматичне перемикання шкал вимірника струму в широкому діапазоні, пошук початку сканування ВАХ, скорочення надлишкової інформації та ін. [5].

Найдосконалішим вітчизняним приладом на базі АГП для великих супутників, можна вважати прилад АП-3У, який входив до складу розробленого в 90-ті роки минулого століття в ОНПУ комплексу приладів «Альфа-3» для Хвостового і Аврорального зондів проекту «Інтербол-1». Ці зонди були запуснені в 1995 і 1996 р. До складу комплексу «Альфа-3» входили три прилади: прилад АП-3У (АГП типу ПЛ-48 і електрометричний підсилювач постійного струму колектора); прилад ПЛ-19У (модуляційний АГП ПЛ-19 і підсилювач змінного струму колектора); прилад АП-3 - загальний блок електроніки для: живлення датчиків і підсилювачів АП-3У і ПЛ-19У; управління гальмуючою напругою датчиків; оцифровування сигналів приладів і видачі їх на СЗНІ. Комплекс надійно відпрацював до 2000 р, давши масу інформації про іоносферу, плазмосферу і магнітосферу Землі. Відмінною особливістю комплексу «Альфа-3» стало використання мікропроцесора для управління і обробки інформації приладів АП-3У і ПЛ-19У. Загальна вага комплексу склав 3.35 кг, споживання - до 5Вт [35-36].

Досвід розробки комплексу «Альфа-3» використовувався при виконанні даної роботи.

Слід зазначити, що основною проблемою приладів з АГП для великих супутників була низька швидкість знімання інформації з наукових приладів, що знижувало їх інформативність. Для подолання цієї проблеми розроблялися адаптивні алгоритми вимірювань, які дозволяють при невеликому числі відліків вимірюваної ВАХ АГП вибрати їх найкраще положення по осі гальмуючої напруги

[37-40].

З початком інтенсивного використання малих супутників почали розроблятися бортові прилади на базі АГП для дослідження іоносферної плазми уздовж орбіти цих супутників. У тому числі і наша робота присвячена розробці такого приладу [41-44].

Найбільш близьким прототипом приладу «Піон» є прилад CuRPA, розроблений в 2014 р в Політехнічному інституті штату Вірджинія (США), і призначений для установки на нано супутники Cubesat [47].

Безсумнівний інтерес представляє конструкція АГП цього приладу, адаптована до механічного інтерфейсу Cubesat. Вона показана на рис. 4.1 Розмір цього АГП - $77 \times 77 \times 26$ мм, вага - 0,4 кг. До секції колектора пристиковується блок електроніки, виконаний на двох печатних платах.

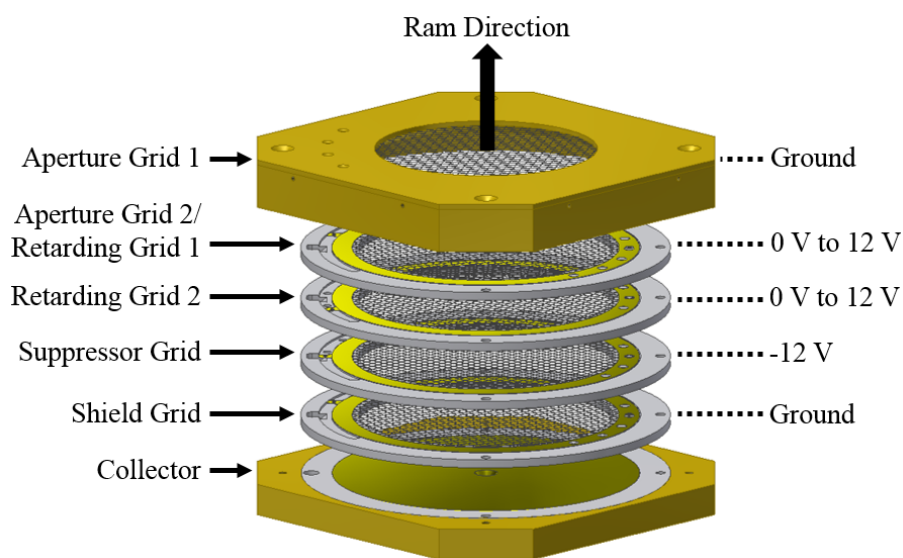


Рисунок 4.1 – Конструкція АГП, адаптована до формату CubeSat

Основні параметри приладу CuRPA:

- діапазон виміру струму колектора – 0.5 нА ... 5 мкА;
- точність вимірювання струму колектора – 2.5% для 500 нА;
- кількість відліків ВАХ – 32, 64 або 128;
- час сканування ВАХ – не більше 2 с;

- діапазон зміни гальмуючої напруги – 0 ... 12V;
- напруга супресорної сітки – мінус 12V;
- напруга колектора – 0V;
- напруги живлення: + 3.3V; + 5V; $\pm$ 5V; $\pm$ 15V (надходять від системи електроживлення);
- середньодобове споживання – 0,466Вт;
- габаритні розміри – $77 \times 77 \times 58.2$ мм;
- вага – 0.5кг;
- діапазон робочих температур – від мінус 20 ° C до + 75 ° C.

До особливостей електроніки приладу CuRPA слід віднести:

- перетворення струму колектора в напругу за допомогою електрометричного логарифмічного підсилювача LOG114AIRGVT;
- управління процесом вимірювань і видачу інформації в приладі CuRPA за допомогою контролера на FPGA типу AGLN250V5-VQG100;
- відсутність вторинного джерела живлення (всі необхідні напруги надходять з системи електроживлення).

Розміщення приладу CuRPA на борту наносупутники LAICE (формат 6U CubeSAT) показано на рис. 4.2 Запуск цього супутника планувався в 2016 р. Відомості про льотні випробування приладу CuRPA поки відсутні [48].

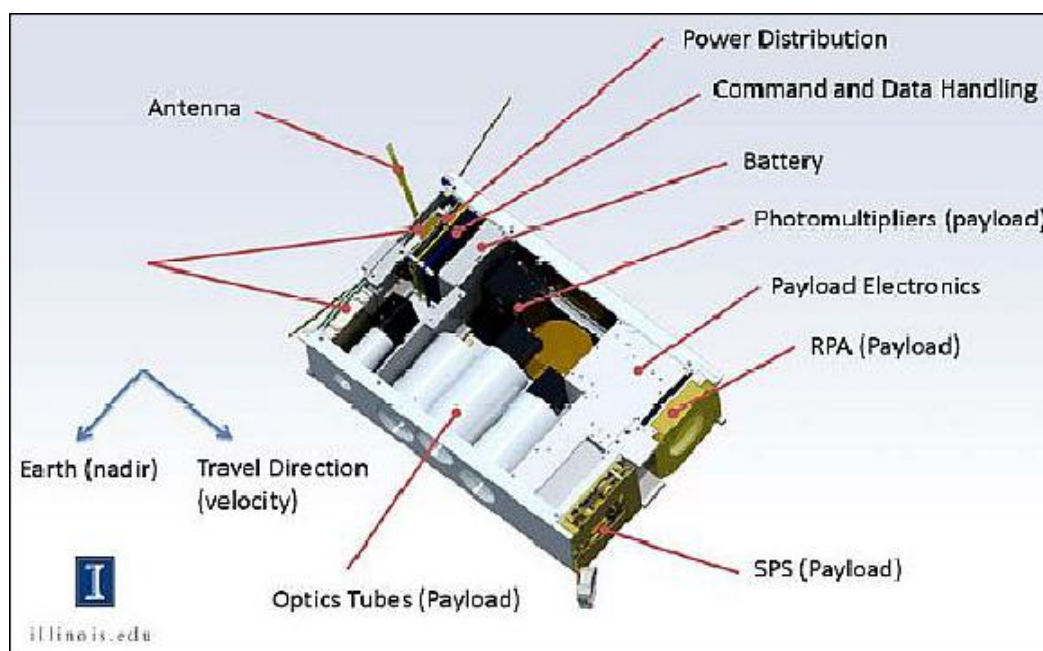


Рисунок 4.2 – Розміщення обладнання на борту наносупутника LAICE
Як видно з рис. 4.2, АГП орієнтований по вектору швидкості супутника.

4.3 Технічна пропозиція по космічному експерименту «Піон»

4.3.1 Сутність КЕ

Пропонується на борту низькоорбітальних малих супутників типу Cubesat і YuzhSat проведення космічного експерименту (КЕ) "Піон", метою якого є вивчення стану низькотемпературної іоносферної плазми Землі в інтересах розвитку фундаментальної космічної науки і рішення ряду прикладних науково–технічних питань, пов'язаних з іоносферою [51].

У частині фундаментальної науки це:

- дослідження фізичних процесів, що відбуваються в іоносфері;
- вивчення взаємодії іоносфери з магнітосферою Землі;
- вивчення сонячно–земних зв'язків;

- дослідження теплового балансу в іоносфері;
- вдосконалення моделі іоносфери;
- вивчення механізмів утворення плазмових «бульбашок» в екваторіальних областях;
- дослідження впливу тектонічних процесів усередині земної кори на стан іоносфери.

До науково–практичним аспектам КЕ «Піон» ставитися:

- прогнозування "космічної погоди" за станом іоносфери;
- вивчення впливу стану іоносфери на надійність земного і космічного радіозв'язку;
- дослідження впливу стану іоносфери на траєкторію польоту супутників;
- вивчення процесів електризації малих супутників, що впливають на роботу бортової електронної апаратури і систем;
- пошук ознак–провісників землетрусів за змінами стану іоносфери;
- апробація нових конструктивних і схемотехнічних рішень бортовий наукової апаратури для дослідження іоносфери.

Для реалізації КЕ "Піон" пропонується розробити бортовий науковий прилад "Піон" на базі АГП, адаптований до жорстких вимог малих супутників, і призначений для вимірювання параметрів іонної компоненти іоносферної плазми (енергетичного розподілу, масового складу, концентрації, температури і спрямованої швидкості іонів), а також потенціалу корпусу супутника щодо плазми.

4.3.2 Обґрунтування проведення КЕ в умовах космічного простору

Дослідження іоносфери може проводитися за допомогою наземних радарів некогерентного розсіювання. Наприклад, такі дослідження ведуться в Радіоастрономічному інституті НАНУ, м. Харків [49]. Однак, ці дослідження носять локальний характер, спрямовані, в основному, на рішення фундаментальних

наукових проблем, і зачіпають далеко не всі науково–технічні аспекти, пов'язані з вивченням іоносфери. До того ж, радари некогерентного розсіювання мало поширені, дуже дорогі і громіздкі, споживають багато електроенергії і мають значні витрати по їх експлуатації і ремонту. Тому проведення космічного експерименту «Піон» в умовах космічного простору за допомогою установки наукової апаратури безпосередньо на борту малих супутників вельми обгрунтовано, тому що цей експеримент:

- охоплює більшу частину космічного простору (уздовж орбіти супутника);
- має високу достовірність результатів вимірювань (безпосередній контакт зонда з об'єктом дослідження);
- вирішує широкий спектр науково–технічних питань (перераховані вище);
- вимагає просту наукову апаратуру для своєї реалізації;
- за 1–3 роки проведення дає великий масив даних про іоносферу для вивчення;
- має відносно невисоку вартість реалізації (невисокі витрати на розробку апаратури і програмного забезпечення для обробки інформації; низька вартість малих супутників і їх виведення; невеликі експлуатаційні витрати на прийом телеметричної інформації та її обробку).

4.3.3 Опис КЕ «Піон»

4.3.3.1 Порядок проведення КЕ

1. Розробляється і виготовляється дослідний зразок приладу, включаючи АГП, блок електроніки і програмне забезпечення мікроконтролера.
2. Розробляється контрольно-вимірювальна апаратура (КІА) на базі ПК (ноутбука), що імітує роботу бортових систем живлення, управління і збору

наукової інформації.

3. Розробляється програмне забезпечення для управління приладом і експрес-обробки інформації за допомогою ПК КІА.

4. Проводиться апробація працездатності приладу в наземних умовах на імітаторі потоку іоносферної плазми (наприклад, у вакуумній камері з іонним джерелом) з використанням КІА.

5. Узгоджуються алгоритми і розробляється програмне забезпечення бортового комп'ютера для управління і збору інформації приладу.

6. Проводиться стикувальні випробування з бортовими системами супутника в складі розібраного об'єкта. Для цього прилад підключається за допомогою комутаційного роз'єму до системи бортового електроживлення і бортовому комп'ютера, який здійснює управління режимами роботи, приймає і накопичує інформацію про роботу приладу.

7. Прилад проходить попередні наземні випробування в складі зібраного об'єкта, для чого прилад монтується на штатному місці супутника і проходить всебічні випробування, включаючи випробування на імітаторі іоносферної плазми.

8. Здійснюється виготовлення штатних зразків приладу, і завершується розробка програмного забезпечення ПК для експрес-обробки інформації приладу.

9. Проводяться льотні випробування приладу в результаті яких накопичуються в пам'яті бортового комп'ютера дані приладу періодично передається на Землю через систему радіозв'язку супутника в моменти сеансу зв'язку одночасно з орбітальними даними про стан супутника.

10. Поточні дані приладу, прийняті з супутника, передаються розробнику для експрес-обробки з метою оцінки його працездатності приладу і отримання первинних результатів експерименту (на рівні електричних сигналів).

11. Результати експрес-обробки інтерпретуються вченими.

12. Масив даних приладу разом з інформацією про знаходження супутника на орбіті передається вченим-обробникам, які визначають параметри іонної компоненти іоносферної плазми для різних точок орбіти непрямим методом (наближення експериментальних даних приладу і даних моделі роботи приладу зі

змінюю шуканих оцінок параметрів плазми).

13. Вчені проводять інтерпретацію і аналіз отриманих результатів про фізичні параметри плазми, формулюють нові знання про процеси, які відбуваються в іоносфері уздовж орбіти супутника.

14. За результатами КЕ вдосконалюється конструкція і програмне забезпечення приладу для його подальшого застосування на борту різних нано- та мікросупутників.

4.3.3.2 Умови проведення КЕ

1. Орбіта мікросупутників на борту, якого встановлюється прилад, повинна знаходитися в діапазоні висот 60 - 1000 км, що не зачіпають авроральних областей земної іоносфери.

2. Нормаль вхідного отвору датчика повинна бути орієнтована по вектору швидкості супутника з відхиленням не більше $\pm 10^\circ$ таким чином, щоб датчик ефективно реєстрував потік, що набігає іонів іоносферної плазми.

3. У поле зору датчика (тілесний кут $\pm 60^\circ$) не повинні потрапляти елементи конструкції супутника (антени, датчики, сонячні панелі і ін.).

4. Система електроживлення супутника повинна забезпечувати живлення приладу напругою +5 В відносно корпусу потужністю не менше 0,512 Вт - в режимі активної роботи.

5. Повинно бути передбачено відключення-включення живлення приладу - для приведення його у вихідний стан, або для аварійного відключення.

6. Управління роботою і з'їм даних приладу має здійснюватися по послідовному інтерфейсу RS-422 (UART) по протоколу ModBus зі швидкістю обміну не менше 9,6 кбіт / с і не більше 1 Мбіт / с.

7. Бортовий комп'ютер повинен забезпечувати видачу приладу коду бортового часу в момент подачі команд на запуск циклу вимірювань і ін.

8. Повинні бути забезпечена тривісна стабілізація польоту супутника з відхиленням не більше 2 град.

9. Повинні бути доступні орбітальні дані про знаходження супутника, прив'язані до бортового часу - для правильної інтерпретації результатів експерименту.

10. Потенціал корпусу супутника щодо навколишньої іоносферної плазми не повинен перевищувати + 20В.

Приклад розміщення приладу «Піон» на борту наносупутники Cubesat формату 2U наведено на рис. 4.3.

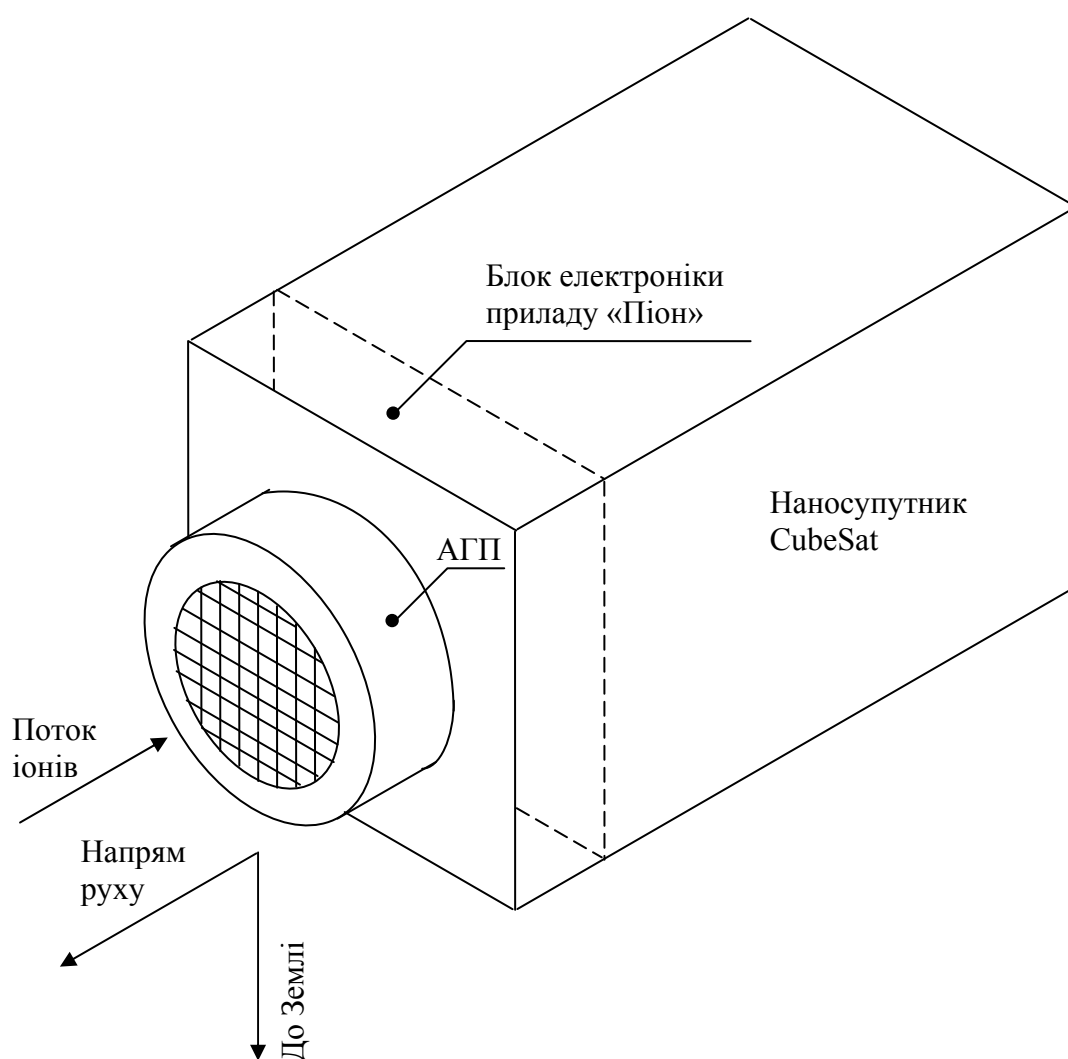


Рисунок 4.3 — Розташування приладу «Піон» на борту наносупутники Cubesat формату 2U

4.3.3.3 Основні параметри приладу «Піон»

1. Призначення – отримання інформації про іонний компонент низькоенергійної іоносферної плазми Землі уздовж траєкторії малого супутника, на борту якого він встановлений.

2. Тип датчика – плоский аналізатор з гальмуючим потенціалом (АГП), що складається з металевого корпусу та системи аналізуючих сіток і колектора.

3. Принцип вимірювання параметрів іонів іоносферної плазми – зняття вольт–амперної характеристики (ВАХ) АГП, з подальшою наземної обробкою даних, шляхом наближення експериментальної ВАХ і її математичної моделі з шуканими параметрами плазми.

4. Параметри іонів, що вимірюється (опосередковано):

- розподіл по енергії – $0 \dots 25$ еВ;
- концентрація – $10^2 \dots 10^6$ см⁻³;
- температура – $300 \dots 10^4$ К;
- маса – $1 \dots 32$ а.о.м. ;
- направлена швидкість – $7 \dots 10$ км/с.
- потенціал плазми відносно супутника – $0 \dots +10$ В.

5. Кут діаграми спрямованості датчика – $\pm 70^\circ$.

6. Напруга на електродах датчика відносно корпусу супутника:

- корпус датчика – 0В;
- вхідні сітка – 0В;
- гальмує сітка – $0 \dots +25$ В (змінюється за заданою програмою);
- екрануюча сітка – 0В;
- супресорна сітка – мінус 70В;
- колектор – мінус 20В.

7. Електричні параметри вимірювання струму колектора:

- діапазон виміру струму – ± 44 пА (величина кванта) $\dots \pm 11.25$ мкА;
- шкали вимірювання струму – 4 шкали з 5–кратним зміною крутизни при

переході на сусідню шкалу;

- діапазон компенсації фоновому струму – $\pm 0,45\text{мкА}$;
- дискретність компенсації фоновому струму – $0,22\text{нА}$;
- час встановлення сигналу вимірювача струму – 15 мс на рівні 1%.

8. Розрядність представлення інформації про струм колектора і гальмуючу напругу – 12 біт.

9. Виконання – єдиний блок з датчика і двох плат електроніки в форматі корисного навантаження CUBESAT.

10. Склад: датчик (АГП); канал управління гальмуючою напругою; канал вимірювання струму колектора; мікроконтролер, приймач послідовного інтерфейсу; вторинне джерело живлення.

11. Інформація, що видається (за один цикл вимірювань):

- бортовий час початку циклу вимірювань;
- температура приладу;
- напруга колектора;
- напруга супресорної сітки;
- максимальна гальмуюча напруга;
- фоновий струм колектора;
- номер шкали вимірювання струму;
- повний іонний струм колектора;
- відліки струму грубого сканування ВАХ (32 відліка);
- гальмуюча напруга початку точного сканування ВАХ;
- крок гальмуючої напруги точного сканування ВАХ;
- відліки струму точного сканування ВАХ (64 відліка);

12. Максимальна тривалість циклу вимірювань – 1.8 с.

13. Максимальна інформативність – не більше 200 байт / с за цикл вимірювань (17,28 Мбайт / добу при безперервній роботі).

14. Параметри комутаційного інтерфейсу:

- тип – послідовний;
- стандарт RS-422 (RS-485);

- протокол – Modbus;
 - тип контролера – UART;
 - швидкість обміну – до 1 Мбіт / с.
15. Габаритні розміри – $98 \times 98 \times 56$ мм.
16. Вага – 0,5 кг.
17. Напруга живлення: $+ 5V \pm 5\% V$ (відносно корпусу супутника).
19. Потужність від системи електроживлення:
- максимальна – 512 мВт;
 - при зниженій частоті мікроконтролера – 462 мВт;
 - при відключенні живлення аналогової частини схеми – 215 (165) мВт;
 - в режимі засинання – 34 мВт.
20. Робоча температура – мінус $30^{\circ} C \dots + 75^{\circ} C$.

4.3.4 Очікувані результати КЕ та їх використання

В результаті проведення КЕ «Піон» буде отримано великий масив даних вимірювання ВАХ АГП в польоті в іоносферній плазмі. Після обробки даних вимірювань, спільно з траєкторними даними супутника, буде отримано розподіл параметрів іонів плазми і потенціалу супутника уздовж орбіти польоту. Ця інформація може бути використана для:

- моніторингу іоносферної «погоди»;
- вивчення сонячно–земних зв'язків;
- дослідження взаємодії іоносфери і магнітосфери Землі;
- уточнення параметрів Міжнародної Моделі Іоносфери;
- дослідження теплового балансу іоносфери;
- вивчення механізмів утворення плазмових «бульбашок» в екваторіальних областях іоносфери;
- пошуку ознак–провісників землетрусів щодо змін стану іоносфери;

- уточнення даних інших КЕ експериментів з вивчення стану іоносфери, в тому числі і наземних – за допомогою радарів некогерентного розсіювання;
- уточнення даних магнітних і хвильових вимірювань на борту супутників;
- вивчення впливу стану іоносфери на радіозв'язок;
- пошуку ознак–провісників землетрусів зі зміни стану іоносфери;
- вивчення процесів електризації супутника і їх впливу на надійність роботи бортової апаратури і систем;
- дослідження впливу іоносфери на траєкторію руху супутників.

Споживачами інформації, отриманої в ході проведення КЕ «Піон» можуть бути як вчені, які займаються дослідженням космічного простору, так і розробники космічної техніки. За результатами КЕ передбачається публікація статей, підготовка доповідей на конференціях, захист магістерських дисертацій.

4.4 Розробка структурної схеми, алгоритмів роботи та обробки інформації приладу «Піон»

4.4.1 Структурна схема приладу «Піон»

Структурна схема приладу приведена на рис. 4.4

До складу приладу входять наступні пристрої:

- аналізатор з гальмуючим потенціалом (АГП);
- перетворювач струм–напруги (ПСН);
- перетворювач напруга–струм (резистор R_B);
- підсилювач гальмуючої напруги (ПГН);
- перетворювачі рівня ПР1 ... ПР3;
- мікроконтролер (МК);
- приймально–передавач (ПП) послідовного інтерфейсу (USB);

- цифро–аналогові перетворювачі ЦАП1, ЦАП2;– порт виводу (ПВ) цифрові сигналів керування;
- контролер послідовного інтерфейсу (КПІ).

Корпус АПП, вхідна сітка 2 і екрануюча сітка 4 електрично з'єднуються з корпусом супутника. Через негативний заряд корпусу супутника відносно плазми сітка 2 частково відсікає електрони, пропускаючи іони. На гальмуючу сітку 3 подається напруга V_{RG} , змінювана від 0 до $V_{RG\max} = 25V$. Цією напругою управляє ЦАП1 МК, який перетворює вхідний код N_{DAC1} в вихідну напругу V_{DAC1} по закону

$$V_{DAC1} = N_{DAC1} \cdot \Delta_{DAC}, \quad (4.1)$$

де $\Delta_{DAC} = \frac{V_{REF}}{2^n} = 0.732mV$ – шаг квантовання ЦАП;

$V_{REF} = 3V$ – опорна напруга ЦАП;

$n=12$ – розрядність ЦАП.

Діапазон вихідних сигналів ЦАП – от 0 до $V_{DAC\max} = +V_{REF} - \Delta_{DAC}$.

Діапазон вхідних кодів ЦАП – от 0 до $2^n - 1$.

Примітка. параметри ЦАП1 і ЦАП2 однакові, тому в поясненні опущений номер ЦАПа.

ПГН підсилює вихідний сигнал ЦАП1, перетворюючи його в напругу

$$V_{RG} = V_{DAC1} \cdot A_{ПГН}, \quad (4.2)$$

де $A_{ПГН} = 8.341$ – коефіцієнт посилення ПГН, який вибирається з умови, щоб максимально можливого коду ЦАП, кратному 31 (код 4092) відповідала напруга $V_{RG\max}$. В результаті точність установки V_{RG} становить 6,1mV в діапазоні від 0 до + 25V.

Сітку (3) проходять тільки ті іони, енергія яких достатня для подолання гальмуючого потенціалу, $V_{RG} + V_S$, де V_S - потенціал корпусу супутника щодо навколишньої плазми. Сітка 4 електрично екранує колектор від змінюваної напруги

V_{RG} . Сітка (5), за рахунок великого негативного потенціалу $V_{SG} = -70V$ щодо корпусу, відсікає високоенергійні електрони, одночасно прискорюючи минулі сітки (1) - (4) іони. Ці іони збираються колектором 6 і створюють в його ланцюзі струм I_i . Для ефективного збирання іонів, на колектор щодо корпусу подається негативна напруга $V_c = -20V$. Крім відсікання вхідних електронів сітка 5, за рахунок негативного потенціалу в $50V$ щодо колектора, пригнічує ток вторинних і фото-електронів з колектора, зменшуючи складову т.зв. фонового струму в сигналі I_C . В результаті струм колектора визначається виразом

$$I_C = I_i + I_b, \quad (4.3)$$

де I_i - струм іонів на колектор; I_b - залишковий фоновий струм, утворений високоенергійними зарядженими частинками, які пройшли систему сіток.

У ланцюг колектора додається струм зміщення

$$I_{BC} = V_B / R_B, \quad (4.4)$$

де $R_B=10\text{Мом}$ – резистор, що формує струм зміщення;

V_B – двухполярной напруга на виході ПР2 відносно V_C .

Напругою V_B управляє ЦАП2 МК, який перетворює вхідний код N_{DAC2} в вихідна напруга V_{DAC} по закону

$$V_{DAC2} = N_{DAC2} \cdot \Delta_{DAC}, \quad (4.5)$$

ПР2 дозволяє узгодити діапазон зміни вихідного сигналу ЦАП2 щодо корпусу з діапазоном зміни V_B (от $V_{B\min} = -4.5V$ до $V_{B\max} = +4.5V$) щодо V_C .

Характеристика передачі ПР2 має вигляд

$$V_B = A_{PV2} (V_{DAC2} - V_{DAC2_0}), \quad (4.6)$$

де $V_{DAC2_0} = V_{REF} / 2$ – рівень напруги на виході ЦАП2, відповідний $V_B = 0$;

$A_{PV2} = 3.001$ – коефіцієнт посилення ПР2, який вибирається з умови

$$A_{PV2} = V_{B\max} / (V_{DAC2\max} - V_{DAC2_0})$$

В результаті I_B може встановлюватися з квантом $0,22\text{нА}$ в діапазоні $\pm 450\text{нА}$.

Додавання струму I_B к I_c дозволяє компенсувати фоновий струм I_b в струмі колектора, або проводити тестування тракту вимірювання струму при максимальній гальмуючій напрузі, коли іонний струм практично відсутній.

Сумарний струм на вході електрометричного ПСН

$$I_{IN} = I_c + I_B = I_i + I_b \quad (4.7)$$

надходить на ПСН, який перетворює його в напругу V_a відносно V_C відповідно до виразу $V_a = -I_{IN} \cdot R_i$, (4.8)

де $R_i = R_0 / D^i$ – масштабний коефіцієнт перетворення, який визначається номером шкали ПСН ($i=0\dots3$).

$D=5$ – обраний динамічний діапазон шкал ПСН;

$R_0 = 50\text{М}$ – масштабний коефіцієнт ПСН на найбільш чутливою шкалою з $i=0$.

Примітка. параметри ПСН можуть бути змінені в ході опрацювання проекту.

Шкала ПСН вибирається МК за допомогою дискретних сигналів управління SC_i , видаються в порт ПВ. ПР1 погодить діапазон зміни V_a відносно V_C (от $V_{a\max} = +4.5\text{V}$ до $V_{a\min} = \text{мінус } 4.5\text{V}$) з діапазоном вхідного сигналу V_{ADC1} АЦП1 відносно корпусу (от 0 до $+V_{ADC1\max}$).

ПР1 перетворює вихідний сигнал ПСН за законом

$$V_{ADC1} = V_{ADC1_0} - A_{\text{ПР1}} \cdot V_a, \quad (4.9)$$

де $V_{ADC1_0} = V_{REF} / 2$ – рівень напруги на вході АЦП1, відповідний $V_a = 0$;

$V_{REF} = 3\text{V}$ – опорна напруга АЦП (збігається з ЦАП);

$A_{\text{ПР1}} = 0.333$ – коефіцієнт передачі ПР1, який визначається з умови

$$A_{\text{ПР1}} = -(V_{ADC1\max} - V_{ADC1_0}) / V_{a\min}.$$

АЦП1 МК перетворює напругу V_{ADC1} в код N_{ADC1} по закону

$$N_{ADC} = \text{int}\left(\frac{V_{ADC}}{\Delta_{ADC}}\right), \quad (4.10)$$

де $\Delta_{ADC} = \frac{V_{REF}}{2^n}$ – шаг квантования АЦП;

$V_{REF} = 3V$ – опорна напруга (подається від зовнішнього джерела);

$n=12$ – розрядність АЦП;

Діапазон вихідних кодів – від 0 до $2^n - 1$.

Діапазон входних сигналів АЦП – от 0 до $+V_{REF}$;

Параметри тракту вимірювання струму I_{IN} наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Параметри вимірювання струму для різних шкал ПСН

i	Код вибору шкали ПСН			R_i , МОм	Діапазон вимірювання струму, нА	Квант струму, нА
	SC ₁	SC ₂	SC ₃			
0	1	1	1	50	±90	0,044
1	0	1	1	10	±450	0,22
2	1	0	1	2	±2250	1,1
3	1	1	0	0,4	±11250	5,5

Принцип дії приладу зводиться до вимірювання вольтамперної характеристики (ВАХ) АГП шляхом ступінчастої зміни напруги V_{RG} за заданою програмою і вимірювання відліку струму I_{IN} в кінці кожного ступеня.

На початку кожного циклу вимірювання ВАХ МК проводити компенсацію струму I_b в сигналі I_{IN} . Для цього встановлюється максимальне V_{RG} і на найбільш чутливій шкалі ПСН ($i = 0$) підбирається ток I_{BC} при якому I_{IN} стає близьким до нуля. В результаті встановлюється $I_{BC} = -I_b$, який зберігається протягом усього циклу вимірювань. В результаті після такої компенсації I_{IN} практично збігається зі струмом I_i , що покращує виділення струму іонів на тлі фонового струму, який може досягати величини $\pm 0,45$ мкА. Після компенсації фонового струму МК здійснює вибір шкали ПСН на якій будуть проводитися вимір відліків струму ВАХ. Для цього він спочатку вибирає саму грубу шкалу ($i = 3$),

встановлює $V_{RG}=0$ (при цьому іонний струм максимальний), і шляхом послідовного перебору шкал, визначає таку, для якої $0,55V < V_a < 4.4V$. Наступні виміри струму іонів здійснюються на обраній шкалі до кінця циклу вимірювань. Після вибору шкали вимірювання струму, МК поступово змінює за заданою програмою напругу V_{RG} в діапазоні від 0 до $V_{RGmax} = 25V$. В кінці кожного ступеня V_{RG} проводиться вимір струму зі збереженням оцифрованих відліків струму в ОЗУ МК. В результаті виходить інформація про вольтамперну характеристику (ВАХ АГП) в вигляді залежності $I_{IN}(V_{RG})$.

Крім вимірювання ВАХ, на початку кожного циклу вимірювань МК за допомогою АЦП2 оцифровує контрольні сигнали про величину напруг живлення електродів АГП. Ці сигнали формуються ПРЗ і по черзі через аналоговий мультиплексор (МП) подаються на вхід АЦП2. Цифрова інформація про величину контрольованих напруг також зберігається в ОЗУ МК.

Після завершення циклу вимірювань МК за допомогою КПП через ПП видає інформацію про вимірювання, накопичену в ОЗУ МК на ССНІ супутника для передачі на Землю. Новий цикл вимірювань починається по команді, що надходить з центрального бортового комп'ютера супутника по послідовному інтерфейсу.

Всі необхідні для живлення АГП і електроніки приладу напруги створюються за допомогою ВДЖ, на який надходить напруга +5 від системи електроживлення супутника. Живлення всіх пристроїв крім МК здійснюється від багатоканального трансформаторного конвертора, який включається / вимикається по дискретному сигналу ON МК. Це дозволяє істотно знижувати споживання приладу в паузах між циклами вимірів, зменшуючи тим самим середнє енергоспоживання. Споживання приладу також може зменшуватися за рахунок зниження тактової частоти МК, або переходу останнього в сплячий режим [25].

4.4.2 Алгоритм роботи приладу під час вимірювань

При включенні живлення МК відбувається ініціалізація і тестування працездатності, встановлюється зв'язок з бортовим комп'ютером, далі прилад отримує команди від бортового комп'ютера і здійснює їх виконання.

Алгоритм роботи приладу прив'язаний до тактам тривалістю 15 мс - час встановлення сигналу ПТН.

Розглянемо алгоритм роботи приладу при здійсненні вимірювань.

1. Початок циклу вимірювань. Отримання команди від ССНІ на проведення циклу вимірювань і коду бортового часу (КБВ). Запис КБВ в файл даних. Обнулення лічильника тактів і таймера тривалості тактів.
2. Встановлення $V_{RG} = \Delta_{RG}$ (2 такта).
3. Оцифровка контрольних сигналів ($V_{RG \max}$, V_C , V_{SG} и др). Запис контрольних кодів в файл даних (1 такт).
4. Вибір найбільш чутливї шкали ($i = 0$).
5. Компенсація фонового струму I_B методом проб і помилок до рівня $I_{IN} = 0$. Запис кода I_B в кожному такті наближення в файл. (12 тактів).
6. Вимірювання залишкового фонового струму $I_{IN \min}$ і запис його коду в файл (1 такт).
7. Вибір найбільш грубої шкали ($i=3$).
8. Встановлення $V_{RG} = 0$ (2 такта).
9. Вибір шкали вимірювання (2 такти) методом послідовального приближення.
10. Сканування від 0 до $V_{RG \max}$ с грубим кроком по гальмуючого напрузі. Установка 32-х ступенів грубого сканування. Запис коду $I_{IN \min}$. Запис коду в кінці кожного ступеня в файл даних (32 такти).
11. Визначення меж і кроку точного сканування. Установка напруги V_{RG} початку точного сканування (1 такт).

12. Сканування в межах обраного діапазону точного сканування. Установка 64-х ступенів точного сканування. Запис коду $I_{IV \min}$ в кінці кожного ступеня в файл даних (64 такти).

13. Очікування команди на видачу даних циклу вимірювань.

14. Видача результатів вимірювань після виявлення команди на видачу від бортового комп'ютера.

15. Кінець циклу вимірювань.

Робота запропонованого алгоритму була перевірена шляхом комп'ютерного моделювання в пакеті Octave. На рис. 4.5 наведено приклад роботи алгоритму під час грубого і точного сканування ВАХ АГП.

Як видно з рис. 4.5 на стадії грубого сканування (32 ступені V_{rg} від 0 до 25V) були визначені межі спадаючої ділянки ВАХ для точного сканування (від 4.84V до 12.10V) в яких ВАХ була знята більш детально (64 ступені в обраному діапазоні).

Т.ч. повна тривалість циклу вимірювань ВАХ (з урахуванням компенсації фоновому струму і вибору шкал) становить $21 + 32 + 64 = 115$ тактів або 1,725 с.

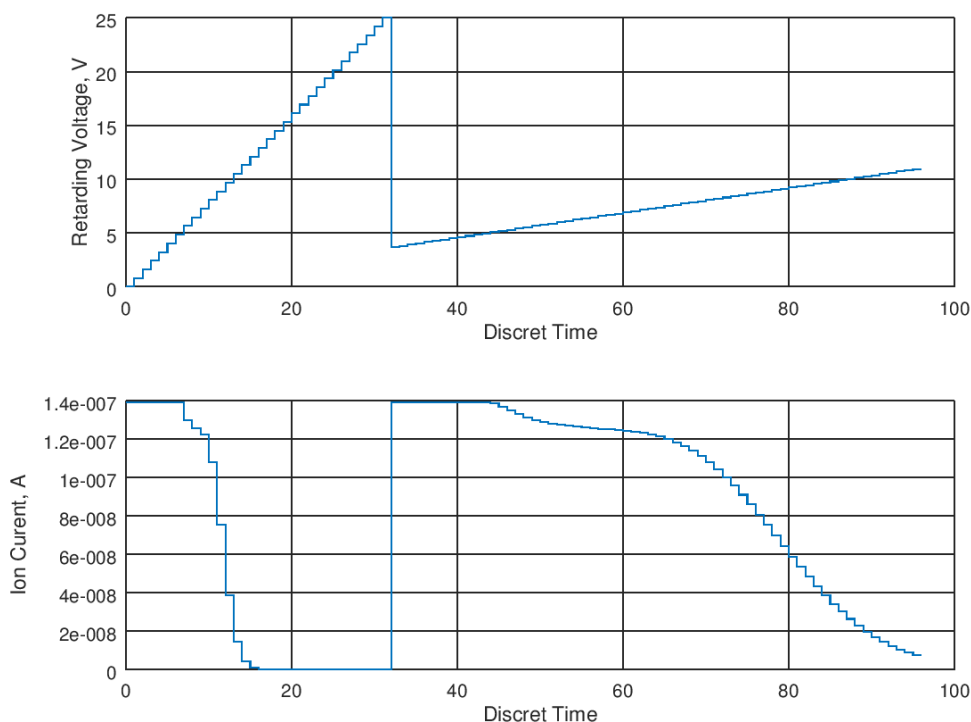


Рисунок 4.5 - Тимчасові діаграми роботи алгоритму приладу «Піон»
при знятті ВАХ АГП

4.3 Алгоритм обробки інформації приладу «Піон»

Обробка інформації приладу Піон починається з експрес-обробки даних приладу, яка зводиться до перетворення інформаційних кодів в звичні значення величин електричних сигналів, які можуть використовуватися для попередньої оцінки результатів вимірювань шляхом вивчення графічного представлення залежності ВАХ, струму компенсації від параметрів орбіти.

Розглянемо формули для таких перетворень.

Значення відліків гальмувальної напруги обчислюється за формулою

$$V_{RG} = \Delta_{RG} N_{DAC1}, \quad (4.11)$$

де $\Delta_{RG} = A_{YTH} \Delta_{ADC1}$ – квант гальмувальної напруги.

Струм зміщення може бути визначений з виразу

$$I_B = \Delta_B (N_{DAC2} - N_0), \quad (4.12)$$

де $\Delta_B = \frac{A_{IV2} \Delta_{DAC2}}{R_B}$ – квант струму зміщення;

$N_0 = N_{\max} / 2$ – код зміщення нуля.

Сумарний струм в ланцюзі колектора визначається виразом

$$I_{IN} = \Delta_{IN} D^i (N_{ADC1} - N_0), \quad (4.13)$$

де $\Delta_{IN} = \frac{|A_{IV1}| \Delta_{ADC1}}{R_0}$ – квант вхідного струму ПГН на найбільш чутливою

шкалою.

Струм колектора можна обчислити, використовуючи формулу

$$I_C = I_{IN} - I_B. \quad (4.14)$$

Оцінка параметрів іонів іоносферної плазми (масовий склад; концентрація; температура; спрямована швидкість), а також оцінка фонового струму і потенціалу супутника відносно плазми, виходить в ході наземної обробки даних приладу про ВАХ АГП. Ці оцінки виходять шляхом наближення експериментальних відліків ВАХ АГП до її математичної моделі за критерієм мінімуму суми квадратів

$$\sum_{k=1}^K [I_{c_k}(U_{r_k}) - \hat{I}_{c_k}(U_{r_k})]^2 = \min, \quad (4.15)$$

де K – число відліків ВАХ АГП;

k – номер відліку ВАХ;

U_{r_k} – занчення напруги гальмувальної сітки для k – го відліку ВАХ;

I_{c_k} – вимірянний k -й відлік струму колектору ВАХ;

$\hat{I}_{c_k}$ – розрахований за моделлю k -й відлік струму колектору АГП, що залежить від оцінок параметрів іонів, потенціалу плазми і фонового струму колектору.

Параметри іоносферної плазми задаються при розрахунку струмів $\hat{I}_{c_k}$ для яких має місце мінімум (4.15) приймаються за шукані оцінки.

Типова модель відліку струму колектору має вигляд

$$\hat{I}_{c_k}(U_{r_k}) = I_b + I_0(N_i, v) \sum_{j=1}^J i_{j_k}(U_{r_k}, n_j, m_j, T_i, \Phi_s), \quad (4.16)$$

де I_b – оцінка фонового струму колектору;

$I_0 = S \cdot Tr \cdot e \cdot N_i \cdot v$ – повний іонний струм на колеторі;

S - ефективна площа колектора (для АГП прибору Пйон порядку 50 см²);

Tr - прозорість сіток для іонів(передбачається, що однакова для різних типів іонів);

e – елементарний заряд;

N_i – оцінка загальної концетрації іонів;

v - оцінка спрямованої швидкості іонів (передбачається, що однакова для різних типів іонів);

J – число основних іонов;

j – номер типу іонов;

$i_{j_k} = \frac{I_{j_k}}{I_0}$ – k -й відлік нормованого струму j -х іонов;

$n_j = N_j / N_i$ – відносна концетрація j -х іонов;

m_j – маса j -х іонов;

T_i – абсолютна температура іонів (передбачається, що однакова для різних типів іонів);

Φ_s – потенціал корпусу супутників відносно плазми;

I_{jk} – k -й відлік струму j -х іонів на колектор.

Модель нормованого струму j -х іонів базується на розподілі Максвелла за швидкостями [33].

Для діапазону висот орбіти мікросупутників YuzhSat (від 450 до 1000 км) основними компонентами іоносферної плазми є іони H^+ , He^+ , N^+ , O^+ з очікуваними параметрами: загальна концентрація іонів - від 10^3 до 10^5 іон / cm^{-3} ; температура іонів - від 900 до 1700 К; потенціал корпусу - від 0 до мінус 10В; спрямована швидкість іонів - від 7 км/с до 9 км/с. Виходячи з цих даних, діапазон зміни гальмуючої напруги U_r обраної від 0 до 25 В. При цьому діапазон реєстрованих іонних струмів колектора становить від 10^{-11} А до 10^{-6} А. Крім іонних струмів в сигналі колектора присутній адитивний фоновий струм, який може знаходитися в діапазоні від мінус 10^{-8} А до $+10^{-8}$ А.

Для оцінки шуканих параметрів за критерієм (4.15) запропонований якого навчають алгоритм пошуку, який прискорює рішення і підвищує його достовірність [50].

4.4 Обґрунтування технічної можливості створення приладу «Піон»

4.4.1 Конструкція приладу

Конструкція приладу, адаптована для установки на CubeSat U2, показана на рис. 4.6.

За основу конструкції взята конструкція блоку датчика FIPEX для нано-супутники PolyITAN-2 КПІ [44-46].

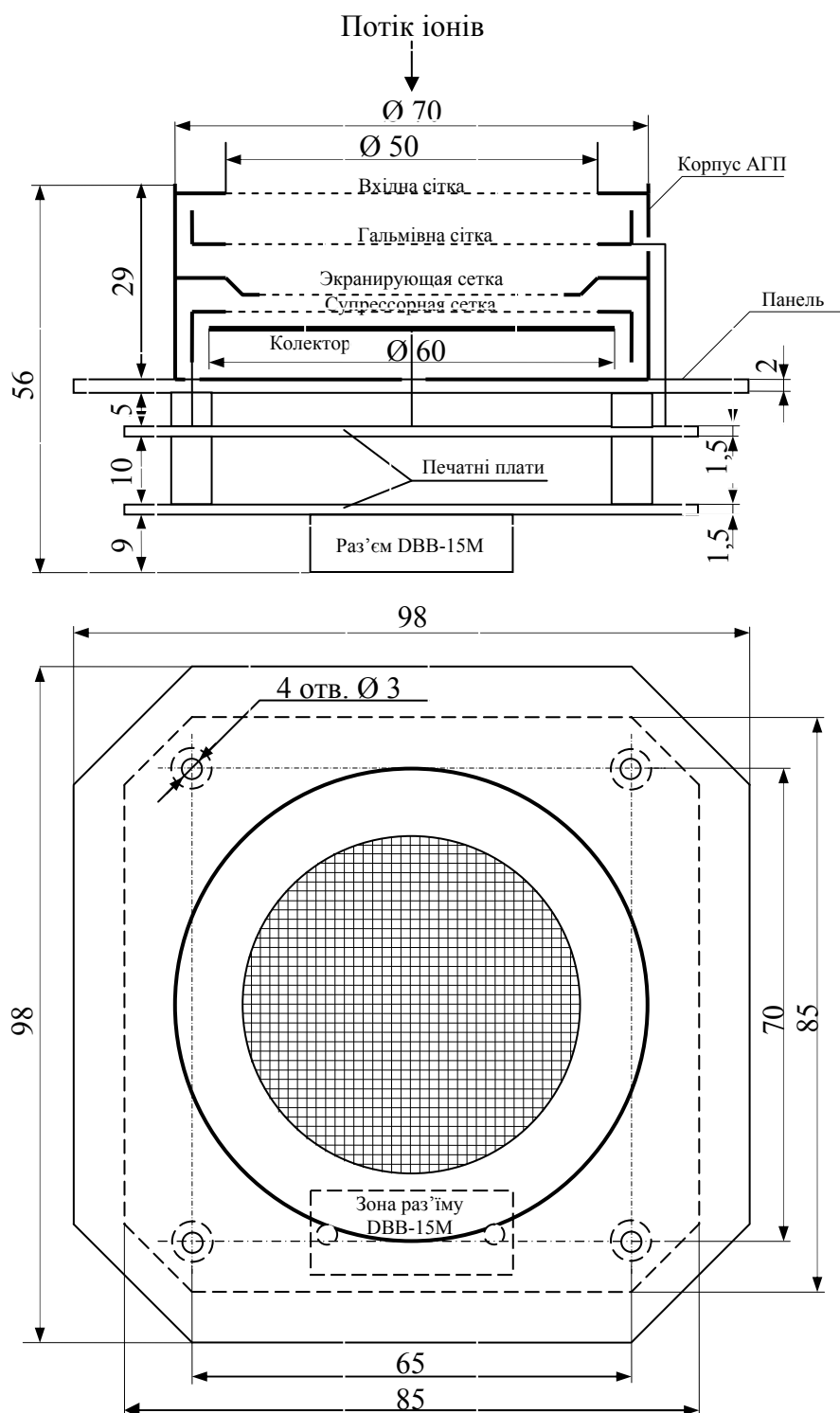


Рисунок 4.6 - Конструкція приладу «Піон»

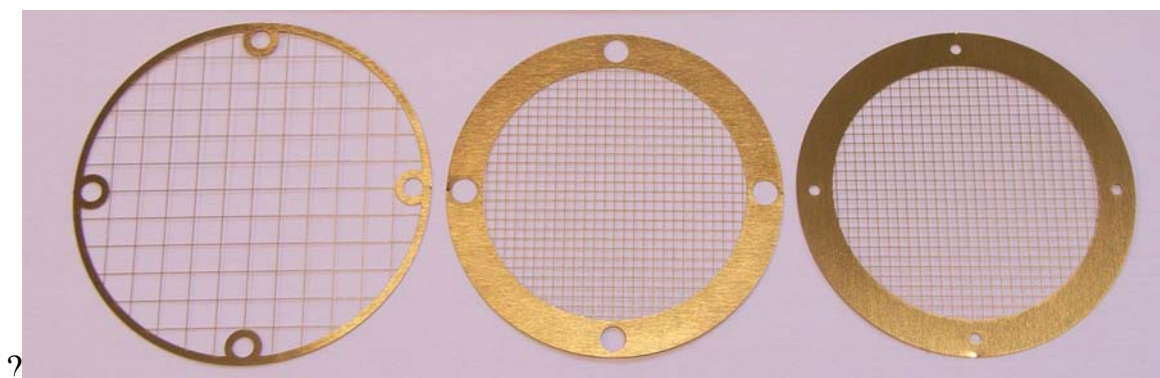
В основі конструкції лежить алюмінієва панель розміром 98x98x2 мм зі зрізаними кутами (довжина зрізу 24 мм). По центру панелі встановлюється датчик АГП діаметром 70 мм і висотою 39 мм. На рис. 4.6 показаний розріз датчика із зазначенням всіх електродів: корпус у вигляді склянки, колектор і сітки: вхідна,

гальмівна, екрануюча і супресорна. Зі зворотного боку встановлюються дві друкованих плати з електронікою приладу розміром 85x85 мм (кути зрізані паралельно зрізам панелі). Для кріплення плат в панелі виконані 4 отвори діаметром 3 мм. Плати кріпляться за допомогою шестигранних стійок висотою 5 і 10 мм і 4-х кріпильних гвинтів М3х25 з гайками. На верхній платі розміщується ПТН, ПУ1, ПУ2 і УТН. До цієї плати підключаються електроди датчика АГП. На нижній платі розміщуються інші пристрої схеми приладу і роз'єм типу DBB-15М для подачі живлення + 5V і підключення комунікаційного інтерфейсу RS-422. Плати між собою з'єднуються за допомогою роз'єму, як в стандарті PC-104.

В панелі також виконані отвори для її кріплення до конструктиву CubeSat, але вони на рис. 4.6 не показані.

Габаритні розміри приладу складають 98x98x56 мм. Маса не більше 0,5 кг.

Як впливає з рис. 4.6 датчик АГП має просту конструкцію. Для виготовлення сіток можна застосувати технологію травлення малюнка в металі, як показано на рис. 4.7.



Риунок 4.7 - Сітки АГП, виготовлені способом травлення

Таким чином, прилад має просту конструкцію і має габарити і масу, що задовольняє вимогам до корисного навантаження нано-супутників CubeSat формату 2U і вище.

4.4.2 Оцінка сумарного енергоспоживання приладу

Крім обмежень на габарити, при установці наукових приладів на борту мікросупутників, і особливо наносупутників, висуваються жорсткі обмеження на енергоспоживання приладів [53]. Для оцінки енергоспоживання приладу був здійснений вибір компонентів для реалізації електронних блоків і оцінено їх енергоспоживання.

Так, в якості МК для приладу був обраний МК типу STM32F103RCT7, струм споживання якого: при живленні + 3.3V: при частоті 24 МГц - 10мА; при частоті 72МГц - 34мА; в режимі засинання з відключеною периферією - до 0,8мА.

Як ПП був обраний драйвер ADM3491AR, струм споживання якого від джерела + 3.3V становить 5мА.

Для реалізації ПСН був обраний електрометричний ОП типу, що споживає від джерела $\pm 5V_1$ (щодо VC) струм порядку 1.5мА. Для перемикання резисторів в ланцюзі зворотного зв'язку ОП ADA4530-1 передбачається використовувати три опто-реле типу HSSR-8200 з струмом управління 3 мА від джерела +3,3.

ПР1-ПР3 передбачається реалізувати на дев'яти ОП типу AD8638. Струм живлення таких ОП становить 1,5 мА при живленні напругою $\pm 5V_a$ (три ОП в ПР1, три ОП в ПР3 і один ОП в ПР2) і $\pm 5V_1$ (два ОП в ПР2).

ПГН передбачається реалізувати на ОП типу OP1177 з струмом споживання не більше 0,7мА від джерела + 28V.

ВДЖ передбачається виконати на базі лінійного стабілізатора типу LT1963-3.3 (+ 3,3V), джерела опорного напруги + $V_{REF} = 3V$ на мікросхемі DA2 REF5030 (+ $V_{REF} = 3V$) і багатоканального трансформаторного конвертора на базі драйвера типу SN6501, який перетворює вхідну напругу + 5В в ряд напруг: $\pm 5V_a$; + 28V; - 20V; $\pm 5V_1$; -70V для живлення АГП і пристроїв схеми приладу.

В результаті підсумовування споживання всіх схем була отримана оцінка максимального споживання приладу в режимі вимірювань від джерела живлення + 5V. Вона склала не більше 512мВт при частоті МК 72 МГц. Якщо зменшити частоту МК до 24МГц, то споживання зменшується на 50 мВт. Тобто зменшення споживання приладу в режимі вимірювань до 462 мВт цілком реально. Крім цього,

треба врахувати, що відключення конвертора ВДЖа зменшує споживання до 215 мВт - при частоті МК 72МГц, і до 165мВт - при частоті МК 24МГц. А при засипанні МК, так і зовсім до 34 мВт.

Наведені оцінки споживання дозволяють зробити висновок, що розглянута реалізація приладу по енергоспоживанню цілком підходить для будь-яких наносупутників Cubesat і мікросупутників YuzhSat, включаючи формат 1U.

4.6 Висновки

1. Запропонований порядок і умови проведення космічного експерименту за допомогою приладу «Піон» дозволяє проводити такі експерименти на борту наносупутників Cubesat і мікро-супутників YuzhSat формату U2 і вище.

2. Розроблена структурна схема, конструктивні і схемні рішення можуть послужити основою для розробки діючого зразка приладу, який відповідає жорстким вимогам до бортової наукової апаратури за габаритами і енергоспоживанню для nano-супутників Cubesat і мікро-супутників YuzhSat.

3. Розроблений алгоритм роботи приладу «Піон» має високу ефективність і може послужити основою програмного забезпечення мікроконтролера приладу.

4. Розроблені алгоритми наземної обробки інформації приладу «Піон» дозволяють отримати оцінку параметрів іоносферної плазми уздовж траєкторії супутників непрямым методом.

5. Новизна приладу в порівнянні з аналогічними приладами попередніх поколінь обумовлена застосуванням сучасних схемних рішень з використанням мікроконтролера нового покоління, а також більш досконалим алгоритмом роботи приладу.

ВИСНОВКИ

Роботу виконано в повному обсязі у відповідності з технічним завданням.

Забезпечено більш детальне доопрацювання перспективних наукових проектів, які підтвердили свою актуальність, наукову новизну та можливість реалізації на малих космічних апаратах.

Додаткового опрацювання потребують наступні напрямки в проектах:

- проект "КластерІон": узгодження з ДП "КБ "Південне" технічних вимог до платформи YuzhSat і розробки конфігурації КА, а також розробка технічної документації на прилади цільового навантаження;
- проект "Мікрокосм М": розробка програми космічного експерименту та адаптація до платформи космічного апарату (мікросупутника, наносупутника);
- проект "Піон": наукова програма та програма космічного експерименту;
- проект "Планетарний пил": програма космічного експерименту, комплекс наукової апаратури та вибір платформи космічного апарату.

За результатами 2018 року рекомендується продовжити роботи за проектами для повного завершення розробок Програм космічних експериментів, Технічних пропозицій щодо наукової апаратури в повному обсязі та створення експериментальних (макетних) зразків наукової апаратури.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

До розділу 2

1. Rehders M., Grosshäuser B.B., Smarandache A., Sadhukhan A., Mirastschijski U., Kempf J., Dünne M., Slenzka K., Brix K. Effects of lunar and mars dust simulants on HaCaT keratinocytes and CHO-K1 fibroblasts. // *Adv. Space Res.* - 2011. – V. 47. – P. 1200–1213.
2. Wallace W.T., Tayler L.A., Liu Y., Cooper B.L., McKay D.S., Chen B., Jeevarajan A.S. Lunar dust and lunar simulant activation and monitoring. // *Meteorit. Planet. Sci.* - 2009. – V. 44. – P. 961–970.
3. Linnarsson D., Carpenter J., Fubini B., Gerde P., Karlsson L.L., Loftus D.J., Prisk G.K., Staufer U., Tranfield E.M., van Westrenen W. Toxicity of lunar dust. // *Planetary and Space Science.* - doi.org/10.1016/j.pss.2012.05.023.
4. Oberdörster G., Sharp Z., Atudorei V., Elder A., Gelein R., Kreyling W., Cox C. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. // *Inhal. Toxicol.* - 2004. - V. 16. – P. 437–445.
5. Wang H., Wang J., Deng X., Sun H., Shi Z., Gu Z., Liu Y., Zhao Y. Biodistribution of carbon single-wall carbon nanotubes in mice. // *J. Nanosci. Nanotech.* - 2004. – V. 4. – P. 1019–1024.
6. Takeda K., Suzuki K.I., Ishihara A., Kubo-Irie, M., Fujimoto R., Tabata M., Oshio S., Nihei Y., Ihara T., Sugamata M. Nanoparticles transferred from pregnant mice to their offspring can damage the genital and cranial nerve systems. // *J. Health Sci.* - 2009. – V. 55. – P. 95–102.
7. Bourdon J.A., Saber A.T., Jacobsen N.R., Jensen K.A., Madsen A.M., Lamson J.S., Wallin H., Møller P., Loft S., Yauk C.L., Vogel U.B. Carbon black nanoparticle instillation induces sustained inflammation and genotoxicity in mouse lung and liver. // *Part. Fibre. Toxicol.* - 2012. – V. 2. – P. 5.

8. Oberdörster G., Sharp Z., Atudorei V., Elder A., Gelein R., Kreyling W., Cox C. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. // *Inhal. Toxicol.* - 2004. - V. 16. - P. 437–445.
9. Wang H., Wang J., Deng X., Sun H., Shi Z., Gu Z., Liu Y., Zhao Y. Biodistribution of carbon single-wall carbon nanotubes in mice. // *J. Nanosci. Nanotech.* - 2004. - V. 4. - P. 1019–1024.
10. Takeda K., Suzuki K.I., Ishihara A., Kubo-Irie, M., Fujimoto R., Tabata M., Oshio S., Nihei Y., Ihara T., Sugamata M. Nanoparticles transferred from pregnant mice to their offspring can damage the genital and cranial nerve systems. // *J. Health Sci.* - 2009. - V. 55. - P. 95–102.
11. Bourdon J.A., Saber A.T., Jacobsen N.R., Jensen K.A., Madsen A.M., Lamson J.S., Wallin H., Møller P., Loft S., Yauk C.L., Vogel U.B. Carbon black nanoparticle instillation induces sustained inflammation and genotoxicity in mouse lung and liver. // *Part. Fibre. Toxicol.* - 2012. - V. 2. - P. 5.
12. Lin Y., El Goresy A., Hu S., Zhang J., Gillet P., Xu Y., Hao J., Miyahara M., Ouyang Z., Ohtan E., Xu L., Yang W., Feng L., Zhao X., Yang J. and Ozaw, S. NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars. // *Meteorit Planet Sci.* – 2014.- 49.- P. 2201–2218.
13. Garai, J., Haggerty, S.E., Rekhi, S., and Chance, M.: Infrared absorption investigations confirm the extraterrestrial origin of carbonado diamonds. // *Astrophys J.*- 2006.- 653.- L153–L156.
14. Lam CW, James JT, Latch JN, Hamilton RF Jr, Holian A. Pulmonary toxicity of simulated lunar and Martian dusts in mice: II. Biomarkers of acute responses after intratracheal instillation. // *Inhal. Toxicol.* - 2002. - V. 14. - P. 917–928.
15. Cotman C. W. Isolation of synaptosomal and synaptic plasma membrane fractions // *Meth. Enzymol.* - 1974. - V. 31. - P. 445-452.

16. Schrijver C.J., Kauristie K., Aylward A.D., Denardini C.M., Gibson S.E., Glover A., Gopalswamy N., Grande M., Hapgood M., Heynderickx D., Jakowski N., Kalegaev V.V. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILSW. *Adv. Space Res.* 2015. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>
17. Rolland L.M., Lognonn'e P., Astafyeva E., Kherani E.A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space.* 2011. V. 63, No. 7. P. 853–857
18. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф. Монография, Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2012. 555 с.
19. Скороход Т.В., Лизунов Г.В. Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия.* 2012. Т.52, №1. С. 1–6
20. Ямпольский Ю.М., Зализовский А.В., Литвиненко Л.Н., Лизунов Г.В., Грос К., Мордвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // *Радиофизика и радиоастрономия.* 2004. Т.9, №2. С. 130–151
21. Parrot M. World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite. *Annales Geophysicae.* 1990. V. 8. P. 135–145
22. Dudkin, F., V. Korepanov, D. Dudkin, V. Pilipenko, V. Pronenko, and S. Klimov. Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1–60 Hz. *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. doi: 10.1002/2015GL064595
23. The Frontier of Earthquake Prediction Studies, Ed. by M. Hayakawa, Nihon-senmontosho-Shuppan, Tokyo. 2012. 794 p.
24. Korepanov V., Lizunov G., Fedorov O., Yampolsky Yu., Ivchenko V. IONOSAT – ionospheric satellite cluster. *Adv. Space Res.* 2008. V. 42. P. 1515–1522

25. Космический проект «Ионосат-Микро»: монография, Под общ. ред. С.А. Засухи, О.П. Фёдорова. К.: Академперіодика, 2013. 218 с.
26. Hanson W.B., Heelis R.A. Techniques for measuring bulk gas motion from satellites. Space Sci. Instrum. 1975. V.1. P. 493
27. An Introduction to Space Instrumentation. Ed. by K. Oyama and C.Z. Cheng. 2012. P. 1–15
28. Ivchenko N., Pronenko V., Tidert G., Gerhard D. and SEAM Team. CubeSat for scientific mission development. The 4S Symposium 2014. – 14 p.

До розділу 4

29. Застенкер, Г.Н. Некоторые особенности изучения потоков заряженных частиц с помощью ловушек и анализаторов / Г.Н. Застенкер, М.З. Хохлов // Косм. исслед-я, 1973, №3, с.451.
30. Грингауз, К.И. Результаты измерения концентрации положительных ионов в ионосфере методом ионных ловушек на третьем советском спутнике Земли / К.И. Грингауз, В.В. Безруких, В.А. Озеров. — В кн.: Искусственные спутники Земли. — М.: Изд-во АН СССР, 1961, вып.6, с.63.
31. Грингауз К.И. и др. Исследования солнечной плазмы вблизи Марса и на трассе Земля - Марс при помощи ловушек заряженных частиц на советских космических аппаратах 1971-1973 г.г. / Космич. исслед-я, 1974, т.12, вып.3, с.430; вып.4, с.585.
32. Безруких, В.В. Исследование плазмосферы Земли при помощи ловушек на станциях "Прогноз" и "Прогноз-2" / В.В. Безруких, Г.И. Волков, К.И. Грингауз, В.С.Мокров. — В кн.: Проблемы солнечной активности и космическая система "Прогноз". — М.: Наука, 1977, с.184-195.

33. Knudsen, W. C. Retarding potential analyzer for the Pioneer-Venus Orbiter mission / W. C. Knudsen, J. C. Bakke, K. Spenser, V. Novak // Space Sci. Instrum., v.4, p. 351-372, 1979.

34. Губский, В.Ф. Аппаратура для измерения ионосферных параметров с помощью цилиндрического зонда Ленгмюра и плоского анализатора с тормозящим потенциалом на спутнике "Космос-900" / В.Ф. Губский, В.И. Жданов, В.В. Афонин, Г.И. Волков. — В.кн.: Космическое приборостроение. — М.: Наука, 1982.

35. Безруких, В. В. Исследование малоэнергичной плазмы в магнитосфере Земли на Хвостовом и Авроральном зондах. Аппаратура и предварительные результаты / В.В.Безруких, Н.А.Барабанов, Ю.И.Венедиктов, В.И.Жданов, В.И.Ивченко, Г.А.Котова, Л.А.Лежен, С.А.Оржинский, В.И.Прохоренко// Космические исследования. – 1998. -Том 36. - Вып.1. – С.33 – 41.

36. Безруких, В.В. Темпераура холодных ионов в ночном секторе плазмосферы Земли / В.В. Безруких, Г.А. Котова, М.И. Веригин, Я. Шмилауер, Ю.И. Венедиктов, Н.А. Барабанов Космична наука і технологія. - 2007. -Т.13. -№1.- С. 71-78.

37. Крисиллов, Ю.Д. Аппаратура для исследования холодной плазмы на спутнике «Прогноз-9» / Ю.Д. Крисиллов, В.В. Афонин, Н.А. Барабанов и др. // Научная аппаратура для космических исследований. — М.: Наука, 1987.

38. Барабанов, Н.А. Согласованная и оптимальная фильтрация сигнала анализатора с тормозящим потенциалом / Н.А. Барабанов, Ю.И. Венедиктов, С.Г. Довгаль, В.В. Фурда // Труды IX международной научно-практической конференции «СИЭТ-2008».- Одеса, 2008. – Т. 1, с.232.

39. Barabanov N.A., Nikolaenko V.M., Venediktov A.Yu., Selivanov A.Yu, Gdalevich G.L., Bezrukih V.V. Measurement of Energy Spectra of Ions during Space Experiment "Koltso" (The Ring) on Board International Space Station// J. Of Automation and Information Sciences (ISSN 1064-2315).- 2008. -V. 40.- No. 1.-P. 71 – 78.

40. Ямпольский Ю.С. Повышение точности дифференцирования вольт-амперных характеристик зондовых датчиков космической плазмы.

Ю.С. Ямпольский, Н.А. Барабанов // Труды X международной научно-практической конференции "СИЭТ-2009", т. 1.- Одесса, 2009.- С. 273.

41. Храмов, Д. А. Миниатюрные спутники стандарта «CubeSat» / Космічна наука і технологія. — 2009. —Т. 15. —№ 3. — С. 20–31.

42. Обзор наноспутников. — [Электронный ресурс]. —Режим доступа:<http://www.cosmos-journal.ru/articles/686/>.

43. Наноспутники КПП. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cubesat.org.ua>

44. Наноспутник PolyITAN-2 SHAU. — [Электронный ресурс]. —Режим доступа:— <http://www.cubesat.org.ua/ru/nano-satellites/polyitan-2-shau>

45. Manual for the FIPEXonQB50 Science Unit PART: Flight Model.

46. ILR-RFS_FPXQB50_MAN_1000_FM_Manual Date: 01.12.2014 Issue: 2.0.1

47. Lucy K. Fanelli. Electronics for a Versatile and Robust Retarding Potential Analyzer for use in Nano-Satellite Platforms. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/>

48. LAICE (Lower Atmosphere/Ionosphere Coupling Experiment). — [Электронный ресурс]. —Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/laice>.

49. Зализовский, А.В. Радиофизические комплексы мониторинга космической погоды в Украине и в Антарктике / А.В. Зализовский, Ю.М. Ямпольский, С.Б. Кашеев, А.В. Колосков, В.Н. Лисаченко, А.А. Сопин, В.В. Пазнухов // 17 Українська конференція з космічних досліджень. Одеса, 21–25 серпня 2017 р. Тези доповідей конференції. – Київ, 2017.– с.27.

50. Венедиктов, А.Ю. Определение наиболее рациональной стратегии скрещивания при обработке информации о свойствах космической плазмы с помощью метода основанного на эволюционных вычислениях для зонда с запирающим потенциалом / А.Ю. Венедиктов, Н.А. Барабанов, Ю.И. Венедиктов // Тези доповідей 15 Української конференції з космічних досліджень, Одеса 24-28 серпня 2015 р. – Київ: НАНУ, 2015. – С. 78.

51. Чечельницький, В.Я. Прибор "Пион" для изучения ионосферной плазмы на борту микроспутников на базе платформы Yuzhsat / В. Я. Чечельницький, А. Ю. Венедиктов, Н. А. Барабанов, Н. В. Калашников // 17 Українська конференція з космічних досліджень. Одеса, 21–25 серпня 2017 р. Тези доповідей конференції. – Київ, 2017.– с. 222.

52. Барабанов, Н. А. Перспективы использования плоского анализатора с тормозящим потенциалом для исследования ионной компоненты ионосферной плазмы на борту микроспутников на базе платформы Yuzhsat / Н. А. Барабанов, Ю. И. Венедиктов, С. Г. Довгаль, Е. В. Потоцкая // 17 Українська конференція з космічних досліджень. Одеса, 21–25 серпня 2017 р. Тези доповідей конференції. – Київ, 2017. – с. 83.

53. Венедиктов, А. Ю. Снижение энергопотребления бортового прибора для измерения параметров ионосферной плазмы / А.Ю. Венедиктов, Н.А. Барабанов, Ю.И. Венедиктов // 18 Українська конференція з космічних досліджень. Київ, 17–20 вересня 2018 р. Тези доповідей конференції. – Київ, 2018.– с. 120.

54. Kokhanov, A.B. Modified Signal-Processing Algorithms Based on the Hartley Transform / A. B. Kokhanov. V. V. Zakharov // Journal of Communications Technology and Electronics, Vol. 50, No. 12, 2005, pp. 1367–1372.

55. Коханов, А.Б. Однополосная квадратурная модуляция / Известия вузов. Радио-электроника, 2017, Т.60, №3, сс. 123-130.