

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.06.025>

УДК 629.783, 550.388

Л. Г. Банков<sup>1</sup>, С. М. Беляєв<sup>2</sup>, В. И. Иванова<sup>3</sup>,  
Г. В. Лизунов<sup>4</sup>, А. Г. Меланченко<sup>3</sup>, К.-И. Ояма<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований и технологий Болгарской академии наук

<sup>2</sup> Львовский центр Института космических исследований Национальной академии наук Украины  
и Государственного космического агентства Украины, Львов, Украина

<sup>3</sup> Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепро, Украина

<sup>4</sup> Институт космических исследований Национальной академии наук Украины  
и Государственного космического агентства Украины, Киев, Украина

<sup>5</sup> Университет Ченг-Кунг (National Cheng Kung University), Тайвань

## КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ «КЛАСТЕРИОН»: ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРА СПУТНИКОВ «YUZHSAТ»

---

С использованием космических аппаратов «YuzhSat» предлагается реализовать научный проект в области исследования земной ионосферы — проект «КластерИон». Проект задуман как ответ на вызовы, поставленные современным развитием знаний о космической погоде и об откликах ионосферы на приземные источники энерговыделения. Наряду с этим проект «КластерИон» выступает продолжением предшествующих ионосферных спутниковых миссий, таких как «Dynamics Explorer 2» (1982—1984 гг.), «Freja» (1992—1993 гг.), DEMETER (2004—2010 гг.) и ныне готовящийся эксперимент «Ионосат-Микро» на спутнике «Микросат-М». Стержневой идеей проекта «КластерИон» является создание на высотах 400—600 км кластера из нескольких (целесообразно трех) космических аппаратов, оснащённых комплексами научной аппаратуры для диагностики газоплазменных и электродинамических параметров космической среды. С этой целью предлагается адаптировать платформу «YuzhSat», по своим характеристикам оптимальную для проведения подобных измерений. Комплекс научной аппаратуры, идентичный для всех аппаратов в кластере, включает: ионный дрейфометр ID, обеспечивающий регистрацию концентрации, температуры и трёх составляющих скорости дрейфа ионного компонента плазмы; зонд температуры и концентрации электронного компонента плазмы ЕТР; магнитно-волновой комплекс МВС в составе трёхкомпонентного феррозондового магнитометра FM, трёхкомпонентного индукционного магнитометра IM и двух зондов электрического потенциала плазмы EP для регистрации одного компонента электрического поля.

**Ключевые слова:** ионосфера, космическая погода, космический эксперимент, комплекс научной аппаратуры, орбитальный кластер.

---

### АКТУАЛЬНОСТЬ И НАУЧНЫЕ ЦЕЛИ ПРОЕКТА

Общей целью проекта «КластерИон» является проведение фундаментальных исследований по физике ионосферы. Проект, в случае его успешной реализации, вызовет широкий научный и обществен-

ный резонанс, по теме проекта будут проводиться международные конференции и выделяться гранты, а в расшифровке данных проекта примут участие интернациональные группы учёных.

Актуальность осуществления проекта «КластерИон» обусловлена рядом обстоятельств, связанных, во-первых, с современным пониманием космической погоды. Международными науч-

---

© Л. Г. БАНКОВ, С. М. БЕЛЯЕВ,  
В. И. ИВАНОВА, Г. В. ЛИЗУНОВ,  
А. Г. МЕЛАНЧЕНКО, К.-И. ОЯМА, 2017

ными комитетами COSPAR и ILWS составлена дорожная карта исследований в области космической погоды [15], предусматривающая изучение и разработку прогностических моделей динамики ионосферы как основного космического фактора, влияющего на радиосвязь и точность работы глобальных навигационных спутниковых систем. В этих же интересах ведётся подготовка новых спутниковых миссий: «Ionospheric Connection Explorer» (США), «Chinese Seismo-Electromagnetic Satellite» (Китай), «Трабанти» (Россия) и др. Проект «КластерИон» лежит в русле указанных инициатив.

Другим побудительным мотивом к реализации проекта «КластерИон» является необходимость изучения ионосферных откликов на распределенные по Земному шару природные и искусственные источники энерговыделения. В последние годы опубликованы работы, где такой отклик был скрупулезно документирован — в наблюдениях за перемещающимися ионосферными возмущениями над землетрясениями и цунами [2, 3, 14], пульсациями магнитного поля Земли при движении погодных фронтов [4], излучениями линий электропередач и навигационных радиостанций, создающих в ионосфере специфический электромагнитный след [6, 13] и т. д. Специального исследования требуют данные об ионосферных предвестниках землетрясений [16].

Научный проект, направленный на систематическое изучение террагенных и антропогенных явлений в ионосфере, позволит оценить практическую возможность использования такого рода наблюдений для мониторинга земных катастроф [1, 11].

Суммируя, проект «КластерИон» ставит целью изучение динамических процессов в ионосфере для поиска взаимосвязи ионосферных возмущений с процессами на Солнце, в магнитосфере, атмосфере и внутренних оболочках Земли. В высотном слое 400—600 км будет с высоким разрешением измерено распределение плазменных параметров и электромагнитных полей УНЧ-КНЧ-ОНЧ-диапазона. Полученные данные составят экспериментальный базис для уточнения референсных моделей геокосмоса и разработки

методов прогноза индексов космической погоды. На большой статистике будет проведено исследование ионосферных откликов на факторы солнечной активности (сильные солнечные вспышки, корональные выбросы масс, магнитные бури), тектонические катаклизмы (сильные и сверхсильные землетрясения, извержения вулканов), техногенные факторы (работа линий электропередач, запуски мощных ракет-носителей и пр.).

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПРОЕКТА

Предлагаемый проект является логическим продолжением немногочисленного ряда предшествующих ионосферных миссий, опыт которых позволяет сформулировать ряд методических принципов, выражающих замысел проекта «КластерИон».

**1. Диагностика на борту одного спутника максимально полного набора параметров ионосферы.** С этой целью реализуется комплексный подбор измерительных приборов и проведение измерений всем составом научной аппаратуры. В области ионосферных исследований, по-видимому, закончились времена, когда в космическом эксперименте имело смысл регистрировать некий отдельно взятый фактор космического пространства (скажем, только вектор магнитного поля Земли или только поток энергичных частиц и т. д.). Такого рода запуски сегодня если и производятся, то носят преимущественно технологический или образовательный характер. Требования же к научному эксперименту состоят в обеспечении комплексной диагностики цельного набора газодинамических и электродинамических параметров ионосферы.

Ионосфера является замагниченной газоплазменной средой, в которой вариации нейтральных и заряженных компонентов и электромагнитного поля тесно связаны между собой. В ряде случаев интерес представляет именно изучение этой связи. Более того, измерения изолированных ионосферных параметров зачастую дезинформируют исследователя. Проиллюстрируем сказанное на примере изучения перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), известных ещё с 1940-х гг. по данным наземного зондирования ионосферы. Явление ПИВ долгое время

трактовались как сугубо плазменный процесс в ионосфере (магнитозвуковая волна, зона плазменной турбулентности и т. п.), хотя в действительности ПИВ является отображением волны нейтрального газа — атмосферной гравитационной волны (АГВ) [9]. Проверка теории АГВ-ПИВ стала возможной лишь в 1970-х гг. по данным синхронных измерений параметров нейтральных и заряженных компонент ионосферы на борту низкоорбитальных космических аппаратов (КА) [7].

**2. Реализация преимущественно мониторинговых режимов измерений с целью накопления статистически значительной выборки данных об ионосфере.** Времена «великих географических открытий» в геокосмосе также закончились. Не приходится рассчитывать на то, что эпизодические включения измерительных приборов на борту КА предоставят исследователю необходимую информацию. Задачей сегодняшнего дня является реализация длительных и систематических измерений (мониторинга) ионосферных параметров с целью накопления длинных рядов данных и применения к ним серьёзных статистических методов.

**3. Запуск ионосферного кластера. Оснащение спутников, составляющих кластер, идентичными приборными комплексами.** Реализация согласованных измерений на нескольких КА открывает новое качество диагностики ионосферы. Целью кластерных измерений являются: 1) регистрация 3D-структуры плазменных неоднородностей и волновых полей, 2) разделение пространственных и временных изменений регистрируемых параметров, 3) изучение связности (корреляции) ионосферных процессов на различных пространственных масштабах. При этом представляет интерес проведение синхронных измерений на разных высотных уровнях с целью регистрации процессов вертикального переноса энергии (вертикального каплинга) в системе атмосфера — ионосфера — магнитосфера. Следует отметить, что первый и пока единственный ионосферный кластер «Swarm» был запущен в 2013 г.

**4. Создание веб-ресурса данных проекта с целью привлечения к обработке данных международного**

**круга специалистов.** В результате реализации проекта «КластерИон» ожидается получить более терабайта научных данных, которые будут распределены между приблизительно 15 каналами регистрации физических параметров, сегментированы в записи и привязаны к индивидуальным орбитальным виткам КА. Всего будет создано несколько сотен тысяч записей данных, подлежащих расшифровке и научному анализу. Обработку информации в таких масштабах невозможно вести силами только лишь изготовителей приборов, в связи с чем в Институте космических исследований создана специальная структура — Центр сбора, обработки и распространения спутниковых данных.

Информационная система центра включает в себя службы сбора данных с серверов приёмных станций, средства их декодирования, систематизации и геопривязки, хранилище данных разных уровней обработки, пополняемое по мере реализации проекта, базу метаданных для быстрого поиска данных в хранилище, и веб-интерфейс, обеспечивающий доступ к данным удалённых пользователей.

Размещение данных проекта «КластерИон» в Интернете является приоритетом, нацеленным на вовлечение в обработку данных международного научного сообщества, как в ходе проведения проекта, так и после его завершения. Известно, что космические миссии не всегда достигают своих задекларированных целей, но зачастую приводят к открытиям, не планировавшимся их авторами. Поэтому создание должным образом организованного каталога экспериментальных результатов, доступного для широкого круга учёных-пользователей, является одним из важнейших заданий проекта.

#### КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ

Состав научной аппаратуры, идентичный для всех КА в кластере, представлен в таблице. Параметры приборов подлежат дальнейшему уточнению. Расположение измерительных датчиков на платформе «YuzhSat» требует проработки со специалистами ГП «КБ «Южное». Пояснительный вариант возможного расположения датчиков показан на рис. 1.

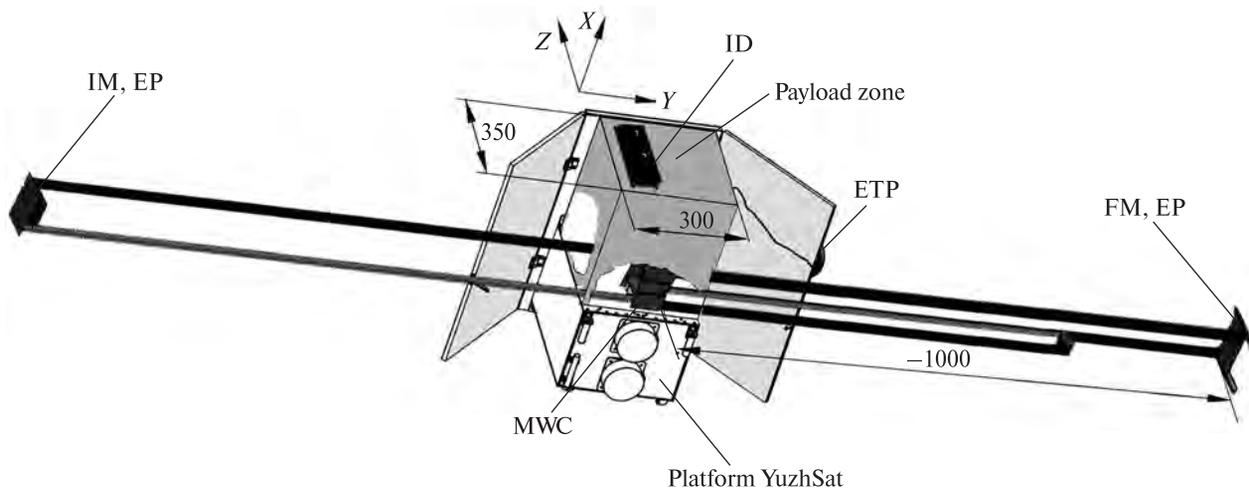


Рис. 1. Возможная установка датчиков на платформе «YuzhSat»

### Состав научной аппаратуры

Приборные комплексы	Измеряемые физические параметры / другое	Параметры приборов и требования к установке	Разработчик
Ионный дрейфометр ID	Параметры ионного компонента плазмы: концентрация, скорость, температура, спектр ионных неоднородностей	Параллелепипед — 290/90/55 мм/ менее 1.8 кг/1 Вт. Устанавливается в набегающем потоке, «смотрит» по ходу КА	Л. Г. Банков, Болгария
Зонд электронной температуры ETP	Температура и концентрация электронного компонента плазмы	Датчик — диск (диаметр 100 мм, толщина 30 мм, масса 200 г), блок электроники 300 г/1 Вт. Устанавливается произвольно (на корпусе, солнечной батарее и т. п.) вне следа КА	К.-И. Ояма, Тайвань
Феррозондовый магнитометр FM	Три составляющие магнитного поля 0...100 Гц	Датчик — куб 30/30/30 мм/40 г, блок электроники 65/65/10 мм/50 г/0.4 Вт. Устанавливается на штанге Y	С. М. Беляев, Украина
Индукционный магнитометр IM	Три составляющие магнитного поля 10 Гц ... 20 кГц	Куб 40/40/40 мм/70 г/0.2 Вт. Устанавливается на штанге Y вне следа КА	С. М. Беляев, Украина
Два электрических зонда EP	Y-составляющая электрического поля 10 Гц ... 20 кГц	Прямоугольные пластины 70/70 мм/0.06 Вт. Конструктивно совмещены с магнитометрами	С. М. Беляев, Украина
Интерфейсный модуль полезной нагрузки	Запись и предварительная обработка данных	Масса до 1.5 кг. Потребляемая мощность до 4 Вт	Подлежит уточнению
Суммарно	Масса до 5 кг, потребляемая мощность до 10 Вт, информационный поток до 500 Мбайт/сут		

Ионный дрейфометр ID предназначен для регистрации концентрации, температуры и трёх составляющих скорости дрейфа ионного компонента плазмы. Автор эксперимента Л. Г. Банков (Институт космических исследований и технологий, Болгария). Впервые прибор такого типа был установлен на спутнике COSMOS-184 [8]. В разных модификациях, совершенствуясь от проекта к проекту, аналогичные приборы устанавливались на спутниках «Dynamics Explorer 2», «Интеркосмос-Болгария-1300», «Активный», DSMP-F13, DSMP-F15, «Swarm».

В состав прибора ID входит пара датчиков IDM (собственно ионный дрейфометр) и RPA (ионная ловушка). Данные измерений позволяют рассчитать поперечную составляющую постоянного электрического поля в плазме  $\mathbf{E}_{\perp} = -\mathbf{V}_i \times \mathbf{B}$ , где  $\mathbf{V}_i$  — скорость плазменного дрейфа по данным ID,  $\mathbf{B}$  — магнитное поле по данным магнитометра FM или согласно модели магнитного поля Земли.

Зонд ETP — надёжный инструмент для измерения температуры и концентрации электронной составляющей плазмы. Автор эксперимента К.-И. Ояма (К.-И. Ояма, Университет Ченг-Кунг, Тайвань). Прибор ETP был разработан в Японии в 1970-х годах, и с тех пор использовался во многих экспериментах на борту зондирующих ракет, спутников и в Японской марсианской миссии [5].

Магнитно-волновой комплекс MWC включает трёхкомпонентный феррозондовый магнитометр FM для измерения квазипостоянного магнитного поля, трёхкомпонентный индукционный магнитометр IM для измерений переменного магнитного поля, два зонда электрического потенциала плазмы EP для регистрации 1-й составляющей переменного электрического поля. Автор эксперимента С. М. Беляев (Львовский центр Института космических исследований, Украина). Прототип прибора MWC был разработан для космической миссии «Small Explorer for Advances Mission» на платформе «CubeSat 3U» в рамках проекта 7-й Рамочной программы SEAM [10]. Сенсоры MWC устанавливаются на выдвижных керамических панелях. Штанги длиной более 1 м представляют собой упругие ленты из композитного материала, намотанные на ка-

тушки. В упакованном состоянии прототип MWC имеет вид блока 100/100/100 мм. После расчехления штанги разворачиваются под действием собственной упругости. В проекте SEAM системе штанг с механизмами разворачивания изготавливали зарубежные партнёры.

## СПУТНИКОВАЯ ПЛАТФОРМА

Как известно, тренд к миниатюризации космических аппаратов содержит в себе определённое противоречие. Чем меньше и легче КА, тем меньше его стоимость и стоимость его запуска, короче сроки создания КА, но тем жёстче ограничения на возможности размещения полезной нагрузки на его борту. Платформа «YuzhSat» кажется удачным решением этой дилеммы. Вернёмся к научным принципам, указанным выше, и сформулируем требования к спутниковой платформе:

- платформа должна нести солидный приборный комплекс,
- платформа должна быть ориентированной, поскольку датчики параметров космической среды должны находиться в зоне, невозмущённой движением КА, а некоторые из них должны «смотреть» вперёд по ходу КА,
- поскольку во главу угла ставится реализация высокоинформативных мониторинговых измерений, для передачи данных на землю необходима скоростная радиолиния X-диапазона,
- кластерные измерения предъявляют высокие требования к синхронизации шкал времени и точности позиционирования КА. В состав КА должен входить приёмник GPS,
- нужны штанги максимально возможной длины, чтобы вынести электромагнитные датчики в «чистую» зону.

Перечисленные требования в значительной мере обесценивают использование популярных ныне платформ «CubeSat 1U/2U/3U» для проведения исследований в области физики космического пространства. Платформа «YuzhSat», напротив, кажется оптимальной.

Технические требования к адаптации платформы «YuzhSat» следующие:

- ориентация с точностью до 5°, точность определения ориентации около 1°;

- радиолиния для передачи научной информации на землю — X-диапазон;
- синхронизация бортовых шкал времени КА, составляющих кластер, не хуже 0.1 мс;
- позиционирование КА с точностью до нескольких десятков метров;
- наличие двух штанг для датчиков магнитно-волнового комплекса.

### ОРБИТАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ

Возможности построения орбитального кластера, в полной мере удовлетворяющего исследовательским целям проекта, зависят от многих

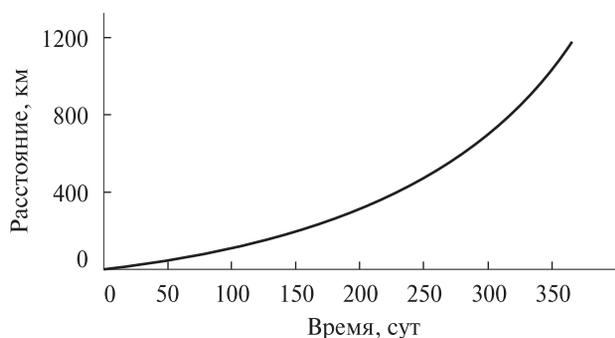


Рис. 2. Изменение взаимно-относительного расстояния КА1 — КА2

факторов: количества КА в кластере, наличия/отсутствия корректирующей двигательной установки (КДУ) на борту КА, возможностей ракеты-носителя (РН), зависящих, в свою очередь, от финансирования проекта. В ходе проектирования будет разработан сценарий создания орбитальной группировки с учетом указанных факторов.

Как иллюстрацию опишем один из возможных вариантов: запуск одной РН кластера из трех КА без КДУ:

- два аппарата КА1 и КА2 выводятся РН на близкие околокруговые орбиты, высота которых обеспечит полёт КА в течение 2-летнего срока гарантийного функционирования платформы «YuzhSat». Согласно предварительным оценкам, если начальная высота орбит КА составит 450 км, то под действием тормозящего влияния атмосферы через два года аппараты снизятся в область плотной ионосферы 250—350 км;

- величина и направление импульсов отделения, а также интервал времени между отделением КА1 и КА2 выбираются так, чтобы обеспечить гарантированное их несовпадение и небольшую скорость расхождения вдоль орбиты (к

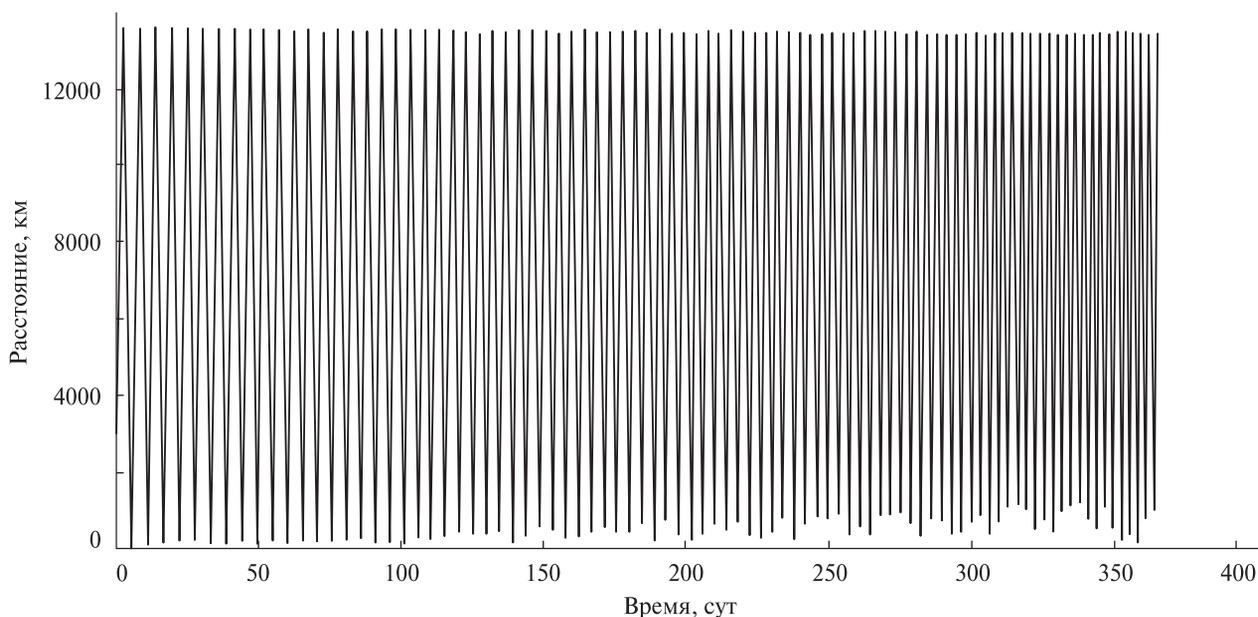


Рис. 3. Изменение взаимно-относительного расстояния КА1 — КА3

концу двухлетнего периода функционирования расстояние между КА1 и КА2 должно быть порядка нескольких тысяч километров);

- КА3 выводится РН на околокруговую орбиту высотой около 600 км. Вследствие различия периодов обращения вокруг Земли КА3 систематически сближается с парой КА1, КА2 и удаляется от неё на другую сторону геоида.

В данной конфигурации пара КА1 и КА2 реализует двухточечную диагностику параметров ионосферы в диапазоне от мелких до крупных масштабов ионосферных возмущений. Предназначение КА3 состоит в проведении аналогичных измерений на другом высотном уровне. Изменение взаимно-относительного расстояния между КА представлено на рис. 2 и 3.

В настоящее время Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля ведет работы, направленные на создание компактной КДУ, пригодной для размещения на борту платформы «YuzhSat». Если эти работы будут завершены к началу реализации проекта, станет возможным осуществление поддержания и целенаправленного изменения конфигурации кластера непосредственно в процессе его орбитальной эксплуатации [12].

## ПРОДВИЖЕНИЕ ПРОЕКТА

На момент публикации данной статьи проект «КластерИон» выиграл конкурс предложений полезных нагрузок для платформы «YuzhSat», проведенный Советом по космическим исследованиям НАН Украины. Уже в текущем году будут предприняты шаги, чтобы перевести реализацию проекта «КластерИон» в практическую плоскость. Будет проведено рабочее совещание членов научной кооперации проекта с участием представителей ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля» с целью определить окончательный облик КА, конфигурацию орбитального кластера и установить план-график подготовки проекта. Будут приложены усилия к включению проекта в планы НАН Украины и ГКА Украины, и поиску источников финансирования проекта. Будет проведен анализ вариантов запуска.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Космический проект «Ионосат-Микро»: монография / Под общ. ред. С. А. Засухи, О. П. Фёдорова. — Киев: Академперіодика, 2013. — 218 с.
2. Скороход Т. В., Лизунов Г. В. Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере // Геомагнетизм и аэрномия. — 2012. — 52, № 1. — С. 1—6.
3. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф: Монография. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012. — 555 с.
4. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. — 2004. — 9, № 2. — С. 130—151.
5. *An Introduction to Space Instrumentation* / Ed. by K. Oyama, C. Z. Cheng. — 2012. — P. 1—15.
6. Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., et al. 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. — 42. — doi: 10.1002/2015GL064595
7. Gross S. H., Reber C. A., Huang F. T. Large-scale waves in the thermosphere observed by the AE-C satellite // *The Transactions on Geoscience and Remote sensing.* — 1984. — GE-22, N 4. — P. 340—351.
8. Hanson W. B., Heelis R. A. Techniques for measuring bulk gas motion from satellites // *Space Sci. Instrum.* — 1975. — 1. — P. 493.
9. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.* — 1960. — 38. — P. 1441—1481.
10. Ivchenko N., Pronenko V., Tidert G., Gerhard D., and SEAM Team. CubeSat for scientific mission development // *The 4S Symposium 2014.* — 14 p.
11. Korepanov V., Lizunov G., Fedorov O., et al. IONOSAT — ionospheric satellite cluster // *Adv. Space Res.* — 2008. — 42. — P. 1515—1522.
12. Melanchenko A., Nesevrya I. Methods of spacecraft formation flying translation motion control // 5th International conference «Space Technologies: Present and Future»: Presentation Theses. — 2015. — P. 110.
13. Parrot M. World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite // *Annales Geophysicae.* — 1990. — 8. — P. 135—145.
14. Rolland L. M., Lognonn'e P., Astafyeva E., et al. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth Planets Space.* — 2011. — 63, N 7. — P. 853—857.
15. Schrijver C. J., Kauristie K., Aylward A. D., et al. 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>
16. *The Frontier of Earthquake Prediction Studies* / Ed. by M. Hayakawa. — Nihon-senmontosho-Shuppan, Tokyo, 2012. — 794 p.

Стаття надійшла до редакції 21.09.17

REFERENCES

1. Zasukha S. A., Fedorov O. P. (Eds.) Space project «Ionosat-Micro»: monograph (Academperiodica, Kyiv, 2013).
2. Skorokhod T. V., Lizunov G. V. Localized packets of acoustic-gravity waves in the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, **52** (1), 88–93 (2012).
3. Chernogor L. F. Physics and ecology of catastrophes: Monograph, 555 p. (KhNU named after V. N. Karazin, Kharkov, 2012) [In Russian].
4. Yampolski Yu. M., Zalizovski A. V., Litvinenko L. N., et al. Magnetic field variations in Antarctica and the conjugate region (New England) stimulated by cyclone activity. *Radiophysics and Radioastronomy*, **9** (2) 130–151 (2004) [In Russian].
5. Oyama K., Cheng C. Z. (Eds.) An Introduction to Space Instrumentation, 1–15 (2012).
6. Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., et al. 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.*, **42**, (2015), doi: 10.1002/2015GL064595
7. Gross S. H., Reber C. A., Huang F. T. Large-scale waves in the thermosphere observed by the AE-C satellite. *The Transactions on Geoscience and Remote sensing*, **GE-22** (4), 340–351 (1984).
8. Hanson W. B., Heelis R. A. Techniques for measuring bulk gas motion from satellites. *Space Sci. Instrum.*, **1**, 493 (1975).
9. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.*, **38**, 1441–1481 (1960).
10. Ivchenko N., Pronenko V., Tidert G., Gerhard D., and SEAM Team. CubeSat for scientific mission development. The 4S Symposium, (2014).
11. Korepanov V., Lizunov G., Fedorov O., et al. IONOSAT — ionospheric satellite cluster. *Adv. Space Res.*, **42**, 1515–1522 (2008).
12. Melanchenko A., Nesevrya I. Methods of spacecraft formation flying translation motion control. 5th International conference «Space Technologies: Present and Future», Presentation Theses., 110 (2015).
13. Parrot M. World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite. *Annales Geophysicae*, **8**, 135–145 (1990).
14. Rolland L. M., Lognonn'e P., Astafyeva E., et al. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63** (7), 853–857 (2011).
15. Schrijver C. J., Kauristie K., Aylward A. D., et al. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILSW. *Adv. Space Res.* (2015) Mode of access: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>
16. Hayakawa M. (Ed.) The Frontier of Earthquake Prediction Studies, 794 p., Nihon-senmontosho-Shuppan, Tokyo, 2012.

Received 21.09.17

Л. Г. Банков<sup>1</sup>, С. М. Беляев<sup>2</sup>, В. И. Иванова<sup>3</sup>,  
Г. В. Лизунов<sup>4</sup>, А. Г. Меланченко<sup>3</sup>, К.-И. Ояма<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Інститут космічних досліджень і технологій  
Болгарської академії наук

<sup>2</sup> Львівський центр Інституту космічних досліджень  
Національної академії наук України та Державного  
космічного агентства України, Львів, Україна

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

<sup>4</sup> Інститут космічних досліджень Національної  
академії наук України та Державного космічного  
агентства України, Київ, Україна

<sup>5</sup> Університет Ченг-Кунг (National Cheng Kung  
University), Тайвань

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

З використанням космічних апаратів «YuzhSat» пропонується реалізувати науковий проект в області дослідження земної іоносфери — проект «КластерІон». Проект задуманий як відповідь на виклики, поставлені сучасним розвитком знань про космічну погоду і про відгуки іоносфери на приземні джерела енерговиділення. Поряд з цим проект «КластерІон» виступає продовженням попередніх іоносферних супутникових місій, таких як «Dynamics Explorer 2» (1982–1984 рр.), «Freja» (1992–1993 рр.), DEMETER (2004–2010 рр.) та експеримент «Іоносат-Мікро» на супутнику «Мікросат-М», що готується до запуску. Стрижневою ідеєю проекту «КластерІон» є створення на іоносферних висотах кластера з декількох (доцільно трьох) космічних апаратів, оснащених комплексами наукової апаратури для діагностики газоплазмових і електродинамічних параметрів космічної середовища. З цією метою пропонується адаптувати платформу «YuzhSat», яка за своїми характеристиками є оптимальною для проведення подібних вимірювань. Комплекс наукової апаратури, ідентичний для всіх апаратів у кластері, включає: іонний дрейфометр ІД, що забезпечує реєстрацію концентрації, температури і трьох складових швидкості дрейфу іонного компонента плазми; зонд температури і концентрації електронного компонента плазми ЕТР; магнітно-хвильовий комплекс МWC у складі трикомпонентного ферозондового магнітометра FM, трикомпонентного індукційного магнітометра ІМ та двох зондів електричного потенціалу плази ЕР для реєстрації однієї складової електричного поля.

**Ключові слова:** іоносфера, космічна погода, космічний експеримент, комплекс наукової апаратури, орбітальний кластер.

L. G. Bankov<sup>1</sup>, S. M. Belyayev<sup>2</sup>, V. I. Ivanova<sup>3</sup>,  
G. V. Lizunov<sup>4</sup>, A. G. Melanchenko<sup>3</sup>, K.-I. Oyama<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Space Research and Technology Institute of Bulgarian Academy of Sciences

<sup>2</sup> Lviv Centre of Institute for Space Research of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Lviv, Ukraine

<sup>3</sup> Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine

<sup>4</sup> Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>5</sup> National Cheng Kung University, Taiwan

SPACE MISSION “CLUSTERION”:  
INVESTIGATION OF THE DYNAMICAL  
PROCESSES IN THE IONOSPHERE USING  
A CLUSTER OF “YUZHSTAT” SATELLITES

The “ClusterIon” is a fundamental scientific project devoted to the study of near-Earth space. The project is a response to the challenges posed by the modern development

of knowledge about the Space Weather and the ionospheric responses to distributed over the globe natural and artificial sources of energy. Along with this, the project “ClusterIon” is a logical continuation of previous ionospheric missions realized throughout the space age, such as Dynamics Explorer 2 (1982—1984), Freja (1992—1993), DEMETER (2004—2010) as well as the upcoming “Ionosat-Micro” experiment onboard the “Microsat-M” satellite. The main innovation of the project is the launching into the ionosphere of a cluster of several (presumably 3) spacecraft equipped with identical sets of scientific instruments in order to provide simultaneous measurement of gas-plasma and electrodynamic parameters of the ionosphere. “ClusterIon” payload composition: Ion drift-meter ID, Electron temperature and concentration probe ETP; Magneto-Wave Complex MWC, including vector flux-gate magnetometer FGM, vector search-coil magnetometer IM and 2 electric potential probes EP.

**Keywords:** ionosphere, space weather, space experiment, scientific instrumentation set, orbital cluster.