
КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ «ИОНОСАТ-МИКРО»: ЦЕЛИ И МЕТОДЫ

Г.В. ЛИЗУНОВ, А.А. ЛУКЕНЮК, А.Л. МАКАРОВ, О.П. ФЁДОРОВ

Общие сведения о проекте

«Ионосат-Микро» — это космический проект, предусмотренный Общегосударственной целевой научно-технической космической программой Украины на 2013—2017 годы. Его осуществление является этапом создания космической системы «Ионосат» в составе трёх низкоорбитальных микроспутников для многопозиционного мониторинга ионосферных параметров [1].

Проект «Ионосат-Микро» ставит целью исследование динамических процессов в ионосфере в широком диапазоне пространственных и временных масштабов с помощью согласованных космических и наземных измерений, поиск взаимосвязи ионосферных возмущений с процессами на Солнце, в магнитосфере, атмосфере и внутренних оболочках Земли. Кроме того, задачами проекта являются:

- Создание и апробация комплекса научной аппаратуры (КНА) для диагностики газокINETических и электродинамических параметров ионосферы;
- Отработка в натурном эксперименте методик ионосферного мониторинга, проверка технических решений при создании приборов полезной нагрузки и систем функционирования микроспутниковой платформы;
- Создание веб-ресурса для обработки, хранения и распространения результатов проекта. Включение полученной научной информации в базы данных глобальных геоинформационных систем. Создание виртуальной обсерватории для изучения динамики ионосферы широким кругом учёных, преподавателей, студентов, других интересующихся лиц;
- Внедрение результатов проекта в образовательный процесс, популяризация космических исследований в Украине.

Актуальность осуществления проекта «Ионосат-Микро» обусловлена рядом обстоятельств, связанных, во-первых, с необходимостью систематического наблюдения ионосферных проявлений космической погоды и уточнения моделей околоземного космической среды (геокосмоса). Ионосфера уже сегодня стала «средой обитания» Международной космической станции (МКС) и многочисленных космических аппаратов (КА), обеспечивающих навигацию, телекоммуникацию, наблюдение Земли из космоса и т.д., причём группировка искусственных спутников Земли продолжает возрастать. Функ-



ционирование и работоспособность систем космического базирования прямо зависит от космических факторов (так, например, вариации полного электронного содержания ионосферы ограничивают точность работы глобальных систем позиционирования и навигации, атмосферные возмущения при воздействии солнечных вспышек нарушают траектории низкоорбитальных КА и т.д.), что диктует необходимость перманентного контроля и своевременного прогнозирования изменений космических условий.

Ещё одним стимулом к реализации проекта является нарастание экологических рисков, связанных с техногенным «давлением» на геокосмос — химическим загрязнением околоземного космического пространства, космическим мусором, воздействием электромагнитного излучения линий электропередач на радиационные пояса и космическую плазму [2], ионосферными эффектами стартов ракет и т.д. [3, 4, 5, 6].

Огромный научный интерес и практическую важность имеет также выявление и анализ ионосферного отклика на природные катаклизмы. В последние годы опубликованы работы, где такой отклик был скрупулезно документирован — в наблюдениях за перемещающимися ионосферными возмущениями над землетрясениями и цунами [7, 8], пульсациями магнитного поля Земли при движении погодных фронтов [9] и т.д. Специального исследования требуют данные об ионосферных предвестниках землетрясений. Научный проект, направленный на систематическое изучение воздействий на ионосферу снизу, позволит оценить практическую возможность использования такого рода наблюдений для мониторинга земных природных и техногенных катастроф.

Своевременность реализации проекта «Ионосат-Микро» обусловлена ещё тем обстоятельством, что, после прекращения в 2010 г. работы спутника DEMETER, на орбите не осталось аппаратов, осуществляющих комплексный мониторинг состояния ионосферы (ныне действующие спутники «Чибис», DSMP-F15 и др. обладают сравнительно небольшими диагностическими возможностями). Проект «Ионосат-Микро» призван заполнить этот пробел.

Проведение проекта «Ионосат-Микро» будет способствовать дальнейшему развитию и популяризации космических исследований в Украине. Проект продолжает серию отечественных космических проектов «Предупреждение» (не реализован), «Вариант» на КА «Сич-1М» (запущен в 2004 г.), «Потенциал» на КА «Сич-2» (запущен в 2011 г.) и служит подготовительным этапом к созданию ионосферного кластера «Ионосат» (реализация после 2017 г.).

КНА «Ионосат-Микро» устанавливается на спутниковую платформу «Микросат-М», разработанную в ГП «КБ «Южное» для проведения научных и технологических экспериментов. Запуск планируется ориентировочно в 2014 году с космодрома Алкантара первым стартом украинской ракеты-носителя «Циклон-4». Планируемая орбита — циркулярная, солнечно-синхронная в диапазоне значений местного солнечного времени 10...11 час, с наклоном $i = 98^\circ$ и высотой 600...700 км (дата запуска и параметры орбиты будут уточняться).

Научное обоснование

Ионосфера — это специфическая область околоземного космического пространства, отделяющая нейтральную атмосферу от вышележащей высокоионизированной магнитосферы. Ионосфера демонстрирует сильный и разнообразный отклик на солнечную и магнитную активность. Стимулируемые активным Солнцем ионосферные возмущения являются неотъемлемой частью комплекса явлений, обозначаемых совокупным термином «космическая погода». По-видимому, начиная с международного геофизического года (1957–1958 гг.) одной из главных задач ионосферных наблюдений стало изучение ионосферы как звена цепочки солнечно-земных связей.

Наряду с этим, ионосфера представляет собой зону, через которую происходит воздействие Земли на ближний космос. На состояние ионосферы локально влияют геофизические процессы — ураганы, цунами, землетрясения, вероятно, процессы подготовки землетрясений, другие природные катаклизмы, а также техногенные факторы — старты ракет, мощные взрывы, работа линий электропередач и пр. Систематические и долгосрочные измерения параметров ионосферы — ключ к статистически обоснованному изучению механизмов формирования ионосферного отклика на воздействия «сверху» и «снизу».

Наиболее информативными являются измерения параметров ионосферы *in situ* — с помощью запускаемых «внутрь ионосферы» КА. Удобной платформой для проведения таких наблюдений, казалось бы, может служить МКС с высотой орбиты около 350 км, но высокий уровень собственных электромагнитных шумов и сильное аэродинамическое воздействие конструкции МКС на окружающую атмосферу затрудняют или даже делают невозможной регистрацию на ней природных атмосферно-ионосферных вариаций.

За всю космическую эру было запущено около 20 «ионосферных» спутников (приближенность цифры связана с условностью дефиниции — какой именно спутник считать ионосферным). По результатам проведенных на них измерений была в основном установлена морфологическая структура геокосмоса. Огромный объем спутниковых данных был интегрирован в типовые модели (reference model) верхней атмосферы, ионосферы и магнитосферы, при этом новые данные используются для уточнения старых и разработки новых моделей. Начиная с 80-х годов предыдущего столетия и по сегодняшний день, основное внимание постановщиков космических экспериментов уделяется регистрации динамических процессов в геокосмосе (что нашло отражение в названии проекта НАСА «**Dynamics Explorer**»).

В таблице 1 перечислены наиболее значимые космические миссии, вошедшие «в анналы» ионосферных исследований [11]. Указаны только крупные проекты, ставившие целью всестороннюю диагностику параметров ионосферной среды. В таблице не отражены узконаправленные эксперименты, со сравнительно ограниченным составом аппаратуры. Также не показаны проекты



UARS и TIMED, развивающие отдельную сюжетную линию ионосферных исследований, — не контактных, а дистанционных оптических измерений атмосферно-ионосферных параметров.

Данные, приведенные в табл. 1, свидетельствуют, прежде всего, о том, что ионосферных спутников было немного (гораздо меньше, чем магнитосферных и гелиофизических). Уже поэтому каждый новый ионосферный эксперимент актуален, что, в частности, показал огромный международный резонанс проекта DEMETER.

Таблица 1

Атмосферно-ионосферно-магнитосферные спутниковые проекты

Проект	Год	Орбита	Полезная нагрузка
Atmosphere Explorer – A	1963	255—916 км, $i = 57^\circ$	Датчики нейтральных и ионизированных составляющих атмосферных газов
Atmosphere Explorer – B	1966	276—2725 км, $i = 64^\circ$	То же
Atmosphere Explorer – C	1973	149—4294 км, $i = 68^\circ$	Датчики нейтральных и ионизированных составляющих атмосферных газов, оптический и УФ спектрометр
Atmosphere Explorer – D	1975	154—3816 км, $i = 90^\circ$	То же
Atmosphere Explorer – E	1975	156—2983 км, $i = 20^\circ$	« «
Dynamics Explorer 2	1981	309—1012 км, $i = 90^\circ$	Датчики нейтральных и ионизированных составляющих атмосферных газов, оптический и УФ спектрометр, датчики квазипостоянного магнитного поля, постоянного и переменного электрического поля
SAN MARCO D/L	1988	262—619 км, $i = 2^\circ$	Датчики скорости нейтрального ветра, датчики плазмы и электрического поля
Active	1989	500—2500 км, $i = 82^\circ$	Датчики плазмы, квазипостоянного электрического и магнитного поля, волновые зонды, датчики энергичных частиц, ОНЧ-передатчик
APEX	1991	440—3000 км, $i = 82^\circ$	Датчики плазмы, квазипостоянного электрического и магнитного поля, волновые зонды, датчики энергичных частиц, ОНЧ-передатчик, инжекторы электронных и плазменных пучков
FREJA	1992	650—1800 км, $i = 65^\circ$	Датчики плазмы, УФ спектрометр, высокоинформативные волновые зонды, датчики энергичных частиц
CHAMP	2000	454 км, $i = 87^\circ$	Датчики магнитного поля, плотности и скорости дрейфа плазмы, прецизионный акселерометр
DEMETER	2004	710 км, снижена до 660 км, $i = 98^\circ$	Датчики плазмы, электрического поля и переменного магнитного поля

Также следует отметить, что за всю космическую эру не был запущен ионосферный кластер, хотя в это же время в магнитосфере один за другим проводились многоспутниковые проекты «Interball», «Cluster», «Themis».

С пониманием указанных обстоятельств сегодня в мире готовится к осуществлению несколько спутниковых миссий, по замыслу близких к предлагаемому здесь проекту «Ионосат-Микро»: казахстанский ОМИР, китайский CSES, европейский «Swarm» и ряд других. Проект «Swarm», запуск которого планируется в 2014 г., ставит целью создание кластера в составе трёх малых спутников, полезная нагрузка которых включает магнитометры для прецизионного измерения магнитного поля Земли, дрейфометр для измерения плотности и скорости плазмы, а также сверхчувствительный акселерометр, позволяющий по вариациям скорости КА детектировать крупномасштабные неоднородности нейтральной атмосферы. Хотя декларируемой целью проекта «Swarm» является изучение магнитного поля Земли, де-факто, в этом проекте будет осуществляться высокоточная диагностика квазистационарных электромагнитных структур и плазменных неоднородностей. Данные проектов «Swarm» и «Ионосат-Микро» смогут дополнить друг друга.

Важным элементом планирования космических экспериментов является подбор режимов включения измерительной аппаратуры. Существует две базовые стратегии, на основе которых строятся реальные циклограммы измерений: 1) длительные измерения с низкой частотой дискретизации данных (а значит, с относительно низким пространственным и временным разрешением измеряемых параметров), 2) короткие «вспышечные» измерения с высокой частотой дискретизации.

Низкочастотные режимы преследуют идею мониторинга, когда регистрируются длинные ряды однотипных данных, позволяющие строить «правильную» статистику наблюдений. Высокочастотные же режимы включаются на отдельных участках орбиты, создавая максимально эффективную диагностику событий — это реализация идеи «case study». Однако платой за высокую информативность вспышечных режимов становится потеря картины явлений в целом. Следует констатировать, что начиная с проекта «Freja» увлечение фрагментарными измерениями происходит с ущербом геофизическому мониторингу. Так, на спутнике «Freja» была реализована частота дискретизации 8 МГц, что позволило впервые зарегистрировать волновые формы высокочастотных типов плазменных волн (при этом была выявлена тонкая структура плазменных колебаний — ленгмюровские волновые пакеты). Но измерительная аппаратура на «Freja» включалась только в полярных шапках и выключалась в области средних и низких широт. В другом крупном проекте DEMETER измерения, наоборот, проводились в области средних и низких широт, строго ниже 70° широты. В обоих проектах предпочтение было отдано высокоинформативным, но фрагментарным измерениям. Проект «Ионосат-Микро» ставит целью реализовать сбалансированную последовательность вспышечных и мониторинговых режимов.



С современных позиций космический эксперимент нельзя считать завершённым, пока не создан веб-ресурс его данных. Ведущие космические организации даже создают веб-сайты отдельных приборов. Иллюстрацией роли, которую информационные технологии играют в формировании «импакт-факторов» недавних и старых космических миссий, может служить сравнение судеб двух постсоветских проектов АРЕХ и «Interball». Спутник АРЕХ был запущен в 1991 г. — до появления Интернета на пространстве СССР. Данные этого проекта накапливались в ИЗМИРАН на носителях на магнитных лентах. В таком виде они хранятся до сих пор. Лишь незначительная часть переданных с борта данных была обработана и использована для проведения собственно научных изысканий (да и то, в основном, только самими изготовителями приборов).

Проект «Interball» стартовал четыре года спустя в 1995 г., когда Интернет уже прочно вошёл в жизнь академии наук. «Interball» имел гигантский международный успех, одной из составляющих которого, по общему мнению, явилась политика обнародования результатов измерений, предоставляемых конечным пользователям через ftp-сервер с авторизированным доступом.

Резюмируя, выделим приоритеты современных спутниковых исследований ионосферы, положенные в основу замысла проекта «Ионосат-Микро»:

1. Изучение морфологической структуры околоземного космоса — высотного, широтного, суточного и т.д. хода космических параметров. На этой основе — уточнение и разработка моделей верхней атмосферы, ионосферы и магнитного поля Земли;
2. Изучение динамических процессов в ионосфере как проявления солнечно-земных связей. Диагностика и моделирование космической погоды;
3. Изучение отклика ионосферы на воздействия «снизу». Мониторинг ионосферных проявлений природных и техногенных катастроф, других мощных источников энерговыделения.

Комплекс научной аппаратуры

Основными, прорабатываемыми на сегодняшний день, задачами научных измерений в рамках проекта «Ионосат-Микро» являются регистрация в ионосфере:

- Пространственно-временной структуры и глобального распределения неоднородностей в нейтральном газе и плазме;
- Структуры и динамики ионосферно-магнитосферных токовых систем и магнитного поля Земли;
- Электромагнитных волновых структур и плазменной турбулентности в широком диапазоне пространственных и временных масштабов.

Существующая в Украине приборостроительная база позволяет изготовить большую часть аппаратуры, необходимой для проведения указанных измерений. Так, в Львовском центре Института космических исследований НАНУ

и ГКАУ (ЛЦ ИКИ) создан комплекс инструментов для электромагнитных измерений в космосе. В числе апробированных в предшествующих космических экспериментах образцов следует назвать зонд электрического потенциала космической плазмы ЕР (от «Electric Probe»), индукционные магнитометры в составе прибора WP (см. ниже) и феррозондовый магнитометр FGM (от «Flux Gate Magnetometer»).

Специфика регистрации волновых процессов на борту спутника заключается в том, что вследствие эффекта Доплера детектируется смещённая частота волны: $\omega' = \omega - k_x V_{sc}$, где ω — частота в покоящейся системе отсчета, k_x — компонента волнового вектора вдоль траектории КА, V_{sc} — орбитальная скорость. При этом «истинная» частота ω и волновое число k_x по отдельности не определены, эта неоднозначность известна в литературе как проблема разделения временных и пространственных вариаций. Олег Вайсберг впервые указал возможность расчета полного спектра плазменных волн $\{\omega, k_x, k_y, k_z\}$ по данным измерений плотности электрического тока, индукции магнитного поля и/или напряженности электрического поля на одном КА [11]. Однако практическая реализация методики Вайсберга сталкивается с трудностями. Долгое время существовал единственный используемый в космосе датчик тока — «цилиндр Фарадея». Потом специалистами из львовского Физико-механического института и московского Института космических исследований был совместно разработан прибор нового типа — волновой зонд WP (от «Wave Probe»), предназначенный для регистрации потенциала электрического поля, магнитного поля и плотности тока, т.е. набора величин, необходимых для восстановления спектра волн «по Вайсбергу». Волновой зонд соединяет в единую измерительную схему электрический зонд, индукционный магнитометр и датчик тока — шелевой зонд Ленгмюра. Валидация прибора WP была проведена в эксперименте «Вариант» на КА «Сич-1М» [12].

Комплекс аппаратуры для измерения газокинетических параметров ионосферы — концентрации и температуры нейтральных и ионизированных газов — разработан в Институте технической механики НАНУ и ГКАУ (ИТМ). При этом основную трудность и, одновременно, интерес представляет создание прибора для диагностики нейтрального газа, в ионосфере — преобладающей компоненты космической среды.

За всю космическую эру было запущено только шесть спутников для регистрации параметров нейтральной атмосферы *in situ*: 5 аппаратов серии «Atmosphere Explorer» и продолжающий эту серию спутник «Dynamics Explorer 2». Все КА — «старые», последний летал в 1981—1983 гг. Датчики давления (манометры) также устанавливались на «Space Shuttle» и орбитальных станциях «Spacelab 2» и «Мир», но аэродинамическое воздействие на атмосферу столь больших тел не позволяло регистрировать на них природные атмосферные вариации.

Спутники «Atmosphere Explorer» и «Dynamics Explorer 2» были оснащены сложными приборными комплексами для определения температуры и пото-

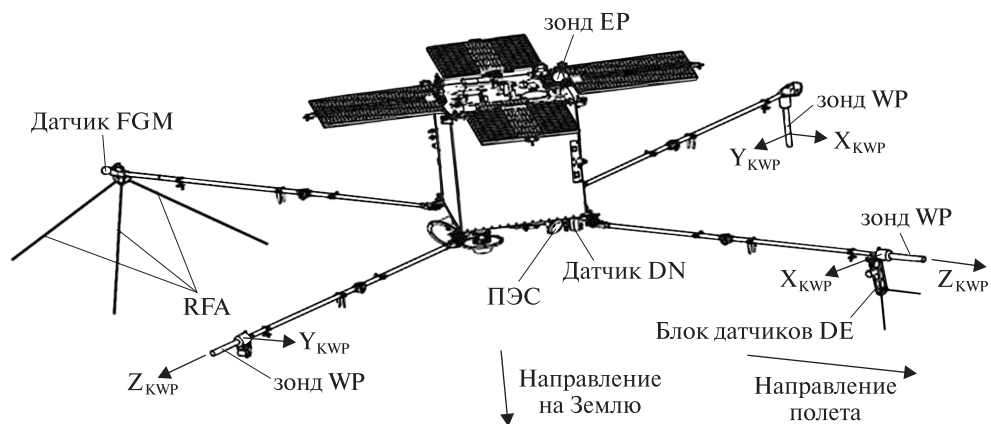


Рис. 1. Общий вид КА «Микросат» с инструментарием «Ионосат-Микро». Длины штанг составляют 2 м, размер стороны КА около 1 м

ковой скорости воздуха (ветра) и масс-спектрометрами для измерения концентраций отдельных атмосферных газов. Для проекта «Ионосат-Микро» в ИТМ разработан новый прибор — датчик атмосферного давления DN (от «Detector of Neutrals»), а для регистрации параметров плазмы — датчик DE («Detector of Electrons»), являющийся реализацией зонда Ленгмюра [13]. Апробация датчиков DN и DE проведена в эксперименте «Потенциал» на КА «Сич-2».

Бортовая система сбора научной информации (ССНИ) создана в ЛЦ ИКИ.

Приборный состав КНА «Ионосат-Микро» представлен в табл. 2. Размещение датчиков на платформе КА показано на рис. 1. Характеризуя КНА в целом, отметим, что рабочие диапазоны магнитометра постоянного поля FGM (до 1 Гц) и индукционных магнитометров переменного поля в составе волновых зондов WP (выше 0.1 Гц) перекрываются между собой, что обеспечивает измерение вектора магнитного поля в сплошном диапазоне частот 0—20 кГц.

Три волновых зонда WP размещены на штангах. При этом датчики электрического потенциала в составе WP позволяют измерить две ортогональные компоненты переменного электрического поля. Для определения третьей компоненты служит электрический зонд EP, установленный на корпусе КА вне плоскости расположения датчиков WP. Таким образом, в полосе частот 0.1 Гц—20 кГц обеспечивается синхронная регистрация вектора магнитного поля, вектора электрического поля и вектора тока, что при обработке данных позволит восстанавливать спектральный состав плазменных волн по методике [11].

Регистрация волновых форм электромагнитного поля датчиками WP и EP в диапазоне КНЧ — ОНЧ дополняется измерениями спектра трёх компонент электрического поля радиочастотным анализатором RFA в диапазоне частот 20 кГц—15 МГц, перекрывающем плазменную частоту ионосферной плазмы. Этот прибор создан в Центре космических исследований Польской академии наук (SRC-PAS).

Таблица 2

Бортовой комплекс научной аппаратуры проекта «Ионосат-Микро»

Используемая аппаратура	Измеряемые величины	Характеристики		Разработчик
		Потребляемая мощность, Вт	Вес, кг	
1. Волновые зонды WP (3 шт)	Плотность электрического тока J : частотный диапазон 0,1 Гц – 40 кГц шум 10^{-12} А/см ² Гц ^{1/2} Магнитное поле B : частотный диапазон 0,1 Гц – 40 кГц шум 10^{-14} Тл / Гц ^{1/2} Электрический потенциал ϕ : частотный диапазон 0,1 Гц – 40 кГц шум 10^{-6} В / Гц ^{1/2}	< 0,25	0,55	А. Марусенков ЛЦ ИКИ (г. Львов)
2. Электрический зонд EP	Электрический потенциал ϕ : диапазон частот DC – 200 кГц шум 10^{-6} В / Гц ^{1/2}	< 0,15	< 0,4	А. Марусенков ЛЦ ИКИ (г. Львов)
3. Радиочастотный анализатор RFA	Спектр электрического поля: диапазон частот 20 кГц – 15 МГц	< 12	≤ 1,7	Н. Rothkaehl SRC-PAS (г. Варшава)
4. Датчик нейтрального компонента плазмы DN	Концентрация нейтральных частиц n_n : 10^5 – 10^{11} см ⁻³ Температура нейтральных частиц T_n : 600–2000 К	≤ 1	≤ 1,2	В. Шувалов ИТМ (г. Днепропетровск)
5. Блок датчиков электронного компонента плазмы DE	Концентрация заряженных частиц n_e : 10^3 – 10^8 см ⁻³ Температура электронов T_e : 0,1–1,0 эВ Температура ионов T_i : 700–2500 К	≤ 0,2	≤ 0,1	В. Шувалов ИТМ (г. Днепропетровск)
6. Блок электроники датчиков нейтрального и электронного компонентов плазмы BE DN-DE	Измерение токов и температуры датчиков $I = 10^{-10}$ – 10^{-4} А	6	≤ 2	А. Лукенюк ЛЦ ИКИ (г. Львов)
7. Феррозондовый магнитометр постоянного поля FGM	Вектор магнитного поля B : Диапазон частот DC – 1 Гц Динамический диапазон ± 65000 нТл Разрешение 0,01 нТл	< 0,3	≤ 0,7	С. Беляев ЛЦ ИКИ (г. Львов)



Используемая аппаратура	Измеряемые величины	Характеристики		Разработчик
		Потребляемая мощность, Вт	Вес, кг	
8. Измеритель полного электронного содержания ПЭС	Частота: L1 = 1217—1265 МГц L2 = 1565—1615 МГц 20 каналов	5,4	≤ 1,5	В. Кузнецов ИЗМИРАН (г. Москва)
9. Система сбора научной информации ССНИ	Входной информационный поток: до 100 Мбит/с Выходной информационный поток: до 64 Мбит/с Объем накопителя: 100 ГБ	< 15	≤ 3,5	А. Лукенюк ЛЦ ИКИ (г. Львов)

Примечание. Суммарно: энергопотребление до 51 Вт, масса до 20 кг, информативность КНА до 6 ГБ/сутки.

Датчики DN и DE для измерения газокинетических параметров космической среды расположены в зоне, невозмущённой движением КА: датчик нейтрального газа DN в носовой части КА (в набегающем потоке воздуха), два плазменных зонда DE вынесены вперёд по ходу движения на штанге.

Ещё одним прибором полезной нагрузки, созданным в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук (ИЗМИРАН), является измеритель полного электронного содержания ПЭС, по данным которого будет вычисляться вертикальный профиль ионосферной плазмы. В отличие от остальных приборов, ПЭС зондирует ионосферу не на траектории КА, а вдоль лучей GPS/ГЛОНАСС сигналов.

Помимо аппаратуры проекта «Ионосат-Микро» на борту КА будет установлена дополнительная, предназначенная для проведения технологических экспериментов полезная нагрузка — малогабаритная астроизмерительная система МАИС-Б (разработка КП СПС «Арсенал», г. Киев), обеспечивающая определение ориентации спутника с погрешностью порядка 0,01°, экспериментальная аммиачная двигательная установка (разработки ГП «КБ «Южное») и другие приборы. Приёмник GPS, входящий в прибор ПЭС в составе КНА «Ионосат-Микро», и астродатчик в составе МАИС-Б будут поставлять высокоточную информацию о местоположении и ориентации КА. При этом погрешность ориентации платформы служебными системами составляет ~5°. Отметим, что для интерпретации научных измерений (в частности, для прецизионного измерения компонент магнитного поля Земли) требуется высокая точность определения, а не удержания ориентации КА.

Планируемые параметры орбиты и другие эксплуатационные характеристики КА «Микросат» указаны в табл. 3. Более подробная информация о платформе и полезной нагрузке приведена в другой статье настоящего сборника [14].

Режимы измерений

Режимы включения КНА «Ионосат-Микро» составляются исходя из условий соблюдения, во-первых, информационного баланса — количество измеряемой и количество передаваемой на Землю информации должны быть за сутки примерно равны, а также из условия энергетического баланса борта.

Информационный баланс. КНА «Ионосат-Микро» включает инструменты WP и EP для регистрации волновых форм электромагнитного поля с верхней частотой среза 40 кГц и 200 кГц соответственно, а также группу инструментов FGM, DN, DE, RFA и ПЭС с частотой измерений ~ 1 Гц. При этом продуктивность комплекса электромагнитных измерений (приборы FGM, WP и EP) зависит от частоты опроса, скажем, при частоте опроса датчика EP 100 кГц информационный поток достигает ~ 200 Кбайт/с. Продуктивность других приборов составляет: ПЭС ~ 25 Кбайт/с, RFA ~ 4 Кбайт/с, DN и DE ~ 1 Кбайт/с, FGM ~ 1 байт/с. Данные измерений будут сбрасываться на Землю по радиолинии X-диапазона в темпе ~ 1 Гбайт/сутки (максимально до 6 Гбайт/сутки), являющейся основным каналом передачи научной информации. Параллельно научные данные будут передаваться с частотой дискретизации 1 Гц по радиолинии S-диапазона.

Режимы измерений в проекте «Ионосат-Микро» разделяются на три главные группы:

1. «Медленный мониторинг» — режим непрерывного измерения параметров ионосферы в течение нескольких суток с частотой опроса датчиков WP и EP 500 Гц, остальных приборов — в соответствии со скоростью их срабаты-

Таблица 3

Эксплуатационные характеристики КА «Микросат»

Параметры	Значение
ОРБИТА:	
околокруговая, эксплуатационный диапазон высот	620...710 км
наклонение	97,9...98,2°
солнечно-синхронная, среднее местное солнечное время в нисходящем узле	10...14 час
ОРИЕНТАЦИЯ:	
тип	активная трёхосная
точность ориентации в орбитальной системе координат	5° (3σ)
угловые скорости стабилизации КА	< 0,01° / с (3σ)
ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ НА ЗЕМЛЮ:	
радиолиния X-диапазона	30,72 Мбит/с
служебная радиолиния S-диапазона	32 Кбит/с
МАССА КА:	
всего	до 200 кг
в том числе, полезной нагрузки	до 75 кг
Время функционирования КА	не менее 3-х лет



ния. Это основной режим проведения измерений. Частота дискретизации 500 Гц обеспечивает регистрацию волновых форм ионных типов плазменных волн (ионная циклотронная частота ~ 100 Гц). При этом расстояние между последовательными отсчётами вдоль орбиты КА составляет $7,5 \text{ (км/с)} / 500 \text{ Гц} = 15 \text{ м}$. Из-за ограничения на мощность питания режим медленного мониторинга в свою очередь разделяется на подрежимы, отличающиеся составом включаемых приборов (см. ниже).

2. «Быстрый мониторинг» — режим непрерывных измерений всем составом КНА в течение одного витка (около 100 мин) в сутки. При этом частота опроса датчиков WP и EP составляет 30 кГц. Этот режим реализует высокочастотный мониторинг ионосферы с регистрацией волновых форм ОНЧ диапазона.

3. «ВЧ измерения» — режим вспыхивающих измерений всем составом КНА с временем включения ~ 20 мин. Частота опроса датчиков WP равна 30 кГц, EP — 100 кГц.

Энергетический баланс. При проведении непрерывных измерений в течение нескольких суток мощность питания КНА ограничена возможностями КА — до 25...30 Вт. В то же время энергопотребление различных групп приборов достигает:

- Комплект датчиков электромагнитных измерений FGM, WP и EP с блоком электроники MWC — 6 Вт;

- Комплект датчиков газокинетических параметров DN, DE с блоком электроники BE DN-DE — 6 Вт;

- RFA — 7 Вт;

- ПЭС — 5.4 Вт;

- ССНИ — 15 Вт.

В таких условиях режим медленного мониторинга вынужденно разделён на подрежимы:

1. «Медленный мониторинг — ЭМ» — режим электромагнитного мониторинга, при котором опрашиваются приборы WP, EP, FGM и RFA;

2. «Медленный мониторинг — КС» — детальная диагностика параметров космической среды, опрашиваются приборы WP, EP, DN и DE;

3. «Медленный мониторинг — ПЭС» — приборы WP, EP и ПЭС.

Режимы «быстрого мониторинга» и «ВЧ измерений» на подрежимы не разделяются.

Научная кооперация, приём данных и управление работой спутника

Кооперация организаций-участников космического эксперимента «Ионосат-Микро», созданная под эгидой Государственного космического агентства Украины (ГКАУ), включает Институт космических исследований НАНУ и ГКАУ (ИКИ), Львовский центр Института космических исследований НАНУ и ГКАУ (ЛЦ ИКИ), Институт технической механики НАНУ и ГКАУ (ИТМ), Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Рос-

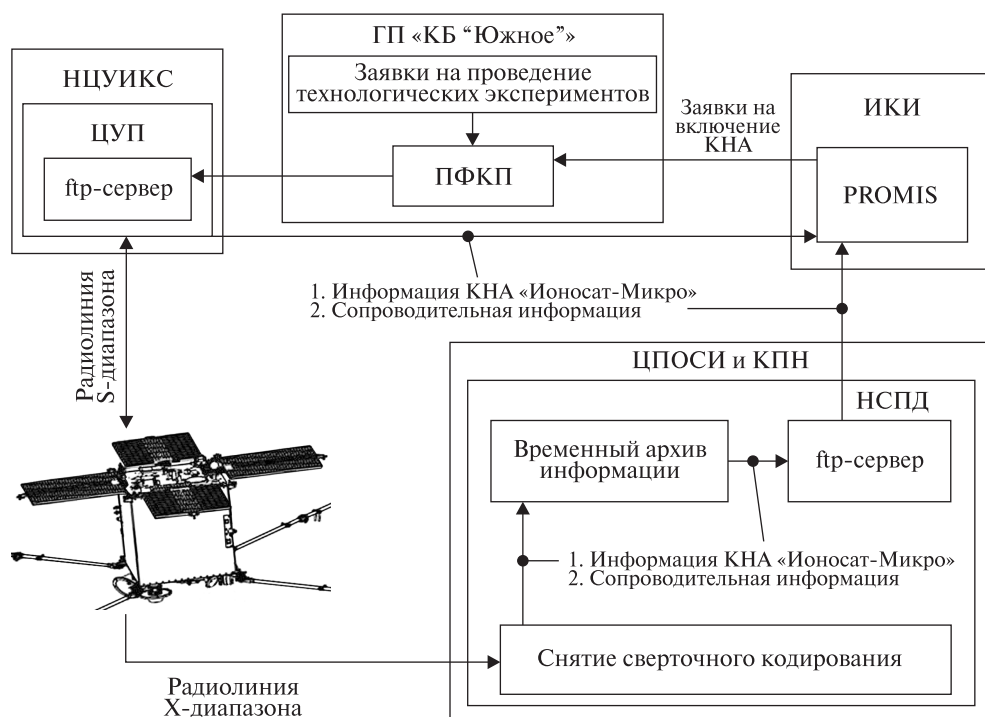


Рис. 2. Схема управления КЭ и передачи данных в ИКИ. Показаны: Центр управления полётом (ЦУП) в НЦУИКС (г. Евпатория), подсистема формирования координационного плана (ПФКП) включения полезной нагрузки в ГП «КБ «Южное», наземная станция приёма данных (НСПД) в Центре приёма и обработки специальной информации и контроля навигационного поля (ЦПОСИ и КНП, г. Дунаевцы), Центр обработки, хранения и распространения данных проекта «Ионосат-Микро» в ИКИ (PROMIS)

сийской академии наук (ИЗМИРАН), Центр космических исследований Польской академии наук (SRC-PAS), Государственное предприятие «КБ «Южное» (ГП «КБ «Южное») и Национальный центр управления и испытания космических средств ГКАУ (НЦУИКС).

Головной организацией проекта выступает ИКИ, директор — д.ф.-м.н. О.П. Фёдоров. Комплекс работ по созданию платформы КА «Микросат» и интеграции приборов полезной нагрузки осуществляется в ГП «КБ «Южное», руководитель работ — главный конструктор КБ-3, к.т.н. А.Л. Макаров. Кроме того, решением Совета по космическим исследованиям Национальной академии наук Украины (НАНУ) назначены: научный руководитель эксперимента «Ионосат-Микро» — зав. лабораторией ИКИ, к.ф.-м.н. Г.В. Лизунов и технический руководитель эксперимента — директор ЛЦ ИКИ, к.т.н. А.А. Лукенюк.

Управление ходом космического эксперимента «Ионосат-Микро» и приём данных измерений осуществляются в соответствии с принципиальной схемой, представленной на рис. 2. Телеметрическая информация, принятая в Центре



управления полётом в НЦУИКС (г. Евпатория), и полный объём научной информации, принятый по радиолинии X-диапазона в Центре приёма и обработки специальной информации и контроля навигационного поля (ЦПОСИ и КНП, г. Дунаевцы) поступают на сервер ИКИ. Далее обработка информации ведётся научной кооперацией проекта (что не отображено на схеме).

После раскадровки потока научной информации по отдельным измерительным каналам, принятые в ИКИ данные будут направляться изготовителям приборов — в ЛЦ ИКИ, ИТМ, ИЗМИРАН и SRC-PAS, — для тарировки, включающей очистку измерений от приборных сбоев, приведение данных к физическим единицам измерений и пр. Затем данные будут возвращаться в ИКИ для размещения на веб-ресурсе проекта. Весь обмен информацией будет осуществляться посредством специально разработанного веб-сервиса.

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность всем, кто принимал участие в обсуждении материалов научной программы проекта «Ионосат-Микро».

Работа поддержана проектом целевых инициатив УНТЦ-ГКАУ № 5567 и контрактами ГКАУ №№ 1-15/12, 1-16/12, 1-17/12.

ЛИТЕРАТУРА

1. Korepanov V., Lizunov G., Fedorov O., Yampolsky Yu., Ivchenko V. Ionosat — ionospheric satellite cluster // Adv. Space Res. — 2008. — V. 42. — P. 1515—1522.
2. Rothkaehl H., Parrot M. Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. — 2005. — V. 67, Issue 8—9. — P. 821—828.
3. Черногор Л.Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження» // Космічна наука і технологія. — 1999. — Т. 5, № 1. — С. 38—47.
4. Черногор Л.Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. Монография. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. — 386 с.
5. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф. Монография. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2012. — 555 с.
6. Rothkaehl H., Izhovkina N., Prutensky I., Pulinets S., Parrot M., Lizunov G., Blecki J., Stanislawski I. Ionospheric disturbances generated by different natural processes and by human activity in Earth plasma environment // Ann. Geophys. — 2004. — Supplement to vol. 47, No 2/3. — P. 1215—1226.
7. Rolland L.M., Lognonné 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.
8. Скороход Т.В., Лизунов Г.В. Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2012. — Т. 52, № 1. — С. 1—6.
9. 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.
10. Kramer H.J. Observation of the Earth and its environment. Survey of missions and sensors. — Springer, 2002. — 1982 p.

11. Вайсберг О.Л. К определению пространственной шкалы в движущейся плазме // Космические исследования. — 1985. — Т. 12, № 6. — С. 947—949.
12. Dudkin F., Korepanov V., Lizunov G. Experiment VARIANT — first results from wave probe // Adv. Space Res. — 2009. — V. 43. — P. 1904—1909.
13. Shuvalov V.A., Pis'mennyi N.I., Priymak A.I., Kochubey G.S. A probe diagnostics for high-speed flows of rarefied partially dissociated plasma // Instruments and Experimental Techniques. — 2007. — V. 5, No 3. — P. 370—378.
14. Макаров А.Л., Шовкопляс Ю.А., Москалев С.И., Галабурда Д.А. Космический аппарат «Микро-росат» // Космический проект «Ионосат-Микро». — К. : Академперіодика, 2013. — С. 109—117.