
КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ «ИОНОСАТ- МИКРО»



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ «ИОНОСАТ- МИКРО»



КИЕВ
•АКАДЕМПЕРІОДИКА•
2013

УДК 001.8(15)
ББК 22.6
К 71

Под общей редакцией:
С.А. Засухи, О.П. Фёдорова

Научный редактор:
д-р физ.-мат. наук *Л.Ф. Черногор*

Редколлегия:
В.Е. Корепанов, Г.В. Лизунов А.Л. Макаров, О.П. Фёдоров, Л.Ф. Черногор

Рецензенты:
д-р экон. наук *А.В. Дегтярев* (Государственное предприятие
«Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»),
д-р физ.-мат. наук *Г.П. Милиневский*
(Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко)

Рекомендовано к печати Ученым советом
Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины
(протокол № 5 от 04.07.2013 г.)

*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Государственного космического агентства Украины*

Космический проект «Ионосат-Микро» : монография / Под
К 71 общ. ред. С.А. Засухи, О.П. Фёдорова. — К. : Академперіодика,
2013. — 218 с., 22 с. ил.

ISBN 978-966-360-228-8

«Ионосат-Микро» — это космический проект, предусмотренный Общегосударственной целевой научно-технической космической программой Украины на 2013—2017 годы. Общая цель проекта состоит в изучении динамических процессов в ионосфере в широком диапазоне пространственных и временных масштабов с помощью согласованных космических и наземных измерений; поиске взаимосвязи ионосферных возмущений с процессами на Солнце, в магнитосфере, атмосфере и внутренних оболочках Земли. В монографию включены статьи участников проекта, содержащие детальное описание задач космических измерений, бортового приборного комплекса и наземных средств.

Для широкого круга специалистов в области космических исследований, преподавателей и студентов.

УДК 001.8(15)
ББК 22.6

ISBN 978-966-360-228-8

© Институт космических исследований
НАН Украины и ГКА Украины, 2013
© Академперіодика, оформление, 2013

СПУТНИКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРЫ: ПЕРСПЕКТИВЫ УКРАИНСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С.А. ЗАСУХА, О.П. ФЁДОРОВ

В настоящую монографию включены статьи, которые позволяют судить о научных задачах проекта «Ионосат-Микро», технологическом базисе, определяющем его осуществимость, кооперации специалистов и организаций, задающих уровень решения поставленной проблемы. Есть еще один аспект, который целесообразно рассмотреть на этапе подготовки проекта. Речь идет о значении этого проекта для космических исследований Украины Государственной космической программы в целом.

Актуальность такой постановки вопроса вызвана следующими обстоятельствами. Отечественный опыт и достижения в космической сфере связаны главным образом с ракетно-космической техникой. Космический статус Украины определяется высоким уровнем использования на мировых рынках ракет-носителей украинской разработки. Известны также достижения наших специалистов в спутниковых проектах: в Украине изготовлены более 400 космических аппаратов различного назначения. Однако эти проекты задуманы и осуществлялись в рамках советских (российских) программ исследований. Украинские ученые выступали в роли соисполнителей, а основной вклад в проект вносили специалисты ГП «КБ «Южное» как разработчики космического аппарата и интеграторы специальной и исследовательской аппаратуры. Поэтому подготовка и реализация собственного проекта, авторами идеи и основными исполнителями которого были бы украинские ученые и инженеры, является принципиально важной задачей. Речь идет не только собственно о проекте, а демонстрации способности украинского космического сообщества решать масштабные задачи исследования и использования космического пространства, выступать партнером космических держав и международных организаций в практическом осуществлении актуальных задач космической науки.

В настоящем материале предпринята попытка краткого предварительного анализа проекта «Ионосат-Микро» и перспектив на его основе осуществить масштабный космический научный проект «Ионосат» в рамках национальной космической программы. Представляется, что именно на этом этапе важно осознать потенциальные достоинства и ограничения малого проекта, вы-



работать подходы к эффективному осуществлению проекта «Ионосат» в целом. Ниже приводятся некоторые соображения относительно параметров, определяющих эффективность мер по подготовке и реализации проекта.

Актуальность поставленных задач и научная значимость

Основное назначение проекта «Ионосат-Микро» обозначено как научная ионосферная миссия. Формирование научных задач происходило длительным эволюционным путем, а концептуальные положения впервые сформулированы в ходе разработки нереализованной миссии «Предупреждение», в конце 1990-х годов. В то время была подготовлена концепция научной программы, авторами которой являлась большая группа ученых под руководством академика Л.Н. Литвиненко (руководитель проекта), чл.- корр. Ю.М. Ямпольского (наземный сегмент) и д.т.н. В.Е. Корепанова (приборный комплекс). Научная проблематика проекта «Ионосат-Микро» в значительной степени унаследовала разработанные концептуальные положения. Важно отметить, что относительно ограниченный проект «Ионосат-Микро» (предполагающий один микроспутник) должен стать первой фазой полномасштабного проекта «Ионосат» на основе космического кластера из трех аппаратов, как это задумано в проекте «Предупреждение». Поэтому значимость научных результатов будет существенным образом определяться тем, в какой степени малый проект послужит методической базой для осуществления полномасштабного проекта «Ионосат».

Цель проекта состоит в изучении 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. Такая цель обусловлена специфической ролью ионосферы, которая представляет собой область взаимодействия Земли с ближним космосом. Систематические измерения параметров ионосферы — ключ к изучению механизмов формирования ионосферного отклика на воздействия «сверху» и «снизу».

Начиная с 1980-х годов и по сегодняшний день, наиболее актуальной задачей космических экспериментов в ионосфере считают изучение динамических процессов. Именно это направление обеспечит понимание картины циркуляции вещества в околоземном космосе и связи динамической структуры ионосферы с солнечной и магнитной активностями, создание наблюдательной базы для разработки и уточнения моделей верхней атмосферы, ионосферы и вариаций магнитного поля Земли, изучение морфологической структуры ионосферных волновых полей и их взаимосвязи с космическими и земными источниками.

Перспективы практического использования результатов проекта

Один из важных прикладных аспектов проекта состоит в проведении диагностики ионосферных проявлений космической погоды. Важность задачи мониторинга космической погоды обусловила включение этой проблемы в европейскую программу Оповещения в интересах безопасности (Space Situational Awareness). В апреле 2013 года открыт первый центр координации данных по космической погоде ЕКА. Этот шаг — новый этап воплощения результатов исследований в практически действующую информационную систему. Традиционно главной целью создания систем мониторинга космической погоды являлось предупреждение о возможных воздействиях на космические аппараты на орбите, а также наземные технологические объекты (например, линии электропередач). Важной и пока малоизученной остается проблема влияния космической погоды на здоровье и работоспособность человека. Особенно важным для украинской космической программы представляется перспектива создания и поддержания региональных моделей ионосферы в интересах спутниковой навигации. Эта работа уже проводится украинскими специалистами, а появление непосредственных ионосферных измерений может оказать этой деятельности значительную поддержку.

Другим важным моментом, имеющим практическую значимость, является изучение ионосферного отклика на мощные приповерхностные источники энергии. Комплекс таких исследований представляется перспективным для поиска ионосферных предвестников техногенных и природных (таких как землетрясения) явлений, что является одной из специальных задач проекта «Ионосат-Микро». По всей видимости, полноценное исследование пространственных и временных вариаций параметров ионосферы удастся провести в полномасштабном проекте «Ионосат», однако малый проект станет необходимым этапом разработки практически действующей системы космического мониторинга.

Место проекта в программах исследований ионосферы и перспективы международной кооперации

Об интересе международного научного сообщества к проекту свидетельствует и факт участия в нем специалистов из России (ИЗМИРАН) и Польши (Центр космических исследований ПАН). Казахские ученые будут принимать участие в наземной обработке данных «Ионосат-Микро». Многообещающей выглядит перспектива международной кооперации в большом проекте «Ионосат». Соответствующие договоренности имеют предварительный характер, однако уже сегодня российские коллеги изучают возможность участия российского космического аппарата как одного из компонентов группировки.



КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ

«ИОНОСАТ-МИКРО»

Близкие по назначению космические аппараты разрабатываются в Казахстане и Китае. В текущем году намечены обсуждения о возможном взаимодействии в реализации этих проектов.

Вопрос о международном сотрудничестве в рамках проекта «Ионосат» находится в стадии проработки, в то же время план взаимодействия различных проектов по диагностике ионосферы с участием украинских ученых представляется задачей, которая уже успешно решается. Таблица 1 демон-

Таблица 1

Спутниковые исследования ближнего космоса в Украине

Проект (агентство)	Космическая система	Реализация	Предмет исследования, задачи
Интербол (Роскосмос)	2 спутника + + 2 субспутника	Запущен в 1995, КА Интербол-2 (Tail Probe), функционировал до 1999 г.	Морфология магнитосферы, динамические процессы в маг- нитосфере
Предупреждение (НКАУ)	3 спутника	Научная программа, эскизный проект	Воздействия на ионосферу «снизу», ионосферные пред- вестники землетрясений
Интербол-прог- ноз (Роскосмос, НКАУ)	2 кластера микроспутников	Концепция, техниче- ские предложения	Комбинированные наблюде- ния ионосферы и магнито- сферы
Вариант (НКАУ)	Спутник ДЗЗ «Сич-1М»	Запущен в 2004 г., осуществлён в начале 2005 г.	Измерение электромагнитных полей и токов в ионосфере
Компас-2 (Рос- космос)	Микроспутник	Запущен в 2006 г.	Ионосферные предвестники землетрясений
Коронас-Фотон (Роскосмос)	Спутник	Запущен и осущест- влён в 2009 г.	Солнце и солнечно-земные связи
Обстановка (Роскосмос)	МКС	Реализация начиная с 2013 г.	Электромагнитная обстанов- ка вокруг МКС
Потенциал (НКАУ)	Микроспутник ДЗЗ «МС-2-8» (проект Сич-2)	Запущен в 2011 г. Осуществлён в 2011—2012 гг.	Регистрация параметров ней- тральной атмосферы и плаз- мы
Радиоастрон (Роскосмос)	Спутник	Запущен в 2011 г.	Радиоастрономия, физика плазмы
Чибис (Роскос- мос)	Микроспутник	Запущен в 2012 г.	Молниевая активность, гео- физический мониторинг
Ионосат-Микро (ГКАУ)	Микроспутник	Запуск после 2013 г.	Ионосфера, космическая по- года, геофизические эффек- ты в космосе
Резонанс (Рос- космос)	2 спутника	Запуск после 2013 г.	Мазерные эффекты в магни- тосфере

стрирует список осуществленных и задуманных проектов, которые планировались ранее, осуществлены и входят в настоящее время в космические программы. Как видно, проекту «Ионосат-Микро» предшествовали технологические эксперименты «Вариант» и «Потенциал» на украинских аппаратах «Сич». А в ближайшие годы есть возможность осуществлять скоординированные измерения аппаратурой «Ионосат-Микро» и «Обстановка» (международный эксперимент на МКС).

К этому перечню следует добавить широкий комплекс наземных исследований, которые проводятся в различных украинских научных центрах. Исходя из назначения и задач, проект «Ионосат-Микро» должен стать весомым вкладом в национальные и международные программы изучения геокосмоса.

Место проекта «Ионосат-Микро» в космической программе и связь с планами развития космической отрасли

Запуск аппаратуры проекта «Ионосат-Микро» планируется на микроспутнике, который будет выведен в космос в ходе первого испытательного полета украинской ракетой-носителем «Циклон-4» с бразильского космодрома Алкантара. Это знаменательное событие в истории отечественной ракетно-космической отрасли, поскольку этапный проект в развитии украинских ракет-носителей включает в качестве составной части первый научный эксперимент космической программы, реализуемый украинскими учеными. С точки зрения развития отечественных спутниковых технологий этот проект — демонстрация способности нашей промышленности создать конкурентоспособный аппарат для космической науки и предложить его различным пользователям, как в Украине, так и за рубежом. Последнее означает перспективу выхода на рынки космических услуг в новом для нашей страны секторе — исследований ближнего космоса.

Заключительные замечания

Основной мотив написания настоящего материала — обозначение тех параметров, которые должны обеспечить эффективность осуществления научного проекта, первого этапа «Ионосат-Микро» и перспективного полномасштабного проекта «Ионосат». Эффективность — ключевое понятие современной космонавтики, идеология которой существенно отличается от начального ее этапа. Ответственность ученых при реализации исследовательского проекта состоит в обеспечении всех тех составляющих, которые делают проект актуальным и обоснованным не только для конкретных исследователей в данной области. Государственные органы, общественность,



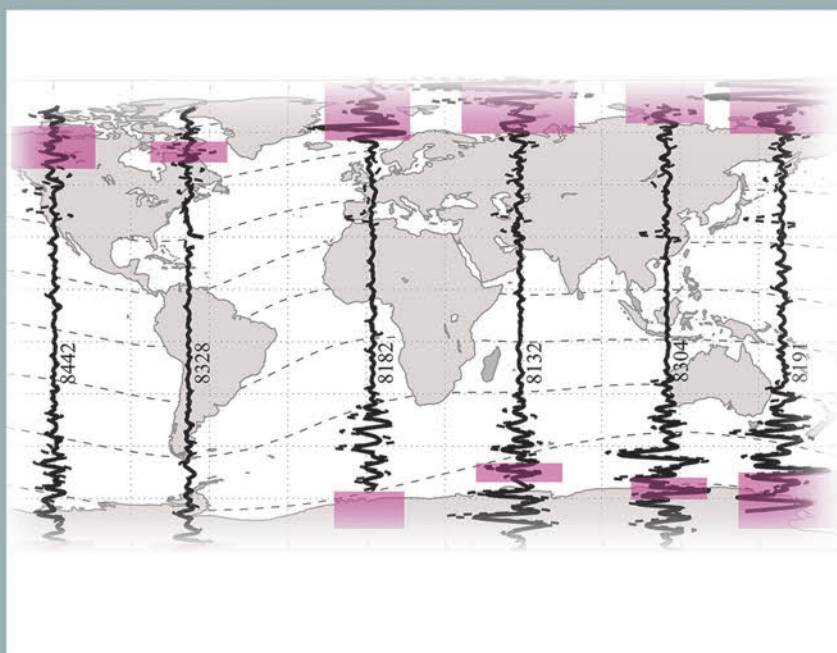
КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ

«ИОНОСАТ-МИКРО»

индустрия должны быть убеждены в необходимости и оправданности вложения средств в научный проект. Результатом работы не может быть только успешный запуск космического аппарата и свидетельство штатной работы аппаратуры (так часто было в прежние годы). Количество и качество научной информации, успешное решение актуальных прикладных задач, вовлечение молодежи, демонстрация перспективности и повышение международного авторитета отечественной практической космонавтики — те факторы, которые повлияют на реальное утверждение современной космической деятельности Украины.

РАЗДЕЛ 1

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ



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-

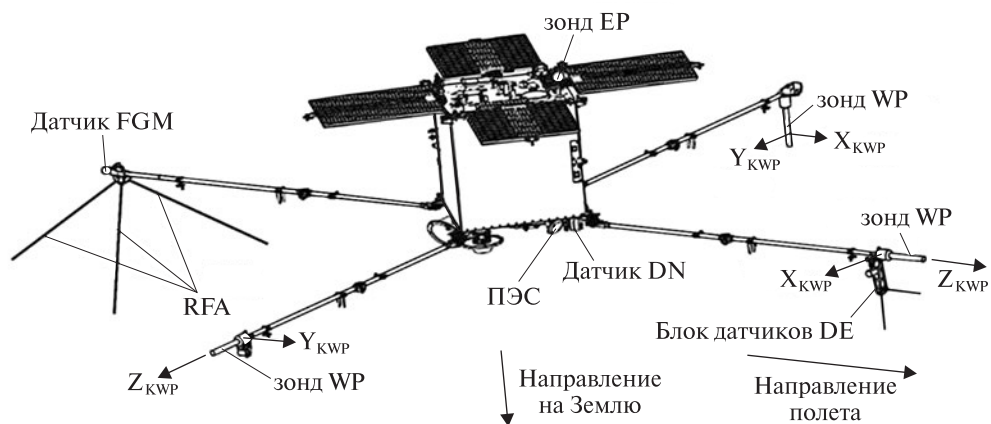


Рис. 1. Общий вид КА «Микросат» с инструментарием «Ионосат-Микро». Длины штанг составляют 2 м, размер стороны КА около 1 м

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 срабатыва-

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-

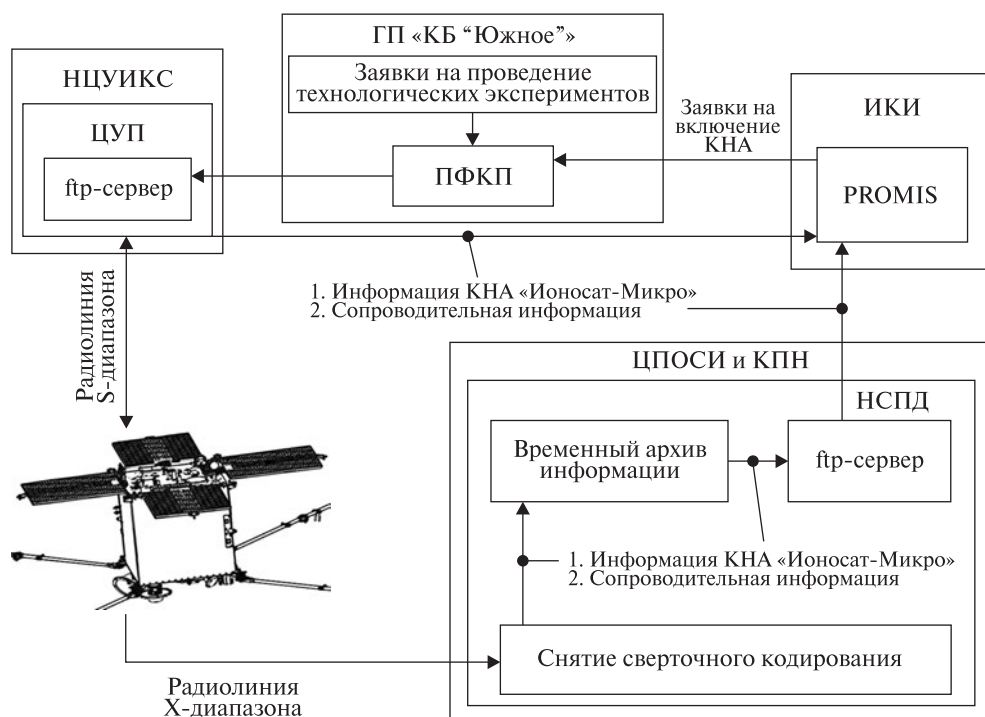


Рис. 2. Схема управления КЭ и передачи данных в ИКИ. Показаны: Центр управления полётом (ЦУП) в НЦУИКС (г. Евпатория), подсистема формирования координационного плана (ПФКП) включения полезной нагрузки в ГП «КБ «Южное», наземная станция приёма данных (НСПД) в Центре приёма и обработки специальной информации 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'menniy 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.

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ИОНОСФЕРЫ В ПРОЕКТЕ «ИОНОСАТ-МИКРО»

Г.В. ЛИЗУНОВ, А.Ю. ЛЕОНТЬЕВ, Т.В. СКОРОХОД

Введение

Ионосфера Земли демонстрирует огромную изменчивость параметров, которые только в среднем контролируются уровнем солнечной активности, но также зависят от множества других трудно идентифицируемых факторов. Представление о равновесном состоянии ионосферы, устанавливаемом при заданных гелиофизических условиях (а параметры именно такого состояния рассчитываются и возвращаются пользователю в моделях «стандартной ионосферы»), является идеализацией. В действительности, ионосфера находится в процессе перманентной перестройки, приспособлении к изменяющемуся равновесию, и связанном с этим глобальном движении. Циркуляция вещества в околоземном космосе является структурообразующим фактором, формирующим в ионосфере ряд морфологических образований, таких как экваториальная аномалия, среднеширотный провал, зоны полярной конвекции, полярные дыры и пр. Даже общепринятое широтное районирование ионосферы имеет в своей основе динамическую природу. Поэтому разработка ионосферных моделей, удовлетворяющих всё более возрастающим требованиям к точности и прогностической надёжности, требует учёта динамических эффектов.

Ионосферные возмущения выступают естественными индикаторами процессов, воздействующих на ионосферу извне, и в этом качестве представляют практический интерес. Так, центральной задачей проекта «Ионосат-Микро» является изучение ионосферных откликов земных катастроф [1]. Но «реактивность» изменений параметров ионосферы (которая, собственно, и создаёт возможность их приборной диагностики), становится помехой на этапе идентификации конкретных источников возмущений. Как правило, исследователь может равновероятно выделить целый набор факторов, могущих вызвать в ионосфере наблюдаемый эффект, что создаёт простор для творчества гипотез. Один из основателей современной физики ионосферы Джек Ратклифф говорил: «Если Вы что-то очень ищите в F -области ионосферы, Вы это всегда найдёте» [2]. Наглядной иллюстрацией трудностей, возникающих при

изучении генезиса ионосферных вариаций, может служить история поиска ионосферных предвестников землетрясений.

Словосочетание «ионосферные предвестники землетрясений» вошло в употребление в конце 1980-х годов, когда под давлением многих фактов сформировалось устойчивое представление, что какая-то часть ионосферных вариаций обязана своим происхождением процессам подготовки землетрясений, происходящим в литосфере [3—5]. В силу очевидной важности предсказания землетрясений, работы в области ионосферных предвестников приобрели мировой размах, а количество публикаций на эту тему только в известных нам серьёзных источниках достигло уже более чем тысячи единиц. В соответствии со словами Ратклиффа, основная тяжесть проблемы выявилась не в том, чтобы обнаруживать ионосферные возмущения, могущие быть предвестниками землетрясений, а в том, чтобы обосновывать наличие причинно-следственной связи между ними и землетрясениями. Решить эту задачу убедительно на существующем материале, по-видимому, невозможно, причём трудность состоит не в нехватке данных как таковых, а нехватке систематических и однотипных данных, необходимых для построения правильной статистики [6]. На наш взгляд, значительный прогресс в области изучения ионосферных предвестников землетрясений происходит последнее десятилетие благодаря введению в игру огромного массива измерений спутника DEMETER и данных сетей наземного зондирования ионосферы, и применения к их обработке статистических методов.

Следующая методологическая трудность обусловлена тем, что ионосфера является замагниченной газоплазменной средой, в которой вариации параметров нейтральных и заряженных компонент и электромагнитного поля тесно связаны между собой. Во многих случаях именно изучение этой связи различных параметров представляет интерес. Рассмотрим, например, развитие представлений о феномене перемещающегося ионосферного возмущения (далее — ПИВ). ПИВы были обнаружены в 1940-х годах по данным вертикального зондирования ионосферы и поначалу трактовались как сугубо плазменный процесс (магнитозвуковая волна, зона плазменной турбулентности и т.п.). В 1960 г. Коллин Хайнс опубликовал работу [7], где по косвенным экспериментальным данным и «на кончике пера» он показал, что ПИВ суть отображение волнового процесса в нейтральном газе — атмосферной гравитационной волны (АГВ). Прямая проверка теории Хайнса стала возможной только в 1970–1980-х годах на основе измерений параметров нейтрального газа и плазмы *in situ*, на борту космических аппаратов [8]. В настоящее время мы наблюдаем новую волну интереса к ПИВ, на этот раз как к фактору космической погоды, влияющему на точность работы глобальных систем спутниковой навигации.

С учётом всего сказанного, проект «Ионосат-Микро» ставит целью реализовать *комплексный мониторинг* динамических процессов в ионосфере. Будет создана база данных возмущений ионосферы, необходимая для разработки динамических моделей геокосмоса и статистического изучения связи ионосфер-

ных неоднородностей с космическими и земными источниками. Вместе с тем будет создана база данных возмущенной ионосферы, необходимая для статистического изучения связи ионосферных неоднородностей с космическими и земными источниками.

Динамическая структура ионосферы

Динамика ионосферы характеризуется взаимодействием трёх подсистем, каждая из которых обладает специфической упругостью. К ним относятся: нейтральный газ, плазма (причём во всём диапазоне ионосферных высот плазма составляет малую добавку к нейтральной составляющей) и магнитное поле Земли. Первая и вторая подсистемы связаны через столкновения, вторая и третья через пондеромоторную силу. Выше приблизительно 130 км давление магнитного поля Земли превышает атмосферное давление, которое вплоть до высот порядка 1000 км превышает давление плазмы. Таким образом, во всей F -области ионосферы (140–1000 км) выполняются неравенства:

$$B^2 / 8\pi \gg n_n k_B T_n \gg n_p k_B (T_e + T_i), \quad (1)$$

где B — индукция магнитного поля, $n_{n,p}$, $T_{n,i,e}$ — концентрации и температуры различных сортов частиц, k_B — постоянная Больцмана. Кроме того, для крупномасштабных процессов (с длинами волн сотни — тысячи — десятки тысяч км и периодами десятки минут — часы — сутки) реализуются условия, характерные для магнитной гидродинамики (МГД): длина волны больше ионного циклотронного радиуса (в ионосфере — сантиметры) и электронной инерционной длины (десятки метров), частота меньше ионной циклотронной частоты ($\omega_{ci} \sim 10^2 \text{ с}^{-1}$). В силу этого движение космической среды приобретает специфические МГД черты (см., например, [9, 10]).

Режим движения заряженных частиц на ионосферных высотах критически зависит от отношения частоты столкновений «заряд — нейтрал» ν_{an} и циклотронной частоты ω_{ca} (где $\alpha = e, i$). Если $\nu_{an} \gg \omega_{ca}$, то трение, которое нейтральный газ оказывает на заряженную компоненту, доминирует над силой Лоренца, если $\nu_{an} \ll \omega_{ca}$, то доминирует магнитное поле. В силу барометрического распределения плотности воздуха, частота столкновений ν_{an} экспоненциально уменьшается с высотой, поэтому для каждого сорта заряженных частиц существует высотный уровень z_a , на котором частота столкновений и циклотронная частота сравниваются между собой $\nu_{an}(z_a) = \omega_{ca}(z_a)$. Для электронов $z_e \approx 70$ км, для ионов $z_i \approx 130$ км.

Таким образом, ниже примерно 70 км, где $\nu_{in} \gg \omega_{ci}$, $\nu_{en} \gg \omega_{ce}$, столкновения преобладают над магнитным полем, электроны и ионы «вморожены» в нейтральную атмосферу, которая в динамическом отношении ведёт себя как единая слабопроводящая жидкость. В высотном диапазоне 70–130 км (динамо-область) выполняются неравенства $\nu_{in} \gg \omega_{ci}$, $\nu_{en} \ll \omega_{ce}$, тем самым ионы «вмо-

рожены» в нейтралы, а электроны «вморожены» в магнитное поле. Движения воздуха на этих высотах (ветры, приливы, волны и т.д.) приводят к проскальзыванию ионной компоненты относительно электронной и генерации электрического тока. Выше 130 км, как электроны, так и ионы «вморожены» в магнитное поле, поскольку $v_{in} \ll \omega_{ci}$, $v_{en} \ll \omega_{ce}$. Соответственно атмосферно-ионосферная среда ведёт себя как сумма двух различно движущихся жидкостей — нейтральной и плазменной.

Отметим, что в приведенных рассуждениях высота 130 км независимо возникла два раза. Один раз — как нижняя граница области космического пространства, в которой плотность энергии магнитного поля превышает плотность внутренней энергии вещества (1). Второй раз — как нижняя граница области замагниченности ионов z_i .

Рассмотрим движение нейтральной и плазменной составляющей вещества на высотах F -области ионосферы $z > z_i$. В частотном диапазоне $v_{in} < \omega < \omega_{ci}$ динамика плазмы подчиняется идеальной МГД, соответственно плазма «вморожена» в магнитное поле, а плазменные возмущения распространяются в виде альфвеновских и магнитозвуковых мод. На низких частотах $\omega < v_{in}$ «работает» диссипативная МГД, что приводит к ряду специфических эффектов: проскальзыванию плазмы поперёк магнитного поля, скинированию МГД волн, джоулеву нагреву атмосферы и пр.

Движение нейтральной составляющей зависит от частот столкновений «нейтрал — нейтрал» $v_{nn} \sim v_{in}$ и «нейтрал — ион» $v_{in} \sim (n_p / n_n) v_{in}$. В области частот $v_{in} < \omega < v_{nn}$ движение носит гидродинамический характер, возмущения нейтрального газа распространяются в виде атмосферных гравитационных и акустических волн. Область высоких частот $\omega > v_{nn}$ запрещена для гидродинамических процессов из-за нарушения сплошности нейтральной среды (поскольку на таких частотах длина акустической волны меньше длины свободного пробега частиц). В области частот $\omega < v_{in}$ столкновения с ионами переносят давление магнитного поля на нейтральный газ. Обобщающая эти рассуждения диаграмма представлена на рис. 1.

Глобальная циркуляция плазмы в ионосфере

Рассмотрим динамическую структуру земной ионосферы, как она установлена на основе многочисленных экспериментальных и теоретических исследований [11—15]. На высотах F -области ионосферная плазма совершает поперечный дрейф, который можно трактовать как совместное движение ионов, электронов и силовых линий магнитного поля Земли. Скорость дрейфа:

$$\vec{V}_p = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}, \quad (2)$$

где E — напряжённость электрического поля. Поправки в (2), связанные с давлением плазмы, трением о нейтральную компоненту, силой тяжести и дру-

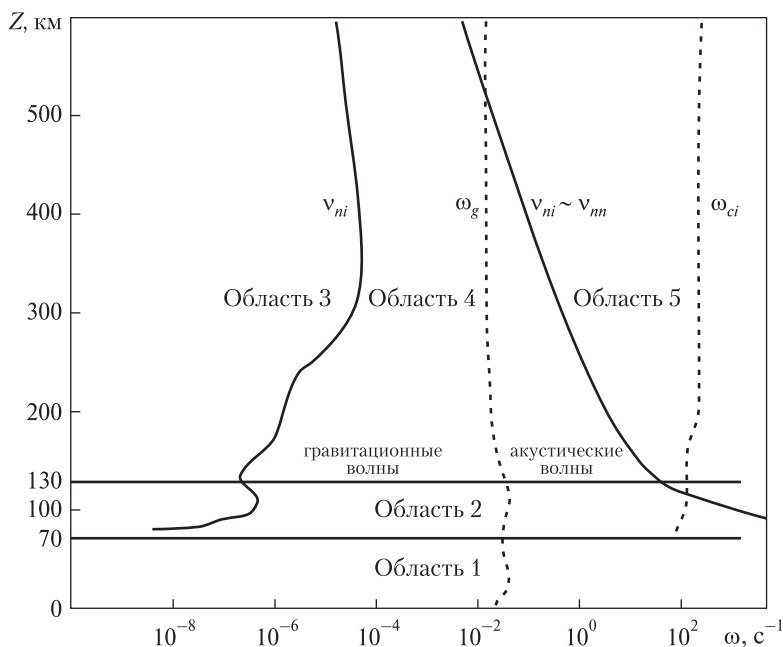


Рис. 1. Диаграмма динамических режимов движения вещества в ионосфере. Показаны высотные распределения частот столкновений ν_{ni} и ν_{nn} , частоты Брента-Вайсяля ω_g и ионной циклотронной частоты ω_{ci} (рассчитанные по моделям MSIS-90 и IRI для условий: день, средние широты и средняя солнечная активность). В области 1 атмосфера ведёт себя как слабопроводящая жидкость, в области 2 — как анизотропный проводник. Области 3, 4, 5 по-разному прочитываются для нейтрального газа и плазмы. Для плазмы область 5 является областью идеальной МГД, области 3 и 4 — диссипативной МГД. Для нейтральной компоненты область 5 — запрещённая, область 4 — гидродинамическая, в области 3 нейтральная атмосфера эффективно взаимодействует с магнитным полем Земли

гими динамическими факторами относительно малы [14]. Представим электрическое поле в (2) как сумму трёх, имеющих различное происхождение частей:

$$\vec{E} = \vec{E}_{cor} + \vec{E}_{ext} + \vec{E}_{int}. \quad (3)$$

E_{cor} — это электрическое поле коротации (униполярной индукции), обусловленное вращением Земного шара как магнитного тела (в системе отсчёта, связанной с вращающейся Землёй, $E_{cor} = 0$). E_{ext} — электрическое поле магнитосферных источников, создающих разность потенциалов между силовыми линиями магнитного поля Земли, эта разность проецируется вдоль магнитного поля на высоты ионосферы. E_{int} — электрическое поле, генерируемое непосредственно в ионосфере (за счёт динамо-эффекта, конечной проводимости плазмы и пр.).

Дипольная геометрия магнитного поля Земли и близость оси магнитного диполя к оси вращения планеты приводят к специфическому сочетанию поля коротации E_{cor} и поля магнитосферных источников E_{ext} . Поле коротации до-

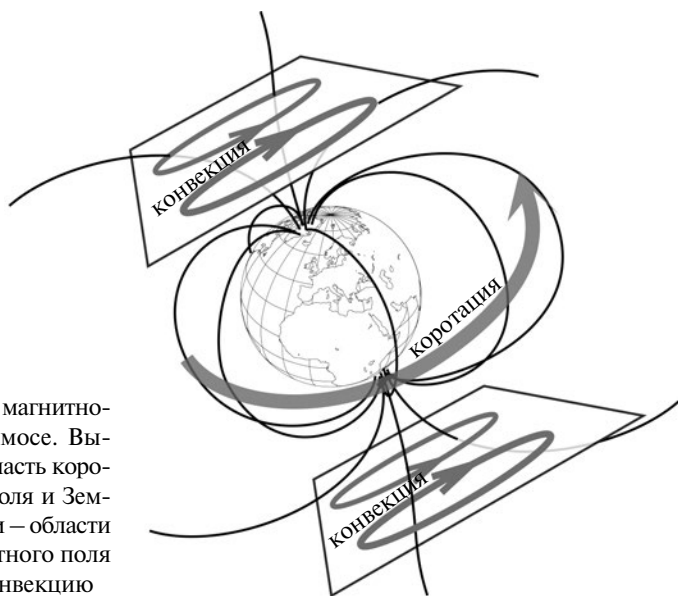


Рис. 2. Циркуляция плазмы и магнитного поля в околоземном космосе. Выделяются: плазмосфера — область коротации плазмы, магнитного поля и Земного шара, и полярные шапки — области вовлечения плазмы и магнитного поля Земли в магнитосферную конвекцию

стигает максимума в области экватора, где на ионосферных высотах оно значительно превышает остальные электрические поля. С ростом широты поле коротации уменьшается, обращаясь в ноль на географических полюсах. В терминах параметра Мак-Илвейна $E_{cor} \sim L^{-1/2}$. Напряжённость электрического поля, проецируемого из магнитосферы, наоборот, увеличивается с широтой из-за сгущения силовых линий у магнитных полюсов $E_{ext} \sim L^{3/2}$. Таким образом, в низких широтах всегда доминирует поле коротации, а в высоких широтах — поле магнитосферных источников. Узкая переходная зона, где $E_{cor} \sim E_{ext}$, расположена в области магнитных широт $\sim 60^\circ$ или $L \sim 4$ (точное положение границы изменчиво и зависит от магнитной активности).

Картина движения плазмы и магнитного поля Земли приобретает вид, представленный на рис. 2. В низких и средних широтах ионосферная плазма, магнитное поле, нейтральная атмосфера и Земной шар коротируют. В полярных шапках нейтральная атмосфера вовлечена во вращение Земли, а плазма и магнитное поле — в магнитосферную конвекцию, образуя два характерных встречных вихря (рис. 3). Конфигурация полярных вихрей изменчива, несимметрична, различается в северной и южной полярной шапках, и демонстрирует сильную зависимость от магнитной активности и направления межпланетного магнитного поля.

Плазма в зоне коротации (плазмосфера) движется в контакте с порождающей её нейтральной атмосферой. В дневном полушарии ионы, образующиеся на высотах 200–250 км в результате фотоионизации, поднимаются вверх, наполняя силовые трубки магнитного поля Земли. В ночном полушарии плазма опускается по силовым трубкам вниз и рекомбинирует в той же области высот. При этом соблюдается суточный баланс производства и потерь ионов.

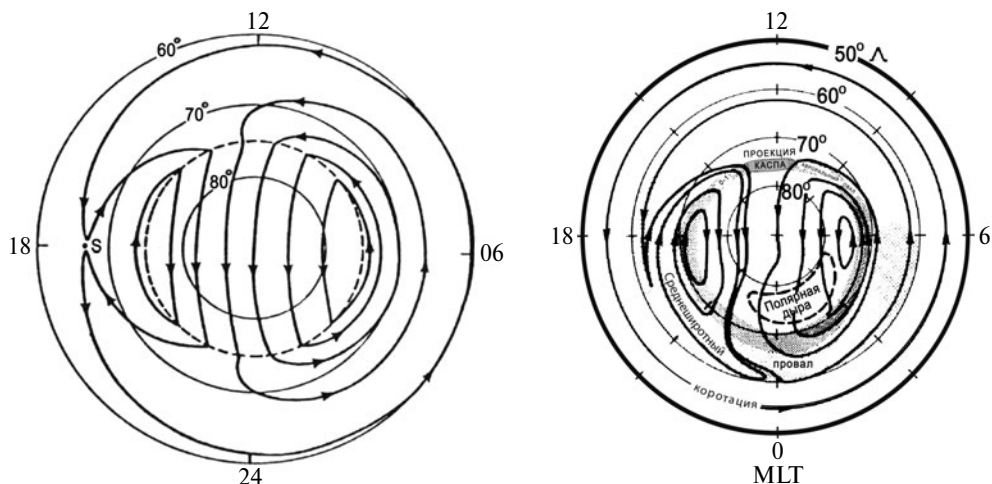


Рис. 3. Конвекция ионосферной плазмы в полярной шапке. Распределение линий тока фиксировано относительно Солнца. Относительно поверхности Земли плазма описывает более сложные траектории (рисунок взят из [14] и адаптирован)

Рис. 4. Линии конвекции и распределение плотности плазмы в полярной шапке. Показаны: авроральный овал, область каспа, среднеширотный провал, полярная дыра, граница зоны коротации (рисунок взят из [14] и адаптирован)

В полярных шапках основания магнитных силовых трубок чертят по нейтральной атмосфере сложные траектории, что приводит к нарушению баланса ионизации и рекомбинации в силовых трубках. В зимней полярной шапке часть силовых трубок циркулирует, опираясь на неосвещённую атмосферу, в результате образуются провалы концентрации плазмы сложной конфигурации — полярные дыры. Карта распределения концентрации плазмы в полярной ионосфере представлена на рис. 4.

Глобальная циркуляция нейтральной атмосферы

Особенность нагрева верхней атмосферы солнечным ультрафиолетом состоит в том, что температура воздуха растёт в течение всего светового дня, достигая максимума на закате «ультрафиолетового Солнца» (около 17 часов местного времени, рис. 5). Разница дневной и ночной температур (достигающая в условиях высокой солнечной активности 400...500 K) создаёт горизонтальный градиент давления и связанный с этим термический «солнечный прилив» — перетекание воздуха с дневной на ночную сторону Земли. Скорость движения в солнечном приливе контролируется ионным трением, причём из-за роста кинематической вязкости воздуха с высотой, вся толща атмосферы выше 250 км движется практически как единый слой. При этом оценка скорости ветра имеет вид:

$$n_n \nabla_{ni} (\vec{V}_p - \vec{V}_n) \cdot \hat{x} \sim \nabla_x (n_n k_B T_n), \quad (4)$$

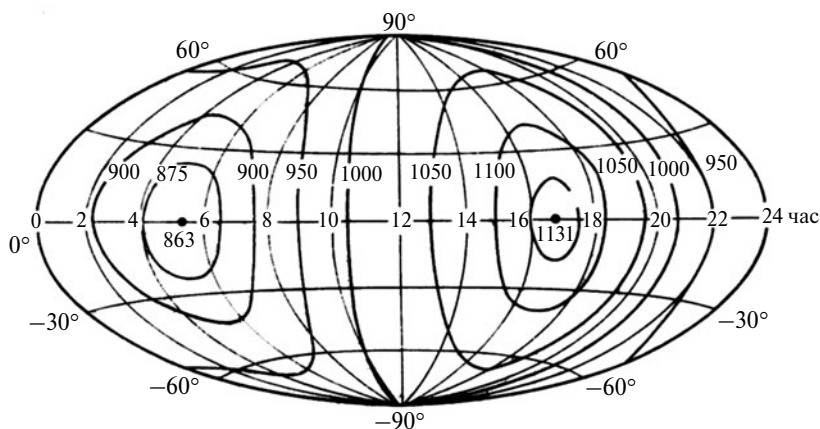


Рис. 5. Планетарное распределение экзосферной температуры (в К) для спокойных геомагнитных условий в равноденствие (рисунок взят [13])

где орт $\hat{x}$ направлен вдоль горизонтальной составляющей градиента давления, частота столкновений ν_{ni} отнесена к эффективной высоте ~ 250 км. Планетарная картина солнечного прилива представлена на рис. 6. Отметим, что максимальные скорости ветра достигаются в предполуночные часы и в зависимости от солнечной активности составляют 200...300 м/с.

Как можно видеть из рис. 6, в экваториальных широтах ветер направлен утром и днём на запад, а вечером и большую часть ночи на восток. В первом случае движение происходит преимущественно в дневных условиях, когда концентрация плазмы и связанное с этим ионное трение возрастают, а во втором случае в ночных условиях, когда влияние плазмы на движение нейтралов уменьшается. Соответственно, на ионосферных высотах скорость восточного ветра в среднем больше чем западного, верхняя атмосфера совершает более полного оборота в сутки — явление суперротации, впервые обнаруженное по наблюдениям за торможением низкоорбитальных спутников [12].

На солнечный прилив накладывается слабо выраженная меридиональная циркуляция, обусловленная неоднородностью нагрева атмосферы от экватора к полюсам (ячейка Хадли) [11, 15]. Скорости меридиональной циркуляции в 4–5 раз меньше, чем у солнечного прилива. Обратим внимание на различие циркуляционных ячеек в верхней и нижней атмосфере. На высотах F -области ионное трение доминирует над силой Кориолиса, вследствие чего от экватора до полюса образуется единственная циркуляционная ячейка — Хадли. Характерная для тропосферы геострофическая циркуляция и ячейка Феррела в ионосфере не реализуются.

Вторым по эффективности после Солнца источником разогрева верхней атмосферы служат процессы, вызывающие полярные сияния. Плотность потока энергии, вносимой в атмосферу выпадающими из магнитосферы частицами

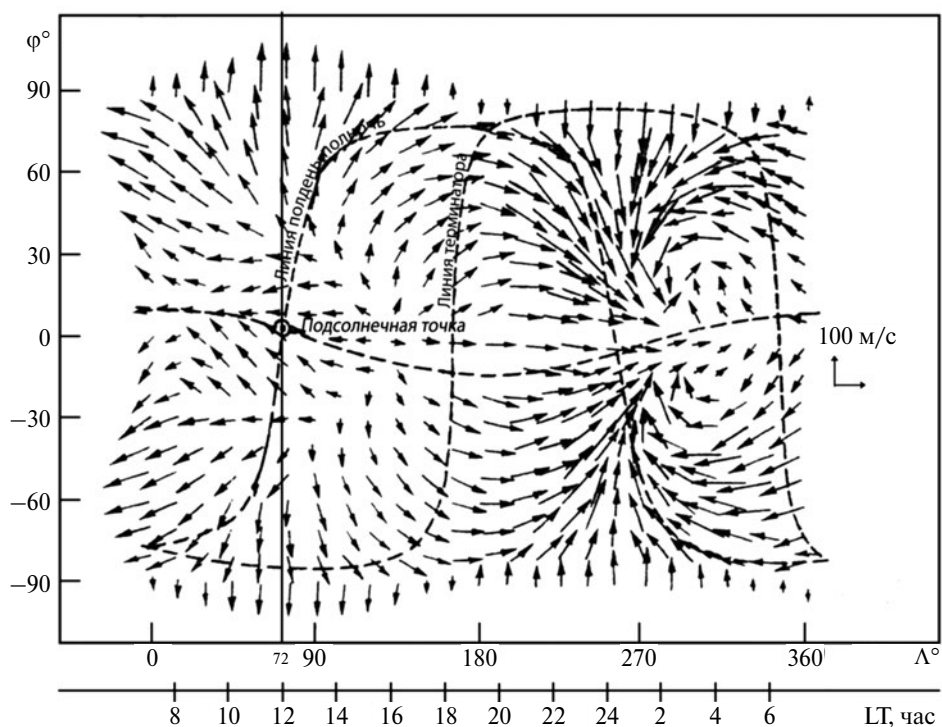


Рис. 6. Рассчитанное глобальное распределение скорости ветра на высоте 320 км (рисунок взят из [13] и адаптирован)

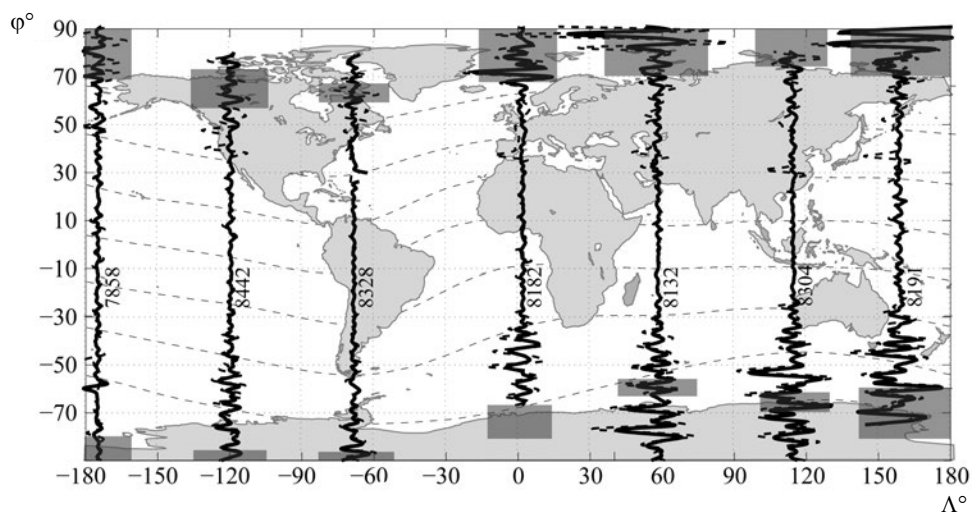
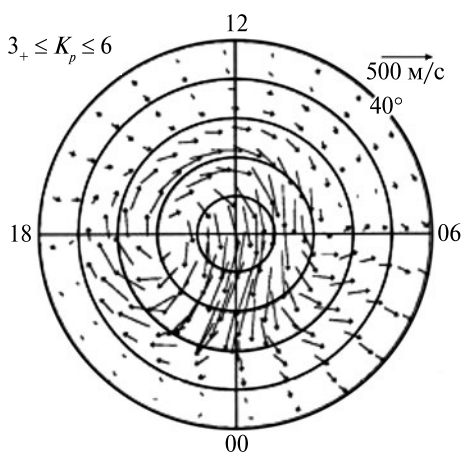


Рис. 7. Планетарное поле АГВ по данным измерений на спутнике «Dynamics Explorer 2». Волновые формы АГВ построены вдоль орбиты спутника. Подсвечены местоположения авральных овалов на момент проведения измерений

Рис. 8. Полярная циркуляция атмосферы на высотах около 300 км по данным наблюдений на спутнике DE 2 (рисунок взят из [15])



и ионосферно-магнитосферными токовыми струями, соизмерима с плотностью потока солнечного ионизирующего излучения. Вследствие нестационарного и пятнообразного распределения зон полярных сияний образуются резкие перепады атмосферного давления, возмущающие картину солнечного прилива в высоких широтах. Кроме того, в зонах полярных сияний происходит генерация АГВ, заполняющих полярные шапки и распространяющихся в экваториальном направлении вплоть до средних широт (рис. 7).

В полярных шапках достигает максимума скорость относительного движения нейтральной атмосферы (увлекаемой вращением Земли) и плазмы (увлекаемой конвекцией магнитного поля). Под действием ионного трения нейтральная атмосфера совершает сложное результирующее движение, содержащее как приливную, так и конвективную (вихревую) компоненту (рис. 8). Скорость ветра в полярных шапках в зависимости от магнитной активности достигает 400...500 м/с.

Генерация магнитных пульсаций под действием АГВ

В предыдущем разделе была описана структура циркуляция вещества в ионосфере. На эту картину, саму по себе переменчивую, накладывается широкий спектр колебаний и неустойчивостей, приводящих к дополнительному возмущению ионосферных параметров. В качестве выразительного примера рассмотрим рис. 9, на котором показан ход концентрации плазмы вдоль двух, разделённых четырьмя сутками, витков спутника DEMETER (Л. Банков, частное сообщение, 2012). Условия измерений на обоих витках примерно одинаковы: те же параметры $F_{10.7}$ и K_p , то же местное время, высота и те же географические координаты. Верхнюю эпюру на рис. 9 можно охарактеризовать как невозмущённое распределение ионосферной плазмы. Нижняя эпюра демонстрирует, во-первых, незначительное смещение этого распределения и, во-вторых, мощное возмущение в экваториальных широтах. (Обратим внимание, что вертикальные шкалы на рис. 9 — логарифмические).

Среди широкого перечня атмосферно-ионосферных волновых процессов особенную роль играют АГВ. Интерес к этому типу волн нейтральной атмосферы носит двоякий характер. Во-первых, АГВ обеспечивают эффективный

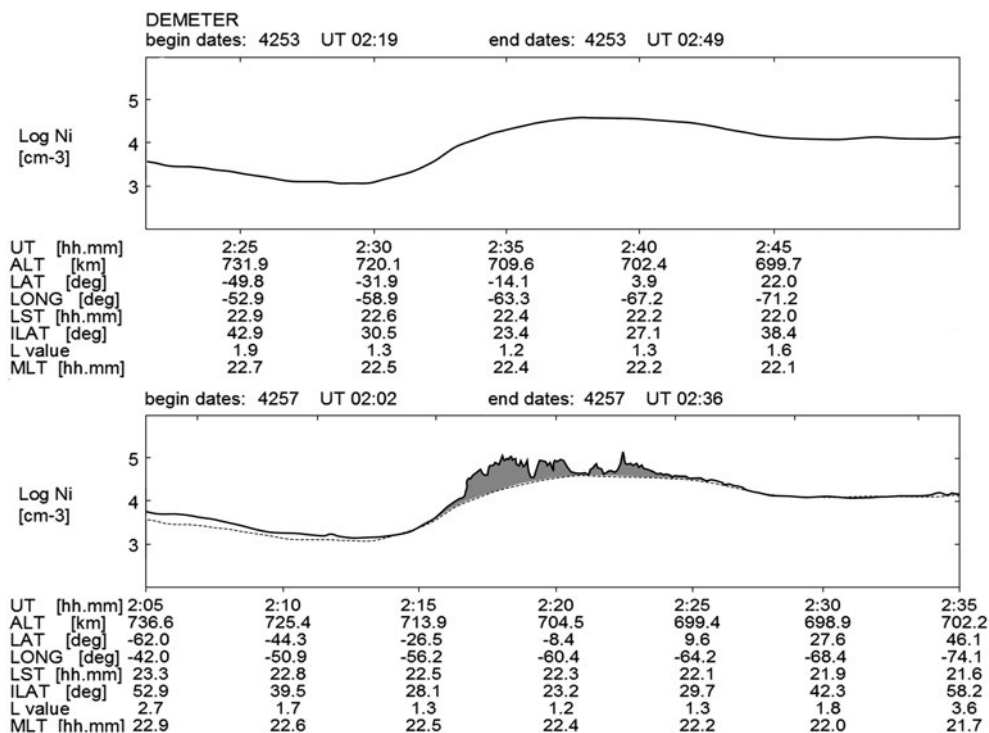


Рис. 9. Пример «спокойного» (верхний график) и «возмущённого» (нижний график) распределения плотности плазмы по данным измерений на спутнике DEMETER. Штриховая кривая на нижнем графике воспроизводит для сравнения кривую с верхнего графика. (Рисунок Л. Банкова)

перенос энергии и импульса, в частности — перераспределение в планетарном масштабе энергии, выделяющейся в зонах полярных сияний [12]. Во вторых, АГВ создают естественную динамическую связь ионосферы с нижележащей нейтральной атмосферой. Многие учёные, изучающие отклик ионосферы на приземные источники энерговыделения (сейсмику, погоду, техногенные факторы), обращаются к АГВ, как вероятному механизму переноса возмущений в ионосферу снизу (см. [5]).

Будучи гидродинамическим типом волн АГВ наблюдаются в диапазоне высот от поверхности Земли до основания экзосферы (до высот 400–600 км, в зависимости от солнечной активности). Плазменные неоднородности, индуцируемые АГВ, распространяются выше и регистрируются в виде ПИВ во всей *F*-области [16]. Соответствующие электромагнитные возмущения, по-видимому, охватывают силовую трубку магнитного поля Земли насквозь, вплоть до магнитосопрежённой ионосферы. Генерация и распространение АГВ на ионосферных высотах и генерация ПИВ под действием АГВ интенсивно исследуются уже более 60 лет. Электромагнитные эффекты АГВ изучены чрезвычайно мало.

Токовые структуры АГВ

На высотах динамо-области колебания нейтральных частиц в АГВ генерируют электрический ток, направленный поперёк силовых линий магнитного поля Земли. Замыкание этого тока осуществляется посредством продольного ионосферно-магнитосферного тока, уходящего на разомкнутых силовых линиях в бесконечность, а на замкнутых линиях — в магнитосопряжённую ионосферу (рис. 10). Токовые структуры АГВ впервые были описаны в работе [17].

Рассмотрим физический механизм генерации динамо-тока под действием АГВ. Стремясь к общности, будем полагать, что в ионосфере присутствует сторонний электрический ток (вызываемый, например, магнитосферными источниками):

$$\vec{j}_0 = \sum_{\alpha} e_{\alpha} n_p \vec{V}_{0\alpha} = \hat{\sigma} \cdot \vec{E}_0, \quad (5)$$

где индекс α обозначает сорт заряженных частиц (электроны и ионы), e_{α} — их заряд, $\vec{V}_{0\alpha} = \hat{\mu}_{\alpha} \vec{E}_0$ — скорость, $\hat{\mu}_{\alpha}$ — подвижность, $\hat{\sigma}$ — тензор проводимости плазмы, $\vec{E}_0$ — приложенное к ионосфере (стороннее) электрическое поле.

Под действием АГВ происходит:

- 1) столкновительное вовлечение заряженных частиц в движение нейтрального газа со скоростью $\delta \vec{V}_{\alpha}$ (в англоязычной литературе — dragging),
- 2) модуляция плотности ионосферной плазмы δn_p и подвижности заряженных частиц $\delta \hat{\mu}_{\alpha}$ из-за изменения температуры и концентрации нейтрального газа,
- 3) генерация разности потенциалов между магнитными силовыми линиями в глобальной ионосферно-магнитосферной токовой цепи, влекущей изменение электрического поля $\delta \vec{E}_0$.

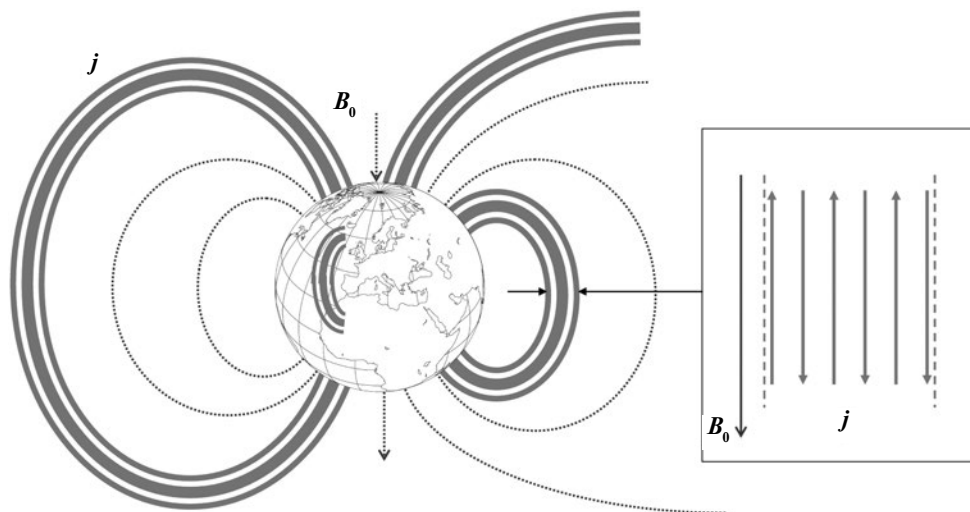


Рис. 10. Схематическое изображение токовых структур, генерируемых АГВ в магнитосфере Земли

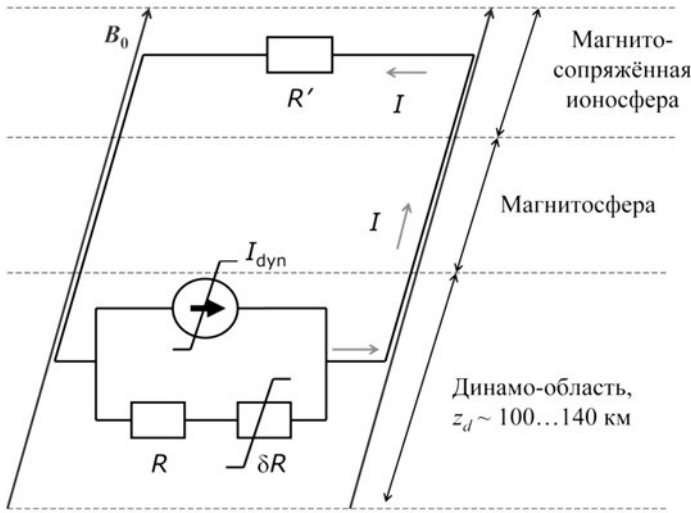


Рис. 11. Эквивалентная схема токовой цепи, индуцируемой АГВ в космической плазме

Факторы 2) и 3) непосредственно обуславливают вариацию скорости заряженных частиц $\delta \vec{V}_{0\alpha} = \delta \hat{\mu}_\alpha \cdot \vec{E}_0 + \hat{\mu}_\alpha \cdot \delta \vec{E}_0$. Тем самым

$$\vec{V}_\alpha - \vec{V}_{0\alpha} = \delta \vec{V}_\alpha + \delta \hat{\mu}_\alpha \cdot \vec{E}_0 + \hat{\mu}_\alpha \cdot \delta \vec{E}, \quad (6)$$

$$\vec{j} - \vec{j}_0 = \sum_{\alpha} e_{\alpha} n_p \cdot \delta \vec{V}_\alpha + \delta \hat{\sigma} \cdot \vec{E}_0 + \hat{\sigma} \cdot \delta \vec{E}, \quad (7)$$

где $\delta \hat{\sigma} = \sum e_{\alpha} (\delta n_p \hat{\mu}_\alpha + n_p \delta \hat{\mu}_\alpha)$ – вариация проводимости ионосферной плазмы под действием АГВ. Слагаемые в правой части (7) соответствуют трём основополагающим механизмам возбуждения электрического тока в ионосфере. Первое слагаемое:

$$\delta \vec{j}_{dyn} = \sum_{\alpha} e_{\alpha} n_p \delta \vec{V}_\alpha \quad (8)$$

– динамо-ток [14]. Второе слагаемое:

$$\delta \vec{j}_{mod} = \delta \hat{\sigma} \cdot \vec{E}_0 \quad (9)$$

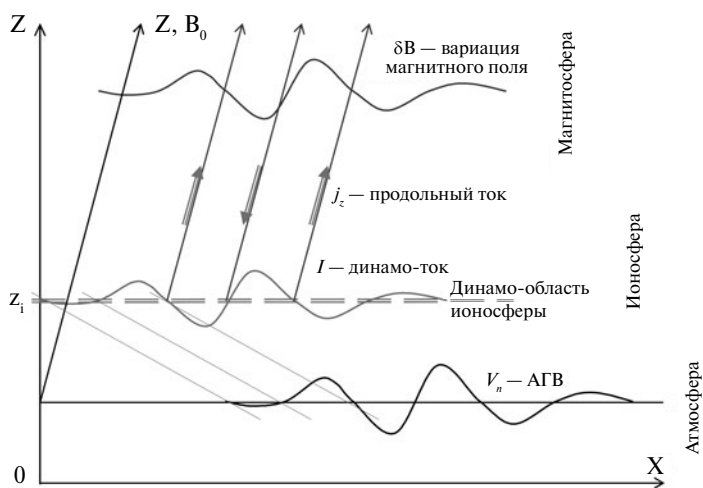
– модуляция стороннего тока из-за вариации проводимости ионосферной плазмы [17]. Третье слагаемое:

$$\delta \vec{j}_R = \hat{\sigma} \cdot \delta \vec{E}_0 \quad (10)$$

– ток под действием разности потенциалов в электрической цепи, индуцированной АГВ.

На рис. 11 представлена соответствующая эквивалентная схема. Показаны: $I_{dynx} = \int_{(Z_d)} j_{dynx} dz$ – интегральный динамо-ток (где Z_d – диапазон высот динамо-слоя), R – интегральное поперечное педерсеновское сопротивление ионосферы, $\delta R \ll R$ – вариативная часть сопротивления, ответ-

Рис. 12. Последовательность взаимодействий: распространение АГВ от приземных источников на высоты ионосферы → генерация поперечного динамо-тока → инжекция продольного тока в магнитосферу → возмущение силовой трубки магнитного поля Земли [17]



ственная за генерацию тока $\delta \vec{j}_{mod}$. Как видно из рис. 11, суммарный ионосферный ток равен:

$$I_x = I_{dyn\ x} - I_R, \quad (11)$$

где $I_R = \int_{Zd} j_R dz$ — ток через «шунтирующее» сопротивление ионосферной плазмы R . В случае если параметры плазмы на противоположных концах магнитной силовой трубки одинаковы ($R = R'$, $I_R = I_{R'} = I_x$), то $I_x = I_{dyn\ x} / 2$.

Расчётов параметров электромагнитных возмущений

В действительности АГВ создаёт непрерывный градиент динамо-тока, поэтому следует рассчитывать электрическую схему не с сосредоточенными, а распределёнными параметрами (рис. 12). Для простоты будем полагать, что магнитное поле Земли направлено вертикально, в этом случае поперечные ионосферные токи являются горизонтальными, а ионосферно-магнитосферные продольные токи — вертикальными. Имеющее в действительности наклонение магнитного поля приводит к несущественным количественным поправкам [17], за исключением специального случая горизонтального направления магнитного поля в области магнитного экватора [14].

Вариации δj_{dyn} и δj_{mod} не связаны между собой, что позволяет исследовать их по отдельности. Рассмотрим слагаемую тока δj_{dyn} . Зададим скорость нейтральных частиц в АГВ в виде плоской неоднородной монохроматической волны:

$$\delta \vec{V}(t, \vec{r}) = \vec{V}_k(z) \cdot \exp\{i(\omega t - k_x x - k_z z)\}, \quad (12)$$

где амплитуда скорости $\vec{V}_k = \vec{V}_k(z)$ зависит от вертикальной координаты (например, в классическом случае бездиссипативного распространения АГВ $V_k \sim \exp\{+z/2H\}$, где H — высота однородной атмосферы). В линейном при-

ближении из уравнений движения заряженных частиц следует линейная же зависимость между скоростями нейтральной и заряженных компонент:

$$\delta \vec{V}_\alpha(t, \vec{r}) = \hat{R}_\alpha(z) \cdot \delta \vec{V}(t, \vec{r}), \quad (13)$$

Аналитическое соотношение для коэффициента связи $\hat{R}_\alpha$ выведено, например, в [18]. Подставляя (13) в (8) и интегрируя по z находим интегральный динамо-ток:

$$I_{dyn\ x}(t, x) = I_{AGW} \cdot \exp\{i(\omega t - k_x x)\}, \quad (14)$$

амплитуда которого I_{AGW} численно рассчитывалась в [17, 19], см. табл. 1. В работе [17] получена аналитическая оценка величины динамо-тока:

$$I_{AGW} \sim (a \cdot I_g) \big|_{z=z_i}, \quad (15)$$

где $a = \delta n_n / n_n$ — относительная амплитуда АГВ, $I_g = 2H \cdot en_p c_s$ — масштаб погонного тока (в А/м), зависящий только от параметров атмосферно-ионосферной среды, c_s — скорость звука. Величины в правой части (15) отнесены к верхней границе динамо-слоя $z_i = 130$ км.

Замыкание поперечного тока (14) происходит через продольный ионосферно-магнитосферный ток [20]:

$$j_z(z) = -\frac{\partial}{\partial x} \int_0^z j_x dz. \quad (16)$$

Полагая, что поперечный ток j_x эффективно сосредоточен в области динамо-слоя Z_d и пренебрегая продольным током, поступающим в ионосферу снизу $j_z|_{z=z_e} \rightarrow 0$, получим:

$$j_z(t, x) \big|_{z>Z_d} = -\frac{\partial}{\partial x} \int j_x dz = ik_x I_x(t, x) = ik_x f \cdot I_{dyn\ x}(t, x), \quad (17)$$

где численный фактор $f < 1$ учитывает различие между током $I_{dyn\ x}$, генерируемым АГВ, и суммарным током в ионосфере I_x . Как было указано выше, при $R = R'$ имеем $f = 0,5$.

Таким образом, динамо-область ионосферы под воздействием АГВ становится источником продольных токов (17), инжектируемых в магнитосферу

Таблица 1

Амплитуда погонного динамо-тока I_{AGW} и связанное с ним возмущение магнитного поля Земли δB_y в зависимости от n_p — концентрации ионосферной плазмы и a — относительной амплитуды АГВ на высоте $z = 130$ км

$n_p = 2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (ночь)		$n_p = 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ (день)	
$a = 0,03; V_k = 10 \text{ м/с}$	$a = 0,2; V_k = 70 \text{ м/с}$	$a = 0,03; V_k = 10 \text{ м/с}$	$a = 0,2; V_k = 70 \text{ м/с}$
$I_{AGW} = 0,6 \text{ мА/м}$ $\delta B_y = 0,3 \text{ нТл}$	$I_{AGW} = 4 \text{ мА/м}$ $\delta B_y = 2 \text{ нТл}$	$I_{AGW} = 6 \text{ мА/м}$ $\delta B_y = 3 \text{ нТл}$	$I_{AGW} = 40 \text{ мА/м}$ $\delta B_y = 20 \text{ нТл}$

снизу. Если бы магнитосфера представляла собой плоское однородное полупространство, распространение продольных токов происходило бы в виде бегущих альфвеновских волн [20]. В действительности при периодах АГВ десятки минут — часы длины альфвеновских волн составляют миллионы километров, тем самым вся магнитосфера Земли лежит в ближней зоне источника (17). В таких условиях эффектом запаздывания в токовых системах АГВ можно пренебречь.

Вариации электрического и магнитного полей, связанные с распространением продольного тока (17), согласно [20, 21] равны:

$$\delta B_y(t, x) = \mu_0 I_x(t, x), \quad E_x(t, x) = \frac{I_x(t, x)}{\Sigma_p} = \frac{\delta B_y(t, x)}{\mu_0 \Sigma_p}, \quad (18)$$

где $\Sigma_p = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_p dz \approx \int_{(Zd)} \sigma_p dz$ — интегральная педерсеновская проводимость ионосферы.

Перейдём к анализу составляющей электрического тока δj_{mod} . Не вдаваясь в детали расчёта, в целом аналогичного предыдущему, отметим специфическую особенность этого механизма индукции магнитного поля. Фоновый ионосферный ток j_0 уже сам по себе является источником изменения магнитного поля Земли δB_0 , таким образом, магнитное возмущение от АГВ, обозначим его δB_{mod} , возникает как вариация над ранее существующей вариацией δB_0 . При одной и той же амплитуде АГВ δj_{mod} и δB_{mod} будут тем больше, чем больше фоновые j_0 и δB_0 , в их отсутствии — не будет и эффекта от АГВ.

Характерные значения магнитных пульсаций δB_0 , генерируемых различными источниками в ионосфере Земли, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики наиболее сильных токовых структур в ионосфере

Источник	Максимальное возмущение δB_0 и соответствующий погонный ток I_0 в ионосфере	Локализация
Экваториальный электроджет	$I_0 \sim 350$ мА/м, $\delta B_0 \sim 200$ нТ	Экваториальная ионосфера, день
Проекция поля магнитосферной конвекции	$I_0 \sim 200$ мА/м, $\delta B_0 \sim 120$ нТ	Полярные шапки
Крупномасштабные авроральные токовые струи	$I_0 \sim 100$ мА/м, $\delta B_0 \sim 60$ нТ	Авроральные овалы
Мелкомасштабные авроральные структуры	$I_0 \sim 500$ мА/м, $\delta B_0 \sim 300$ нТ	В дугах сильных полярных сияний с горизонтальным масштабом ~ 10 км
Солнечные приливы (S_q -вариации)	Динамо-поле $E_0 \sim 10$ мВ/м, $I_0 \sim 40$ мА/м, $\delta B_0 \sim 20$ нТ	Низкие и средние широты, день

Аналитическая оценка электромагнитного эффекта АГВ имеет вид [17]:

$$\delta B_{\text{mod}} \sim a \Big|_{z=Zd} \delta B_0, E_{\text{mod}}(t, x) = \frac{\delta B_{\text{mod}}(t, x)}{\mu_0 \Sigma_p}. \quad (19)$$

Экспериментально составляющие электромагнитного возмущения (18) и (19) трудно или даже невозможно разделить между собой, хотя динамо-эффект обычно превалирует над эффектом модуляции проводимости плазмы: только в наиболее сильных токовых системах в ионосфере $\delta j_{\text{mod}} \sim \delta j_{\text{dyn}}$.

Резюмируя, выделим следующие моменты:

1. Горизонтальное распределение электромагнитного возмущения, генерируемого АГВ, воспроизводит в магнитосфере пространственную структуру АГВ на высотах динамо-слоя;
2. Электромагнитная структура АГВ транслируется вверх по силовой трубке магнитного поля Земли и переносится в магнитосопрежѐнную ионосферу (рис. 12). Данный эффект экспериментально подтверждѐн в работе [17] по данным наземных наблюдений;
3. Следует ожидать, что с высотой происходит геометрическая трансформация токовой структуры АГВ, связанная с расхождением силовых линий магнитного поля Земли.

Сравнение электромагнитных эффектов АГВ и МГД волн

Колебания силовых трубок магнитного поля Земли под действием АГВ происходят на фоне аналогичных колебаний, генерируемых магнитосферными источниками — МГД волн, падающих на ионосферу сверху. Сравнение параметров обоих типов волновых возмущений дано в табл. 3. Пиковые амплитуды возмущений от АГВ могут быть на порядок больше чем указанные в таблице средние значения, амплитуды МГД возмущений — на два порядка больше.

Таблица 3

Соотношение параметров электромагнитных возмущений, создаваемых альфвеновской волной и АГВ, при одинаковой амплитуде вариации магнитного поля $\delta B = 2$ нТл, горизонтальная длина волны принята $\lambda_x = 500$ км

Частота при регистрации с борта спутника	Магнитная вариация	Продольный ток	Электрическое поле	Скорость плазменного дрейфа
Альфвеновские волны				
0,02—100 Гц	2 нТл	0,02 мкА/м ²	2 мВ/м	50 м/с
АГВ				
0,05—0,02 Гц	2 нТл	0,02 мкА/м ²	0,4 мВ/м (ночь) 0,04 мВ/м (день)	10 м/с (ночь) 1 м/с (день)

Отличительные признаки электромагнитных структур АГВ следующие

1. Частотный диапазон. При регистрации с низкоорбитального спутника (~600—700 км) периоды возмущений составляют ~1—3 мин.

2. Пространственная локализация. Во всей магнитной силовой трубке электромагнитное возмущение имеет горизонтальную структуру, задаваемую АГВ в динамо-области (рис. 12). Следует ожидать, что возмущение представляет собой цуг из нескольких периодов колебаний общей горизонтальной протяжённостью несколько тысяч км.

3. Соотношения амплитуд j_z , δB_y , E_x и возмущений скорости дрейфа плазмы V_p [21]. Для МГД волн:

$$j_z = \mu_0^{-1} \frac{\partial}{\partial x} \delta B_y = i\mu_0^{-1} k_x \delta B_y, E_x = V_A \cdot \delta B_y, V_p = \frac{E_x}{B_0} = V_A \frac{\delta B_y}{B_0}, \quad (20)$$

где V_A — локальная альфвеновская скорость. Для АГВ:

$$j_z = i\mu_0^{-1} k_x \delta B_y, E_x = \frac{\delta B_y}{\mu_0 \Sigma_p}, V_p = \frac{1}{\mu_0 \Sigma_p B_0} \delta B_y. \quad (21)$$

Отсюда следует, что при тех же величинах магнитных вариаций АГВ создают в ионосфере гораздо меньшие электрические поля и меньшую скорость дрейфа плазмы, чем МГД волны.

Представленная теория электромагнитных эффектов АГВ была разработана на основе анализа и истолкования огромного массива данных, полученных в результате наблюдений на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» и в магнитосопряжённом регионе в Новой Англии (США) [17]. Проект «Ионосат-Микро» впервые ставит целью регистрацию электромагнитных эффектов АГВ непосредственно в космосе.

Заключение

Космический аппарат «Микросат» будет выведен на круговую высокоширотную солнечно-синхронную орбиту с номинальными параметрами: наклонение $98,1^\circ$, высота 668 км, местное солнечное время в нисходящем узле орбиты 10 часов 31 минута. Такая орбита пересекает все структуры ионосферы, рассмотренные в статье, — плазмосферу, авроральные овалы, полярные вихри и пр. Представляется удачной и ориентация плоскости орбиты по линии 10:30—22:30 солнечного времени, которая с течением времени будет прецессировать в направлении линии полдень — полночь, покрывая такие специфические образования в ионосфере, как экваториальная аномалия, среднеширотный провал, область каспа.

Высота орбиты 668 км значительно превышает высоту максимума концентрации околосредней плазмы (250...300 км) и относится уже к внешней части F -области ионосферы. Вместе с тем, согласно терминологии, принятой в



физике атмосферы, спутник запускается в экзосферу. В этой области возмущения нейтрального газа возникают как «эхо» от движений нижележащей столкновительной термосферы, причём механизмом генерации неоднородностей служит свободномолекулярный перенос возмущений вверх с высоты экзобазы (400...600 км). В проекте «Ионосат-Микро» измерение структуры экзосферных неоднородностей будет проведено впервые в истории космических исследований.

Космический аппарат «Микросат» несёт хорошо оснащённый приборный комплекс для диагностики вариаций атмосферно-ионосферных параметров, включающий:

- датчики DN и DE для измерения концентрации и температуры нейтральной, электронной и ионной компонент космической среды и их возмущений,
- магнитометр FGM для прецизионного измерения магнитного поля Земли,
- электрические, магнитные и токовые зонды в составе 3-х датчиков WP и датчик электрического поля EP. Нижняя частота среза WP составляет около 0,1 Гц, тем самым на борту будет регистрироваться *тонкая структура* продольных токов и поперечных дрейфов плазмы (2), с масштабом не более (7,8 км/с)/(0,1 Гц) ~ 80 км.

Отметим, что в литературе мы, как правило, встречаем примеры регистрации отдельных (наиболее выразительных) динамических возмущений ионосферы, не описывающие и не ставящие целью описать целостную картину ионосферной активности. Являясь скорее иллюстративными, чем репрезентативными, такие примеры не создают представления о планетарном распределении и циркуляции ионосферных неоднородностей, их характерных параметрах, изменчивости, зависимости от гелио- и геофизических условий и т.п. Цель проекта состоит в последовательном, систематическом и долговременном наблюдении за ходом ионосферных изменений и создании соответствующей базы экспериментальных данных.

Работа поддержана проектом целевых инициатив УНТЦ-ГКАУ № 5567.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лизунов Г.В., Лукенюк А.А., Макаров А.Л., Фёдоров О.П. Космический проект Ионосат-Микро: цели и методы // Космический проект «Ионосат-Микро». — К. : Академперіодика, 2013. — С. 11—25.
2. Rishbeth H. Ionoquakes: earthquake precursors in the ionosphere // Eos. — 8 August 2006. — V. 97, No 2.
3. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992. — 304 с.
4. 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.

5. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф. Монография. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2012. — 555 с.
6. Гримальский В.В., Ивченко В.Н., Лизунов Г.В. Спутниковые наблюдения ионосферных предвестников землетрясений // Космічна наука і технологія. — 2000. — Т. 6, № 2/3. — С. 21—30.
7. Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. — 1960. — V. 38. P. 1441—1481.
8. Лизунов Г.В., Федоренко А.К. Генерация атмосферных гравитационных волн солнечным терминатором по данным измерений на спутнике «Atmosphere Explorer-E» // Радиофизика и радиоастрономия. — 2006. — Т. 11, № 1. — С. 49—62.
9. Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М.: «Энергоатомиздат», 1982. — 136 с.
10. Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A. Geoelectromagnetic waves. — Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1996. — 370 p.
11. Roble R.G. The thermosphere. The Upper Atmosphere and Magnetosphere // National Academy of Sciences, Washington, D.C. — 1977. — P. 57—71.
12. Маров М.Я., Колесниченко А.В. Введение в планетную аэрономию. — М.: Наука, 1987. — 456 с.
13. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 528 с.
14. Kelley M.C. The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics. — Academic Press. Inc. International Geophysics Series. v. 43, 1989. — 485 p.
15. Forbes J.M., Dynamics of the thermosphere // J. Meteor. Soc. Japan. — 2007. — vol. 85B, — P. 193—213.
16. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982—1995 // Ann. Geophys. — 1996. — V. 14. — P. 917—940.
17. Ямпольский Ю.М., Зализовский А.В., Литвиненко Л.Н., Лизунов Г.В., Гровс К., Молдвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. — 2004. — Т. 9, № 2. — С. 130—151.
18. Pokhotelov O.A., Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Stenflo L., Shukla P.K. Induced electromagnetic turbulence in the ionosphere and the magnetosphere // Physica Scripta. — 1994. — V. 50. — P. 600—605.
19. Pogoreltsev A.I. Production of electromagnetic field disturbances due to the interaction between acoustic gravity waves and the ionospheric plasma // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. — 1996. — Vol. 58, № 10. — P. 1125—1141.
20. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. — М.: Наука. 1983. — 192 с.
21. Stasiewicz K., Bellan P., Chaston C., Kletzing C., Lysak R., Maggs J., Pokhotelov O., Seyler C., Shukla P., Stenflo L., Streltsov A., Wahlund J.-E. Small scale Alfvénic structure in the aurora — Space Science Reviews. — 2000. — Vol. 92. — P. 423—533.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИСТЛЕРНЫХ ВОЛН В ПРОЕКТЕ «ИОНОСАТ-МИКРО»

**Ч. ФЕРЕНЦ, Ф.Л. ДУДКИН, В.Е. КОРЕПАНОВ,
Г.В. ЛИЗУНОВ, Я. ЛИХТЕНБЕРГЕР**

Вистлеры как природное средство зондирования геокосмоса

Вистлер (в русскоязычной литературе — свистящий атмосферик) представляет собой диспергированную электромагнитную волну ОНЧ диапазона, генерируемую молниевыми разрядами у поверхности Земли. Вистлеры регистрируются как на Земле, так и в космосе после прохождения нескольких специфических областей околоземного пространства. К ним относятся: 1) волновод Земля-ионосфера (при регистрации на Земле он пересекается волной дважды — до входа в ионосферу и после выхода из неё); 2) ионосфера (при наземной регистрации также пересекаемая дважды); 3) магнитосфера (пересекается от одного до нескольких раз). На эпюре радиосигнала вистлер выделяется как всплеск интенсивности (что, однако, характерно для наблюдений в электромагнитно-чистых регионах Земного шара, таких как Антарктика; в населённых же регионах вистлеры сильно маскируются техногенными шумами, см. рис. 1 на цветной вкладке).

Общепринятым способом визуализации вистлеров является построение динамических спектров или спектрограмм, примеры которых представлены на рис. 2, 3 (см. на цветной вкладке). На рис. 2 последовательно показаны спектральные и волновые формы вистлерных сигналов от датчиков электрического (Е) и магнитного поля (В), а также плотности электрического тока (J), полученные с борта спутника «Сич-1М» с помощью аппаратуры эксперимента «Вариант». Спутник находился в это время над зоной интенсивной грозовой активности в районе Африканского Рога. Несмотря на наличие бортовых электромагнитных помех, соотношение сигнал/помеха в этом случае значительно выше, чем при наземных измерениях. На рис. 3 (см. на цветной вкладке) показаны вистлеры, зарегистрированные датчиком электрического поля на спутнике «Чибис-М».

История исследования вистлерных волн с помощью наземных приёмников и позднее искусственных спутников Земли берёт начало в середине 20-го столетия. Благодаря тому, что ОНЧ электромагнитные волны распространяются через обширные области космического пространства по сложным, направляемым магнитным полем Земли траекториям, наблюдения вистлеров, в принципе, могут быть использованы для диагностики параметров ионосферы и магнитосферы [1]. Можно сказать, что вистлеры, обильно генерируемые грозовой активно-

стью, выступают даровым природным средством для зондирования геокосмоса ([2, 3, 4, 5] и др.). Однако, из-за отсутствия должной наблюдательной базы, такого рода теоретические возможности до сих пор не были реализованы.

Последние годы ситуация стала меняться. Получила развитие теория распространения электромагнитных волн в реальной — неоднородной, анизотропной и движущейся — космической плазме [2, 6, 7]. Происходит наращивание базы данных вистлерных измерений в многочисленных пунктах на поверхности Земли и на космических аппаратах (DEMETER, «Чибис» и др.). Вступили в действие и расширяются глобальные сети станций наземного мониторинга вистлерных волн AWDANet [8] и грозовой активности WWLLN [9].

Первые результаты обработки данных AWDANet и WWLLN [4, 10, 11, 4] лишь отчасти подтвердили теоретические представления о генерации и распространении вистлерных волн, одновременно вскрыв ряд проблем. Рассмотрим рис. 4 (вынесен на цветную вкладку), на котором показано географическое распределение корреляции частоты наблюдений вистлеров на станции AWDANet «Розера» (Антарктика) с грозовой активностью. Максимальная корреляция достигается с районом Бостона (Северная Америка), что согласуется с основополагающим представлением о том, что распространение вистлерных волн в целом происходит вдоль силовых линий геомагнитного поля.

В случае приёма вистлеров на AWDANet станции «Дунедин», Новая Зеландия, волновые события не коррелируют (!) с молниевой активностью в магнитосопрежённой области, что иллюстрирует рис. 5 (см. на цветной вкладке). Как показывает более детальный анализ [11], источник вистлеров, в этом случае, вероятно, расположен в районе западного побережья Северной Америки, вдали от соответствующей магнитной силовой трубки. Этот результат является серьёзным вызовом теории распространения ОНЧ волн, упускающей, как видно из приведенного примера, актуальные, реализуемые в природе сценарии. Более глубокий анализ проблемы требует привлечения дополнительных данных, прежде всего по регистрации вистлеров в космосе на пути распространения этих сигналов.

На рис. 6 (см. на цветной вкладке) представлены регистрации вистлеров на спутнике DEMETER и одновременно под спутником на станции «Дунедин», Новая Зеландия [5]. Амплитудно-частотный состав вистлеров на Земле и в космосе отличается. Истолкование наблюдаемых различий должно стать предметом отдельного специального исследования, требующего идентификации режимов распространения вистлерных сигналов, учёта влияния нижней границы ионосферы на лучевые траектории и т.д.

Восстановление спектральных характеристик вистлерных волн по данным многокомпонентных электромагнитных измерений

Регистрация волновых процессов на борту спутника, как и другие одноточечные измерения, страдает тем недостатком, что измеряется только часто-

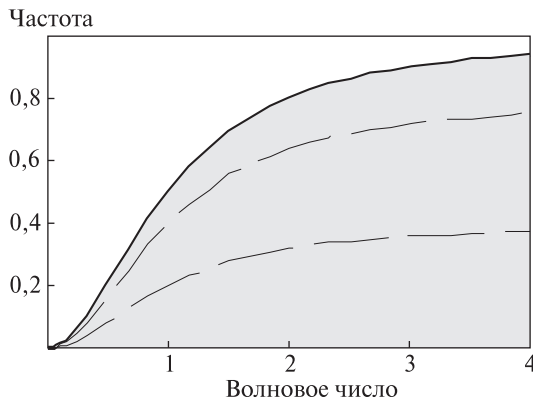


Рис. 7. Дисперсионная плоскость — нормированная частота ω / ω_c как функция нормированного волнового числа ck / ω_p . Заштрихована область существования вистлерных волн. Пунктиром показаны дисперсионные ветви $\omega = \omega(k)$, соответствующие различным направлениям распространения θ

та волнового процесса, в то время как волновой вектор остаётся неизвестным. Остановимся на этом подробнее.

При монохроматическом описании волнового процесса закон дисперсии вистлерных волн имеет вид [12]:

$$\omega = \omega_c \cos \theta \frac{n^2}{1 + n^2},$$

где ω — частота вистлера, $n = ck / \omega_p$, k — волновое число, θ — направление распространения волны по отношению к внешнему магнитному полю, c — скорость света, ω_p — ленгмюровская частота плазмы, ω_c — электронная циклотронная частота.

На дисперсионной поверхности $\{k, \omega\}$ вистлерные волны заполняют сплошную область (рис. 7) таким образом, что каждой частоте сигнала соответствует множество волновых мод, распространяющихся с различными волновыми векторами в разных направлениях и с разными скоростями.

Отсутствие информации о полном модовом составе волнового процесса $\{\omega, k_x, k_y, k_z\}$, т. е. о его дисперсионных соотношениях $\omega = \omega(\mathbf{k})$, является серьёзным недостатком эксперимента, вынуждающем исследователя судить об источниках волн и их лучевых траекториях по каким-то дополнительным косвенным признакам, либо использовать для изучения волновых процессов в плазме кластерные спутниковые конфигурации [13].

Однако следует заметить, что пространственно-временная неопределенность при изучении волновых процессов с одиночного спутника может быть устранена при одновременных измерениях составляющих векторов магнитного поля и плотности тока. При этом дисперсионные соотношения для волн в плазме могут быть восстановлены по результатам этих измерений [14, 15, 16].

Покажем возможность определения дисперсионных соотношений из результатов измерения магнитного поля и плотности тока в космической плазме [14]. Рассмотрим уравнение Максвелла

$$\Delta \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} \quad (1)$$

в прямоугольной системе координат $x_i, i=1, 2, 3$. Здесь $\mathbf{B}, \mathbf{J}$ — векторы магнитного поля и плотности тока соответственно (причем $\mathbf{J}$ может быть суммой токов смещения и проводимости), μ — абсолютная магнитная проницаемость среды (для плазмы $\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м — абсолютная магнитная проницаемость вакуума). Тогда уравнение (1) может быть записано в форме

$$\mathbf{x}_1(\partial B_3 / \partial x_2 - \partial B_2 / \partial x_3) + \mathbf{x}_2(\partial B_1 / \partial x_3 - \partial B_3 / \partial x_1) + \mathbf{x}_3(\partial B_2 / \partial x_1 - \partial B_1 / \partial x_2) = \mu_0(\mathbf{x}_1 J_1 + \mathbf{x}_2 J_2 + \mathbf{x}_3 J_3), \quad (2)$$

где $\mathbf{x}_i$ орты системы координат, $A_i = A_{x_i}$, $A = B, J$.

Воспользуемся разложением электромагнитной волны в плазме по плоским волнам в комплексном представлении

$$\dot{\mathbf{B}} = \dot{\mathbf{B}}_0 \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}). \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{J}} = \dot{\mathbf{J}}_0 \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}). \quad (4)$$

где $\dot{\mathbf{B}}_0, \dot{\mathbf{J}}_0$ записаны в форме

$$\dot{\mathbf{A}}_0 = \exp(-j\omega t) \sum_{i=1}^{i=3} \mathbf{x}_i \dot{A}_{0i}, \quad (5)$$

$j = (-1)^{0.5}$, $\mathbf{k}$ — волновой вектор, $\mathbf{r}$ — радиус-вектор, $\dot{A}_{0i} = A_{0i} \exp(j\varphi_{A_{0i}})$, $A_{0i} = A_{0x_i}$ — декартовы компоненты действительного вектора $\mathbf{A}_0$, $\varphi_{A_{0i}}$ — фаза A_{0i} — компоненты, ω — угловая частота, t — время. Для плоской волны можно полагать, что величины пространственных производных магнитного поля и плотности тока весьма малы (что для вистлеров, всегда регистрируемых в дальней волновой зоне, является естественным допущением), т. е. $\partial A_{0i} / \partial x_l \rightarrow 0$, где $i, l = 1, 2, 3$.

Подставляя соотношения (3—5) в (2), получим следующую систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} k_2 \dot{B}_{03} - k_3 \dot{B}_{02} &= j\mu_0 \dot{J}_{01}, \\ k_3 \dot{B}_{01} - k_1 \dot{B}_{03} &= j\mu_0 \dot{J}_{02}, \\ k_1 \dot{B}_{02} - k_2 \dot{B}_{01} &= j\mu_0 \dot{J}_{03}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $k_i = k_{x_i}$.

Уравнение (6) позволяет вычислять составляющие волнового вектора для каждой компоненты Фурье-спектра при использовании данных 3-х компонентного магнитометра и 3-х компонентного измерителя плотности тока, т. е. дисперсионные соотношения $\mathbf{k} = \mathbf{k}(\omega)$. Эти данные могут быть получены с помощью довольно компактного устройства — волнового зонда, который состоит из высокочувствительных индукционного магнитометра и измерителя плотности тока, смонтированных в одном конструктиве цилиндрической формы диаметром около 30 мм и длиной около 300 мм. Очевидно, что неоднородностью электромагнитной волны для устройства таких размеров можно пренебречь.

Методика измерений компонент плотности пространственного тока, перпендикулярных направлению движения спутника, достаточно подробно описана в [14]. Для компоненты, коллинеарной скорости спутника, некоторые вопросы остаются невыясненными. С целью устранения неоднозначности система уравнений (6) может быть редуцирована до двух уравнений при использовании уравнения Максвелла

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (7)$$

При подстановке соотношений (3–5) в уравнение (7) получим

$$\sum_{i=1}^{i=3} k_i \dot{B}_{0i} = 0. \quad (8)$$

Например, из уравнений (6), (8) для заданных $\dot{J}_{01}, \dot{J}_{02}$ можно получить новую систему уравнений для составляющих волнового вектора, которые определяются пятью величинами: тремя компонентами вектора магнитного поля $\dot{B}_{0i}, i=1, 2, 3$ и двумя компонентами вектора плотности тока $\dot{J}_{01}, \dot{J}_{02}$

$$\left. \begin{aligned} k_2 \dot{B}_{03} + (k_1 \dot{B}_{01} + k_2 \dot{B}_{02}) \dot{B}_{02} / \dot{B}_{03} &= j\mu_0 \dot{J}_{01}, \\ k_1 \dot{B}_{03} + (k_1 \dot{B}_{01} + k_2 \dot{B}_{02}) \dot{B}_{01} / \dot{B}_{03} &= -j\mu_0 \dot{J}_{02}, \\ k_3 &= -(k_1 \dot{B}_{01} + k_2 \dot{B}_{02}) / \dot{B}_{03}. \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Из первого и второго уравнений системы (9) легко получаются в явном виде выражения для k_1 и k_2

$$k_1 = a \left(\dot{B}_{01} \dot{B}_{02} \dot{J}_{01} + (\dot{B}_{02}^2 + \dot{B}_{03}^2) \dot{J}_{02} \right), \quad (10)$$

$$k_2 = -a \left((\dot{B}_{01}^2 + \dot{B}_{03}^2) \dot{J}_{01} + \dot{B}_{01} \dot{B}_{02} \dot{J}_{02} \right), \quad (11)$$

где

$$a = j\mu_0 \dot{B}_{03} / \left((\dot{B}_{01} \dot{B}_{02})^2 - (\dot{B}_{01}^2 + \dot{B}_{03}^2)(\dot{B}_{02}^2 + \dot{B}_{03}^2) \right). \quad (12)$$

Таким образом, для детального изучения вистлерной активности необходимы измерения как магнитных, так и токовых компонент ОНЧ сигнала, что и планируется в проекте «Ионосат-Микро».

Более точное моделирование, с учётом наличия у вистлерных сигналов немонахроматической компоненты, может быть проведено с использованием UWB- методики (от Ultra Wide Band) [2].

Заключение

Цель космического эксперимента, который будет реализован в проекте «Ионосат-Микро», состоит в осуществлении долгосрочного мониторинга электромагнитных волн в ионосфере непосредственно с борта спутника и создания базы данных зарегистрированных волновых событий. В совокупности с

обработкой данных наземных наблюдений эти результаты будут использованы для изучения глобальной структуры и параметров волнового поля, в том числе и вистлеров. Следует отметить, что количество вистлерных сигналов, которые предполагается зарегистрировать в проекте «Ионосат-Микро», будет достигать миллионов единиц. В таких условиях необходимой задачей становится разработка и реализация методов автоматической селекции волновых событий, экспресс-анализ и запись в базу данных их статистических параметров (обеспечивающих пространственно-временную локализацию событий, типизацию вистлеров согласно с принятой классификацией, фиксацию основных амплитудно-частотных характеристик сигнала и пр.).

Для проведения необходимых измерений и анализа результативности предложенной методики вычисления волнового вектора на борту спутника «Ионосат-Микро» будет установлен приборный комплекс, содержащий набор из трёх волновых зондов для регистрации волновых форм вектора магнитного поля, вектора плотности плазменного тока и, совместно с одним электрическим зондом, трёх компонент вектора электрического поля в диапазоне частот 0,1—20000 Гц. Подробное описание научной программы проекта и аппаратного состава приведено в настоящем сборнике [17, 18].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Helliwell R. A.* Whistlers and Related Ionospheric Phenomena // Stanford Univ. Press, Stanford, Calif. — 1965.
2. *Ferencz C., Ferencz O.E., Hamar D., Lichtenberger J.* Whistler Phenomena // Short Impulse Propagation. Kluwer Academic Publ., Dordrecht — 2001.
3. *Ferencz O. E., Bodnár L., Ferencz Cs., Hamar D., Lichtenberger J., Steinbach P., Korepanov V., Mikhaylova G., Mikhaylov Y., Kuznetsov V.* Ducted whistlers propagating in higher-order guided mode and recorded on board of Compass-2 satellite by the advanced Signal Analyzer and Sampler 2 // J. Geophys. Res. — 2009. — 114, A03213. — doi: 10.1029/2008JA013542.
4. *Collier A. B., Lichtenberger J., Clilverd M. A., Rodger C. J., Steinbach P.* Source region for whistlers detected at Rothera, Antarctica // J. Geophys. Res. — 2011. — 116, A03219. — doi: 10.1029/2010JA016197.
5. *Hamar D., Ferencz O. E., Lichtenberger J., Ferencz Cs., Steinbach P., Rodger C. J., Parrot M.* Whistlers recorded simultaneously on board DEMETER and ground stations — a case study // 2nd International Demeter Workshop, CNES HQ. Paris. — Oct 10—12, 2011.
6. *Ferencz C.* Electromagnetic wave propagation in inhomogeneous, moving media: A general solution of the problem // Radio Science. — 2011. — 46, RS5006. — doi: 1029/2011RS004686.
7. *Ferencz C.* Electromagnetic wave propagation in general relativistic situations: A general solution of the problem // Radio Science. — 2012. — 47, RS1014. — doi: 1029/2011RS004905.
8. *Lichtenberger J., Ferencz C., Hamar D., Steinbach P., Rodger C. J., Clilverd M. A., Collier A. B.* Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Implementation of the analyzer algorithm // J. Geophys. Res. — 2010. — 115, A12214. — doi:10.1029/2010JA015931.
9. *Dowden R. L., Holzworth R. H., Rodger C. J., Lichtenberger J., Thomson N. R., Jacobson A. R., Lay E., Brundell J. B., Lyons T. J., O'Keefe S., Kawasaki Z., Price C., Prior V., Ort'ega P., Weinman J., Mikhailov Y., Woodman R., Qie X., Burns G., Collier A., Pinto Jr. O., Diaz R., Adamo C., Williams E.R., Kumar S., Raga G. B., Rosado J. M., Avila E. E., Clilverd M. A., Ulich T., Gorham P.,*

- Shanahan T. J. G., Osipowicz T., Cook G., Zhao Y.* World-Wide Lightning Location Using VLF Propagation in the Earth-Ionosphere Waveguide // IEEE Antennas Propag. Mag. — 2008. — 50. — P. 40—60. — doi:10.1109/MAP.2008.4674710.
10. *Collier A. B., Delport B., Hughes A. R. W., Lichtenberger J., Steinbach P., Oster J.* Correlation between Global Lightning and Whistlers observed at Tihany // J. Geophys. Res. — 2009. — doi: 10.1029/2008JA013863.
11. *Collier A.B., Bremner S., Lichtenberger J., Downs J.R., Rodger C.J., Steinbach P., McDowell G.* Global lightning distribution and whistlers observed at Dunedin // New Zealand. Ann. Geophys. — 2010. — 28 — P. 499—513.
12. *Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А.* Волны в магнитоактивной плазме. — М., Наука, 1970. — 207 с.
13. *Escoubet C.P., Fehringer. M., Goldstein M.* The Cluster mission // Annales Geophysicae. — 2001. — 19. — P. 1197—1200.
14. *Korepanov V., Dudkin F.* Comparative Analysis of Current Density Meters Operating in Space Plasmas // Adv. Space Res. — 1999. — 23. — P. 1541—1544.
15. *Dudkin F., Korepanov V., Lizunov G.* Experiment VARIANT — First Results from Wave Probe Instrument // Adv. Space Res. — 2009. — 43. — P. 1904—1909.
16. *Bellan P.M.* Improved basis set for low frequency plasma waves // J. Geophys. Res. — 2012. — 117, A12219. — doi:10.1029/2012JA017856.
17. *Лукенюк А.А., Корепанов В.Е., Шувалов В.А., Шендерук С.Г.* Комплекс научной аппаратуры «Ионосат-Микро» // Космический проект «Ионосат-Микро». — К. : Академперіодика, 2013. — С. 118—126.
18. *Лизунов Г.В., Лукенюк А.А., Макаров А.Л., Фёдоров О.П.* Космический проект «Ионосат-Микро»: цели и методы // Там же. — С. 11—25.

ОЦЕНКА ТРЕБОВАНИЙ К ПЛАТФОРМАМ МИКРО- И НАНОСПУТНИКОВ В КОНТЕКСТЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Ф.Л. ДУДКИН, Д.Ф. ДУДКИН

Длительные измерения квазипостоянного магнитного поля Земли (с верхней границей диапазона частот от долей до единиц Герц) с помощью низкоорбитальных спутников представляют значительный научный и практический интерес для уточнения модели IGRF (International Geomagnetic Reference Field). Более совершенная модель IGRF необходима как для более точной ориентации космических аппаратов, так и для геофизических приложений, в частности для совершенствования моделей строения ионосферы и магнитосферы, изучения волновых процессов и крупномасштабных токовых структур в околоземной плазме, а также глубинного электромагнитного зондирования Земли.

В этом случае предпочтительно иметь синхронную картину геомагнитного поля в максимально возможном количестве точек, создание которой могли бы обеспечить не только специализированные научные спутники, но и практически все космические аппараты, оснащенные магнитометрами системы ориентации.

О специфике измерения квазипостоянного магнитного поля Земли с помощью магнитометров системы ориентации микро- и наноспутников

В настоящее время, в связи с повышением уровня сложности научных задач, к микро- и наноспутникам предъявляются жесткие требования в части точности ориентации и стабилизации положения спутника на орбите. Это связано с повышением разрешающей способности измерительной аппаратуры и систем наблюдения Земли из космоса. Очевидно, что при этом на системы спутника параллельно накладываются ограничения по массе, габаритам и потребляемой мощности.

Точность измерений постоянного магнитного поля Земли обусловлена не только точностью бортового магнитометра, но и точностью работы систем ориентации и стабилизации, а также точностью модели IGRF, которая, в свою очередь, влияет на точность работы указанных систем.

Магнитометры системы ориентации, при этом, выполняют три основных функции: 1) определение ориентации; 2) контроль ориентации; 3) определение собственного магнитного момента спутника.

Учитывая существенную величину погрешности из-за влияния магнитного поля космического аппарата (по сути, оно является основной погрешностью для малоразмерных спутников из-за их компактной конструкции), необходимо применять меры по её учету и компенсации. Собственное магнитное поле существенно искажает результаты измерения магнитного поля Земли, поэтому часто бортовые магнитометры используются еще и для измерения собственного магнитного момента космического аппарата [1]. Это дает значительное увеличение точности стабилизации и определения ориентации.

В свою очередь высокоточные измерения магнитного поля Земли требуют повышенной точности знания ориентации спутника. Для этой цели используются различные наборы датчиков и математических моделей для вычисления с помощью соответствующих алгоритмов составляющих вектора ориентации спутника в инерциальной системе координат. При этом используются один или несколько алгоритмов для вычисления ориентации в форме набора кватернионов, углов Эйлера или матрицы вращения [2]. Это требует оперирования, по меньшей мере, двумя векторами, хотя для определения ориентации достаточно набора из трех скалярных величин. Ввиду переопределенности задачи в общем случае нельзя найти ее точное решение, поэтому алгоритмы определения ориентации спутников относятся к классу оценочных.

Для определения ориентации спутника совместно с магнитометром используются другие устройства, такие как датчики положения Солнца, Земли или звезд, поскольку сам магнитометр не может обеспечить определение ориентации спутника по трем осям. В случае использования матрицы вращения собственная и референсная (базовая) системы координат связаны соотношениями [2]

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{D}_i \mathbf{R}_i, i = 1, 2, \dots, n,$$

где $\mathbf{S}_i$ — единичный вектор, показывающий направление i -го датчика спутника, $\mathbf{D}_i$ — матрица направляющих косинусов ($\det \mathbf{D}_i = 1$), соответствующая системам координат спутника и референс-системы, $\mathbf{R}_i$ — единичный вектор, показывающий направление, связанное с референс-объектом (Солнце, Земля, звезды, IGRF). Соответствующие модели находятся, в настоящее время, в бортовом компьютере спутника.

Многие спутники используют для ориентации только два вектора: вектор магнитного поля Земли (с помощью бортового магнитометра) и вектор направления на Солнце (с помощью солнечного датчика, для грубой ориентации) или на две звезды (с помощью двух звездных датчиков, для более точной ориентации). В этом случае используются алгоритмы типа TRIAD [3–6] — один из первых алгоритмов определения ориентации спутника наземными или бортовыми системами. При большем количестве датчиков задача ориен-

тации сводится к задаче Wahba [7]:

$$L(\mathbf{D}_i) = 0.5 \sum_i^n a_i |\mathbf{S}_i - \mathbf{D}_i \mathbf{R}_i|,$$

в которой минимизируется функция потерь $L(\mathbf{D}_i)$. При этом $a_i \geq 0$ — весовая функция датчиков, а вычисленная матрица $\mathbf{D}_i$ используется для контроля ориентации спутника. Задача может быть решена с помощью TRIAD или QUEST алгоритмов [3–6].

Датчики ориентации можно разделить на два основных класса: абсолютные и относительные. Датчики абсолютных измерений работают на основе знания положения спутника на орбите и вычисления направления вектора по отношению к инерциальной системе некоторого астрономического объекта и направления вектора магнитного поля Земли. Они измеряют эти направления по отношению к системе координат спутника путем сравнения измеренных и референсных направлений в инерциальной системе отсчета. К ним относятся: солнечный и звездный датчики, магнитометр, датчики горизонта. Эти датчики используются в статических алгоритмах определения ориентации.

Датчики относительных измерений относятся к классу гироскопических устройств, таких как прецессионный (скоростной) и интегрирующий гироскопы, кольцевой и волоконно-оптический гироскопы, работающие на эффекте Саньяка, а также полусферический резонаторный гироскоп [8]. Такие устройства используются в динамических алгоритмах определения ориентации.

Сравнительная характеристика датчиков систем ориентации приведена в таблице 1 (на основе данных из [8–10]). Однако проблема ориентации не исчерпывается только датчиками ориентации. Ввиду того, что спутник подвергается воздействию нескольких факторов, изменяющих его направление в пространстве (действие силы аэродинамического торможения, гравитационного

Таблица 1

Сравнительная характеристика датчиков систем ориентации

Тип датчика	Типичная погрешность	Масса, кг	Потребляемая Мощность, Вт	Примечания
Датчик Солнца	0,005—3 град.	0,1—2	0,01—3	Угол зрения ~30 град.
Датчик горизонта	0,1—1 град.	0,5—4	0,3—10	
Магнитометр	0,5—3 град.	< 1	< 1	Для высот ниже 6000 км. Высокая чувствительность к элементам спутника, создающим магнитное поле
Звездный датчик	0,0003—0.01 град.	2—5	5—20	Угол зрения ~ 6 град.
Гироскопы	0,001—1 град /час	0,05—5	1—30	Нуждаются в периодической подстройке

градиента, давления солнечного излучения, магнитного поля Земли), задача установки и поддержания ориентации приводится к задаче динамики вращения и устойчивости твердого тела при сложном воздействии нескольких сил [9].

Проведем ориентировочную оценку этих сил для спутника «Микросат».

1. Момент сил, возникающий из-за аэродинамического торможения, M_a (Н·м) можно записать в следующем виде

$$M_a = 0.5 \rho v^2 K_d S [\mathbf{v}_0 \times \mathbf{d}],$$

где ρ — плотность ионосферы (кг/м³) на высоте h (м), v — абсолютная величина скорости спутника (м/с), K_d — коэффициент лобового сопротивления, типичная величина $K_d = 2,25$, S — поперечное сечение спутника (м²) перпендикулярное орту вектора скорости $\mathbf{v}_0$, $\mathbf{d}$ — векторное расстояние от центра масс спутника к центру приложенного давления (м).

Для спутника «Микросат» $h = 620$ — 710 км, $K_d = 2,25$, $S = 1$ — 4 м², модуль векторного произведения равен $|\mathbf{v}_0 \times \mathbf{d}| = 0,2$ м (оценочное значение), $\rho = 2 \times 10^{-15}$ — 10^{-12} кг/м³ (данные из модели атмосферы MSIS-E-90), причем минимальные, средние и максимальные значения ρ соответствуют минимальным, средним и максимальным значениям солнечной активности; $v = 7503$ — 7551 м/с для орбит с $h = 620$ — 710 км. Отсюда следует, что абсолютная величина M_a находится в пределах $2,5 \cdot 10^{-8}$ — $5,1 \cdot 10^{-5}$ Н·м (со средним значением $2,5 \cdot 10^{-6}$ Н·м), в зависимости от солнечной активности.

2. Момент сил, возникающий из-за гравитационного градиента, M_g (Н·м) можно записать в следующем виде

$$M_g = \left(3 \gamma m_E / (R_E + h)^3 \right) \cdot [\mathbf{n} \times (\mathbf{I} \cdot \mathbf{n})],$$

где $\mathbf{n}$ — орт надира; $\mathbf{I}$ — тензор инерции, кг·м². Модуль вектора M_g можно вычислить по упрощенной формуле

$$M_g = \left(1,5 \gamma m_E / (R_E + h)^3 \right) \cdot |I_z - I_y| \sin(2\theta),$$

где I_z , I_y — моменты инерции относительно осей z , y . Если $I_x < I_y$, то в соотношение (6) вместо I_y подставляется I_x . θ — угол максимального отклонения оси z от надира. Для спутника «Микросат» $I_z = 90$ кг·м², $I_y = 60$ кг·м² (оценочные значения), $\theta = 5^\circ$ (на уровне 3σ), $\theta = 30^\circ$ (в специальных случаях, оценочное значение). Тогда значение M_g будет находиться в пределах $8,7 \cdot 10^{-6}$ — $9,1 \cdot 10^{-6}$ Н·м при $\theta = 5^\circ$ и $4,4 \cdot 10^{-5}$ — $4,5 \cdot 10^{-5}$ Н·м при $\theta = 30^\circ$.

3. Момент сил, возникающий из-за солнечного давления, M_s (Н·м) можно записать в следующем виде

$$M_s = K_s \mathbf{n}_s \cdot \mathbf{n}_a A_s [(\mathbf{n}_s (a + r_d) + \mathbf{n}_a (2r_s + 2r_d / 3)) \times \mathbf{s}_c]$$

где $K_s = 4,644 \cdot 10^{-6}$ Н/м² — постоянная солнечного давления, $\mathbf{n}_s$ — орт направления на Солнце, $\mathbf{n}_a$ — орт, нормальный к поверхности A , A_s — площадь поверхности A , м², a — коэффициент поверхностного поглощения, r_s — поверх-

ностный коэффициент зеркального отражения, r_d — поверхностный коэффициент диффузного отражения, при этом $a + r_s + r_d = 1$, s_c — вектор от центра масс спутника к поверхности А. Абсолютную величину вектора M_s можно вычислить по упрощенной формуле

$$M_s = (F_s/c) A_s (1+q) (c_p - c_g) \cos \phi,$$

где $F_s = 1367 \text{ Вт/м}^2$ — постоянная солнечного излучения; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ — скорость света, q — коэффициент отражения, $0 \leq q \leq 1$, $(c_p - c_g)$ — расстояние между центром зоны солнечного давления и центром масс спутника, ϕ — угол падения солнечного излучения.

Для спутника «Микросат» $q = 0,6$ (оценочное значение), $A_s = 4 \text{ м}^2$, $c_p - c_g = 0,3 \text{ м}$ (оценочное значение), $\phi = 0$. Отсюда $M_s = 8,7 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}$.

4. Момент сил, возникающий из-за взаимодействия собственного магнитного момента спутника с магнитным полем Земли, M_m (Н · м) можно записать в следующем виде

$$M_m = [D \times B],$$

где D — вектор дипольного магнитного момента спутника ($\text{А} \cdot \text{м}^2$), B — вектор индукции магнитного поля Земли (Тл). Для оценки сверху величины модуля M_m положим: D и B перпендикулярными друг другу, модуль величины магнитного поля $B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$, $D = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ (типичное значение для наноспутников). Тогда $M_m = D \cdot B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}$. Отсюда видно, что момент M_m , в большинстве случаев, является преобладающим среди рассмотренных факторов, изменяющих ориентацию спутника «Микросат» на орбите.

Учитывая, также, необходимость периодического изменения ориентации спутников в служебных целях (переориентирование солнечных батарей, оптических систем, антенн и т.д.), качество исполнительных механизмов контроля их положения имеет не меньшее значение. В этом случае важны не только точностные, но и динамические характеристики систем контроля ориентации. (В качестве примера высочайшей точности динамической ориентации можно привести астрономический спутник Hubble, системы которого поддерживают стабильность ориентации с девиацией, не превышающей 0.00014 угловой секунды в течение 24-х часов).

Для ориентации спутников используются: гравитационная штанга, двигатели-маховики, электромагниты, магнитные токовые катушки, постоянные магниты. В таблице 2 приведены требования к исполнительным устройствам систем ориентации, в таблице 3 — их основные характеристики и особенности (на основе данных из [9]).

Следующим немаловажным условием измерения постоянного магнитного поля Земли с целью совершенствования модели IGRF является точность определения координат спутника. Для низкоорбитальных космических аппаратов, которые рассматриваются в нашем случае, эта задача легко решается с помощью GPS-систем. Точность позиционирования составляет при этом от единиц метров до единиц сантиметров [9, 11, 12].



В заключение раздела рассмотрим принципиальную проблему, связанную с наличием у спутника собственного магнитного момента, состоящего из постоянной и переменной составляющей (так называемые, магнитожёсткая и магнитомягкая компоненты). Для малоразмерных низкоорбитальных спутни-

Таблица 2

Требования к исполнительным устройствам систем ориентации малых спутников

Параметр	Величина
Точность ориентации	0,25 град., на уровне 3σ , включает погрешности определения и установки ориентации
Диапазон	Все положения: в пределах 50 град. по отношению к надиру; в пределах 20 град. по отношению к Солнцу
Флуктуации	1—5 град./мин; 1 град./с в диапазоне частот 1—20 Гц (например для избегания смазывания изображений)
Дрейф	1—5 град./час (обычно используется для оценки количества подстроек ориентации при известном направлении на объект)
Время установления	Затухание флуктуаций до 0,1 град за 1 минуту в пределах 2 град. отклонения от заданного направления

Таблица 3

Характеристики некоторых исполнительных устройств систем ориентации

Тип	Направление ориентации	Диапазон установки	Типовая погрешность	Время функционирования
Гравитационная штанга	Локальное направление вертикали к Земле	Очень ограниченный	± 5 град. по двум осям	Не ограничено
Гравитационная штанга и маховик	Локальное направление вертикали к Земле	Очень ограниченный	± 5 град. по трем осям	Время жизни подшипников
Постоянный магнит	Только вдоль направления магнитного поля Земли	Очень ограниченный	± 5 град. по двум осям	Не ограничено
Электромагнит	Вращающий момент только для направлений перпендикулярных магнитному полю Земли	Ограниченный, невозможность управления одновременно по трем осям	$\pm (1-5)$ град.	Практически не ограничено
Двигатель-маховик	Без ограничения	Без ограничения	$\pm (0,001-1)$ град	Время жизни датчиков и подшипников
Гироскоп	Без ограничения	Без ограничения	$\pm (0,001-1)$ град	Время жизни датчиков и подшипников

ков такой момент вносит значительные искажения в показания бортового магнитометра как из-за собственного магнитного поля, так и из-за изменения ориентации аппарата при взаимодействии магнитного момента спутника с магнитным полем Земли. Собственный магнитный момент может быть обусловлен как намагниченными устройствами на спутнике и ферромагнитными деталями его корпуса, так и цепями постоянного тока [13, 14].

Для компенсации этого влияния необходимо как можно точнее измерить собственный магнитный момент спутника [15]. Это можно осуществить при использовании улучшенного фильтра Калмана (см., например, [13, 14]). Такой подход был реализован для спутников PRISM and Nano-JASMINE [16, 17]. Следует заметить, что учет составляющих собственного магнитного момента спутника в лабораторных условиях затруднен по двум основным причинам: 1) при моделировании полетных режимов по циклограммам для рабочей конфигурации спутника практически невозможно исключить влияние внешних магнитных полей контрольных устройств (например, поворотного устройства) и аппаратуры. Это связано, в основном, с очень большими затратами на проведение таких измерений, 2) намагниченность ферромагнитных деталей спутника и параметры токовых цепей могут измениться за время нахождения спутника на орбите (см., например, [18, 19]).

Следует заметить, что размещение бортового магнитометра на конце штанги не решает должным образом эту проблему, поскольку штанга не обладает достаточной жесткостью, что ведет к возмущениям и неустойчивости ориентации спутника.

Поэтому были разработаны методы, позволяющие без особых затрат проводить рекалибровку бортовых служебных магнитометров микро- и наноспутников непосредственно во время эксплуатации. Первая группа методов использует рекалибровку без использования датчиков определения ориентации. В этом случае сравниваются нормы векторов измеренных магнитометром и модельных значений IGRF и производится коррекция сдвига нуля магнитометра [20, 21]. Во второй группе модельные значения поля преобразуются в систему координат спутника с использованием датчиков его ориентации [22]. В третьей группе методов используются несколько магнитометров для более точной оценки собственного момента спутника.

При реализации этих методов может использоваться как бортовой компьютер (при упрощенной оценке), так и наземный — для вычислений по более сложным алгоритмам. При этом погрешность из-за смещения нуля не может быть ниже порога, определяемого нестационарностью собственного магнитного момента спутника. Естественно, наиболее предпочтительной является контроль оценки смещения нуля, что требует повышенной вычислительной мощности бортового компьютера.

Несмотря на описанные трудности, при реализации методов рекалибровки бортового магнитометра были получены впечатляющие результаты. Для

спутника Nano-JASMINE с помощью соответствующих алгоритмов собственный магнитный момент был скомпенсирован до величины $0.0001 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, что позволило снизить погрешность измерения магнитного поля Земли до 50 нТл даже при столь малых размерах аппарата.

Экспериментальная часть: анализ данных служебного магнитометра микроспутника Egeytsat

Для исследования возможности использования магнитометра системы ориентации при измерениях, связанных с уточнением и развитием модели IGRF, 23 октября 2007 года (03:35:00—04:05:00 UT) и 16 ноября 2007 года (04:44:39—05:13:08 UT) были проведены соответствующие эксперименты на борту спутника «Egeytsat» (платформа МС-2-8) [23—25]. Бортовой трехкомпонентный феррозондовый магнитометр включался для измерений раз в 4 с. В промежутках между этими измерениями, на время не более 2 с, включалась система активной ориентации спутника, осуществляемая с помощью токовых катушек.

Орбита спутника — полярная, солнечно-синхронная с перигеем 657 км, апогеем 667 км и наклоном $98,1^\circ$. Параметры орбиты представлены с точностью до 0,1 км по высоте и до $0,1^\circ$ по широте и долготе. (Анализ данных показал, что реальная точность позиционирования спутника по широте и долготе была в два раза хуже). Для анализа были выбраны два участка орбиты. Первый участок (23.10.2007) проходил в южном полушарии над Антарктидой и Южной Америкой (см. рис. 1), второй (16.11.2007) — в северном полушарии над Северной Америкой (рис. 2). (Эти и все другие рисунки данной статьи вынесены на цветную вкладку). При этом орбиты были выбраны таким образом, чтобы в первом случае спутник пролетал над украинской антарктической станцией «Академик Вернадский», а во втором — над системой магнитометрических станций «CARISMA» (Canadian Array for Realtime Investigations of Magnetic Activity). Это позволило провести сравнение данных наземных и спутниковых измерений. Кроме того, данные спутниковых и наземных измерений сравнивались со стандартной моделью магнитного поля Земли IGRF-10.

Данные магнитометра были представлены в собственной системе координат спутника, что требовало их преобразования в каждой точке в геофизическую систему координат, в которой даются значения поля IGRF и наземных магнитометров (рис. 3). Поскольку углы Эйлера осей магнитометра относительно ортодромической системы координат не были даны, было сделано предположение о том, что ось ОХ магнитометра находится в плоскости орбиты спутника по направлению его движения, а ось ОУ — перпендикулярна ей и повернута по часовой стрелке, ось ОZ направлена вниз, дополняя систему координат до правой. При этом для каждой точки орбиты проводился доворот

оси ОХ магнитометра до направления локального географического меридиана по следующим формулам:

$$B_x = B_{xs} \cos \alpha + B_{ys} \sin \alpha$$

$$B_y = -B_{xs} \sin \alpha + B_{ys} \cos \alpha$$

$$\alpha = \pi - \xi$$

$$\xi = \arctg \left(\frac{\sin \psi \operatorname{tg} C}{\sin(a - \psi)} \right)$$

$$\psi = \arctg(\cos C \operatorname{tg} b)$$

$$2\zeta = \arctg \left(\frac{\sin \varphi \operatorname{tg} C}{\sin(b - \varphi)} \right)$$

$$\varphi = \arctg(\cos C \operatorname{tg} a)$$

$$C = \lambda_2 - \lambda_1, a = \varphi_3 - \varphi_2, \varphi_3 = 0,5 \pi, b = \varphi_3 - \varphi_1,$$

где B_{xs} , B_{ys} — горизонтальные составляющие магнитного поля, измеренные бортовым магнитометром; φ_i , λ_i , $i = 1, 2, 3$, — географические широта и долгота точки с номером i (см. рис. 3), причем для точки 3 (северный географический полюс) $\varphi_3 = 0,5 \pi$.

Компоненты магнитного поля для первого участка орбиты, измеренные магнитометром спутника «Egypsat» и поля модели IGRF-10 показаны на рис. 4. Видно, что они ведут себя почти одинаковым образом. (Значения географической широты приведены на нижней горизонтальной оси графика, а магнитной — на верхней).

Для оценки тонкой структуры поля была построена разность составляющих поля измеренных магнитометром и модельных значений IGRF-10 (рис. 5). Точками соответствующего цвета обозначены разности между составляющими поля, измеренными магнитометром на станции «Академик Вернадский» и значениями поля IGRF на поверхности Земли в районе станции.

Поскольку разности для x -, y -компонент поля превышают аналогичную разность для модуля поля, из рис. 5 следует, что реальная ориентация спутника отличается от предполагаемой (т. к. операции поворота не меняют величину модуля вектора магнитного поля). Поэтому для минимизации среднеквадратического отклонения значений модуля горизонтальной составляющей магнитного поля от значений IGRF был проведен доворот оси ОХ магнитометра в горизонтальной плоскости на угол $\delta\alpha$ и оси ОZ магнитометра в плоскости орбиты на угол $\delta\beta$ (с сохранением значения модуля поля) по следующим формулам:

$$\delta B_{x\alpha} = B_{xs} \cos(\alpha + \delta\alpha) + B_{ys} \sin(\alpha + \delta\alpha) - B_{xIGRF}$$

$$\delta B_{y\alpha} = -B_{xs} \sin(\alpha + \delta\alpha) + B_{ys} \cos(\alpha + \delta\alpha) - B_{yIGRF}$$

$$\min \delta B_{xy\alpha} = (\delta B_{x\alpha}^2 + \delta B_{y\alpha}^2)^{0.5}$$

$$\begin{aligned}\delta B_{x\beta} &= B_{x\alpha} \cos(\delta\beta) + B_{zs} \sin(\delta\beta) - B_{xIGRF} \\ \delta B_{z\beta} &= -B_{x\alpha} \sin(\delta\beta) + B_{zs} \cos(\delta\beta) - B_{zIGRF} \\ \min \delta B_{xz\beta} &= (\delta B_{x\beta}^2 + \delta B_{z\beta}^2)^{0.5} \\ B_{x\alpha} &= \delta B_{x\alpha} + B_{xIGRF}\end{aligned}$$

Результаты суммарного доворота показаны на рис. 6, значение углов доворота — на рис. 7. Как видно из рис. 6, после доворота отклонения составляющих поля не превышают отклонений для модуля поля. Значение индекса геомагнитной активности во время измерений — $Kp = 2,7$.

Из рис. 5, 6 следует, что отклонения составляющих поля, измеренных магнитометром спутника над станцией «Академик Вернадский» и наземным магнитометром станции, от значений IGRF-10 близки по величине. Нулевые значения отклонений поля спутникового магнитометра наблюдаются в районе, где производная от модуля поля по широте близка к нулю (см. рис. 8, 9). При этом на рис. 9 показаны приращения составляющих поля для интервалов орбиты, соответствующих расстоянию, проходимому спутником между 4-х секундными отсчетами показаний магнитного поля.

Данные для второго участка орбиты, аналогичные данным на рис. 4—9, показаны на рис. 10—15.

Из рис. 10 видно, что отклонения измеренных составляющих поля от значений IGRF значительно больше аналогичного отклонения модуля поля, что, по-видимому, связано с нарушением x -ориентации спутника в орбитальной плоскости. Результирующие значения отклонений поля и углов доворота $\delta\alpha$, $\delta\beta$ подтверждают это (см. рис. 11, 12).

Кривые для рис. 11б с увеличенным разрешением показаны на рис. 13. Значение индекса геомагнитной активности во время измерения — $Kp = 0,7$.

Данные сравнения отклонений составляющих поля, измеренных магнитометром спутника над системой магнитометрических станций «CARISMA» (рис. 13) и отклонений показаний наземных магнитометров этой системы от значений поля IGRF показаны точками соответствующего цвета. При этом отсчеты показаний бортового магнитометра брались для случая минимального расстояния проекции орбиты на поверхность Земли и места установки каждого из наземных магнитометров. В частности, на рис. 13б эти данные приведены для станции FSMI, для которой указанное расстояние было наименьшим по сравнению с другими станциями.

Как видно из рис. 13, б, несмотря на значительные отклонения составляющих поля станции FSMI от модельных значений, отклонения модулей поля близки по величине. Возможно, это связано с неточностью представления горизонтальных составляющих поля в модели IGRF в приполярных областях или с локальными особенностями поля на станции FSMI. Приращения составляющих поля для второго участка орбиты, соответствующие 4-х секундным отсчетам показаны на рис. 14.

Для сравнения ниже приведены результаты обработки данных бортового магнитометра спутника CHAMP, предназначенного для научных целей, на участках орбит 02.03.05 21:34:58–22:03:37 и 02.03.05 13:09:55–13:33:00, близких к орбитам EGYPTSAT 23.10.07 и 16.11.07 соответственно. Значение Kp -индекса для указанного времени равно 1.3 и 3 соответственно.

Приведенные результаты обработки результатов измерений магнитного поля спутником CHAMP показывают тот же порядок отклонения от модельных значений IGRF-10, что и для спутника EGYPTSAT.

Обсуждение результатов

Из рис. 9, 14 следует, что большие значения производной поля по широте и довольно большая погрешность данных позиционирования спутника EGYPTSAT приводят к дополнительному расхождению показаний магнитометра и значений модели IGRF. (По нашим оценкам, погрешность позиционирования спутника по широте достигает 0.2 град за 4 сек, что приводит к приращениям поля, которые можно оценить, умножив ординаты графиков на рис. 9, 14 на коэффициент 0.75). Дополнительная погрешность при сравнении данных бортового и наземного магнитометров вносится разностью расстояния между проекцией спутника на поверхность Земли и положением наземного магнитометра во время отсчета показаний (которые, кроме того, могут быть несинхронными).

Заметим также, что довороты на углы $\delta\alpha$, $\delta\beta$ не являются аналогом поворотов на углы Эйлера, поскольку неизвестна исходная ориентация спутника. Поэтому очевидно, что остаточные отклонения показаний магнитного поля от значений модели IGRF, приведенные на рис. 6, 13 могут быть минимизированы с учетом вышесказанного. При этом необходимо иметь в виду, что референс-модели геомагнитного поля обладают некоторой дискретностью (см. рис. 16а), отличаются друг от друга и дают усредненные значения магнитного поля для заданного момента времени (с погрешностью до 100 нТл). В качестве примера на рис. 16б приведены разности между значениями поля модели IGRF 1945–2010 (10th Generation) и модели IGRF 1900–2015 (10th Generation, revised 2004).

Следует отметить, что данные бортового магнитометра содержат пульсации амплитудой до 10 нТл (рис. 17а), которые объясняются влиянием «хвостов» переходных процессов в токовых катушках системы ориентации. Они легко устраняются путем фильтрации (рис. 17б).

Выводы и рекомендации

Использование магнитометра системы ориентации микро- и наноспутников (в том числе спутника «Микросат») для целей измерения естественного магнитного поля на орбите, практически реализуемо при наличии соответствующих условий. Для этого в зоне установки магнитометра необходимо:

- учесть влияние цепей постоянного тока, а также матриц остаточной и индуктивной намагниченностей спутника с погрешностью до первых десятков нТл;
- учесть влияние собственного магнитного момента спутника, включая и его переменную составляющую, связанную с движением спутника в магнитном поле Земли и изменением токовых контуров, с погрешностью до $10^{-4} \text{ А} \cdot \text{м}^2$;
- повысить точность измерения траектории спутника с погрешностью до десятков метров;
- повысить точность описания положения осей магнитометра относительно осей IGRF (по данным системы астроориентации). Погрешность измерения углов Эйлера (или углов крена, тангажа и рыскания) должна быть не более 0,5 угл. минуты.

При этом разница между данными магнитометра и IGRF не может быть менее $\delta = (\delta_{IGRF}^2 + \delta_p^2 + \delta_{Kp}^2 + \delta_{IP}^2)^{0,5}$, где δ_{IGRF} — погрешность модели IGRF (до 100 нТл), δ_p — погрешность привязки измерений из-за неточности позиционирования спутника (по нашим оценкам для EGYPTSAT до ± 200 нТл [± 700 нТл в полярных областях]), δ_{Kp} — погрешность из-за влияния магнитной активности Солнца (при больших значениях Kp -индекса, отклонение от данных IGRF может достигать сотен нТл), δ_{IP} — погрешность из-за влияния токовых структур в ионосферной плазме.

Учет вышеперечисленных факторов позволит снизить максимальную суммарную абсолютную погрешность измерения элементов геомагнитного поля до величин единиц — десятков нТл в зависимости от размеров спутника.

Для повышения точности орбитальных измерений вариаций магнитного поля Земли с помощью бортовых служебных магнитометров желательно использовать данные с двух разнесенных спутников, расположенных на близких орбитах.

Модуляция показаний магнитометра при 4-х секундных отсчетах (скачки показаний из-за влияния токовых катушек системы ориентации) не превышает ± 10 нТл и легко удаляется путем фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Inamori T., Sako N., Nakasuka S.* Magnetic dipole moment estimation and compensation for an accurate attitude control in nano-satellite missions // *Acta Astronautica*. — 2011. — Vol. 68, No. 11–12. — P. 2038–2046.
2. *Wertz, J.R.* Spacecraft Attitude Determination and Control, Ed. // Springer. — 1978. — 858 p. — ISBN 978-90-277-1204-2.
3. *Markley F.L.* Attitude Determination Using Vector Observations: A Fast Optimal Matrix Algorithm // *Journal of the Astronautical Sciences*. — 1993. — Vol. 41, No. 2. — P. 261–280.
4. *Markley F.L.* Attitude Determination Using Two Vector Measurements // *Proceedings, Flight Mechanics Symposium, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Massachusetts, May 1999, NASA Conference Publication NASA/CP-1999-209235*. — 1999. — P. 39–52.
5. *Markley F.L., Mortari D.* How to estimate attitude from vector observations, AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conf. — Aug. 1999. — 18 p. — P. 99–427.
6. *Shuster M.D.* The TRIAD Algorithm as Maximum Likelihood Estimation // *The Journal of Astronautical Sciences*. — 2006. — Vol. 54, No. 1. — P.113–123.

7. *Wahba, Grace*. A Least Squares Estimate of Spacecraft Attitude // *SIAM Review*. — July 1965. — Vol. 7, No. 3. — P. 409 and July 1966. — Vol. 8, No. 3. — P. 384—386.
8. *Armenise M.N., Ciminelli C., Dell'Olio F., Passaro V.M.N.* Advances in Gyroscope Technologies // Springer. — 2010. — 117 p. — ISBN 978-3-642-15493-5.
9. *Larson W.J., Wertz J.R.* Space Mission Analysis and Design // Eds. Kluwer Academic. — 2005. — 3rd Ed. — 980 p.
10. *Jerebets S.A.* Gyro Evaluation for the Mission to Jupiter // IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana. — March 3-10 2007. — 9 p. — doi: 10.1109/AERO.2007.352660.
11. *Montenbruck O., Markgraf M., Santandrea S., Naudet J.* GPS Orbit Determination for Micro-Satellites — The PROBA-2 Flight Experience // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, 2-5 August 2010, Toronto, Canada. — 2010. — 13p.
12. *Peng D., Wu B.* Kinematic Precise Orbit Determination for LEO Satellites Using Space-borne Dual-frequency GPS Measurements // *Chinese Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — Vol. 36, No. 3. — P. 291—306.
13. *Kevin Kuang.* Magnetic Sensors — Principles and Applications, Ed. — ISBN 978-953-51-0232-8. — 2012. — 160 p. — doi: 10.5772/1361.
14. *Inamori T., Sako N., & Nakasuka S.* Compensation of time-variable magnetic moments for a precise attitude control in nano- and micro-satellite missions // *Advances in Space Research*. — 2011. — Vol. 48, No 3. — P. 432—440.
15. *Inamori T., Sako N., & Nakasuka S.* Magnetic dipole moment estimation and compensation for an accurate attitude control in nano-satellite missions // *Acta Astronautica*. — 2011. — Vol. 68, No 11—12. — P. 2038—2046.
16. *Inamori T., Shimizu K., Mikawa Y., Tanaka T., and Nakasuka S.* Attitude Stabilization for the Nano Remote Sensing Satellite PRISM // *J. Aerosp. Eng.* — 2011. — doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000170.
17. *Inamori T., Sako N., Nakasuka S.* Attitude control system for the nanoastrometry mission «Nano-JASMINE» // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. — 2011. — Vol. 83, No. 4. — P. 221—228.
18. *Sakai S.-i., Fukushima Y., Saito H.* Design and on-orbit evaluation of magnetic attitude control system for the «REIMEI» microsatellite // *Advanced Motion Control, AMC '08. 10th IEEE International Workshop*, 26—28 March 2008. — 2008. — P. 584—589.
19. *Sandau R., Rwser H., Valenzuela A.* Small Satellites for Earth Observation: Selected Contributions // Springer. — 2008. — P. 185—197. — ISBN 978-1-4020-6942-0.
20. *Alonso R., Shuster M.D.* Attitude-independent magnetometer-bias determination: a survey // *Journal of the Astronautical sciences*. — 2002. — Vol. 50, No 4. — P. 453—475.
21. *Alonso R., Shuster M. D.* TWOSTEP: a fast robust algorithm for attitude independent magnetometer-bias determination // *Journal of Astronautical Sciences*. — 2002. — Vol. 50, No 4. — P. 433—451.
22. *Lerner G.M., and Shuster M.D.* In-Flight Magnetometer Calibration and Attitude Determination for Near-Earth Spacecraft // *Journal of Guidance and Control*. — 1981. — Vol. 4, No 5. — P. 518—522.
23. *Korepanov V., Dudkin F., Belyayev S., Leontyeva O.*, Experience of Satellite Attitude Control Magnetometer Use for Scientific Purpose // XIII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, Golden and Boulder, Colorado, USA, 9—18 June, 2008. — Book of abstracts. — P. 42.
24. *Belyayev S., Dudkin F., Korepanov V., Leontyeva O.* Possibility of IGRF model upgrade using microsatellite service magnetometer // *Digest of the 7th Int. Symposium of the Int. Academy of Astronautics «Small Satellites for Earth Observation»*, Berlin, Germany, May 4—8, 2009. — 2009. — P. 565—568.
25. *Корепанов В.Е., Дудкин Ф.Л.* Возможность использования магнитометра спутника «Микросат» для измерения крупномасштабных структур магнитного поля // 11-я украинская конференция по космическим исследованиям, 29 авг. — 02 сент., Евпатория, Крым, Украина, сборник тезисов. — 2011. — С. 102.

The diagram illustrates the architecture of the 'Soyuz' satellite system. The central part shows a 3D model of the satellite with various sensors and antennas. Key components and labels include:

- Датчик FGM** (FGM sensor) and **RFA** (Radio Frequency Antenna) at the top left.
- Зонд EP** (EP probe) and **Зонд WP** (WP probe) on the right side.
- ПЭС** (PES) (Power Supply Unit) in the center.
- Датчик DN** (DN sensor) and **Блок датчиков DE** (DE sensor block) at the bottom right.
- Направление на Землю** (Direction to Earth) and **Направление полета** (Direction of flight) arrows indicating orientation.

Surrounding the main diagram are several circular insets showing physical components:

- Top left: A white rectangular sensor module.
- Top right: A red and white electronic module with two cylindrical components.
- Bottom left: A black electronic module with a gold-colored connector.
- Bottom center: Two red cylindrical components and a black component.
- Bottom right: A green printed circuit board (PCB) with various electronic components.
- Far right: A green and yellow mechanical assembly.

РАДИОЗАТМЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ GPS/ГЛОНАСС/GALILEO

С.Е. АНДРЕЕВСКИЙ, В.Д. КУЗНЕЦОВ, В.М. СИНЕЛЬНИКОВ

С запуском первого ИСЗ начались исследования ионосферы Земли с помощью космических аппаратов. Первый в истории спутниковых экспериментов научный результат — о распределении электронной концентрации на высотах выше главного максимума ионосферы получил Я.Л. Альперт, используя наземные измерения «радиовосхода» и «радиозахода» сигналов радиомаяка спутника [1, 2]. Было показано, что электронная концентрация выше главного максимума ионосферы не спадает с высотой резко до нуля, как предполагалось до этого, а уменьшается плавно.

Измерения эффектов «радиовосхода» и «радиозахода» спутника, как известно, возникающих, соответственно, раньше и позже оптического восхода и захода спутника за горизонт из-за рефракции радиоволн в ионосфере, стали, таким образом, первым радиофизическим методом в спутниковых исследованиях ионосферы.

За истекшие десятилетия радиозатменные или RO (radio occultation) — измерения стали, пожалуй, наиболее универсальным и распространенным методом дистанционного зондирования ионосферы и атмосферы Земли, правда, все началось с исследования атмосфер планет солнечной системы. Значительный прорыв в области спутникового изучения атмосфер планет Солнечной системы был сделан американскими исследователями (Stanford Univ. and NASA/JPL) в 1965 г. и 1969 г., когда аппараты MARINER-4, 6 и 7 пролетали мимо Марса. Затменное радиопросвечивание атмосферы Марса позволило определить давление, температуру и электронную концентрацию в ионосфере Марса. Венера активно изучалась при помощи российских аппаратов серии «Венера» и американских MARINER-5, 10. В этих исследованиях, в числе прочих, также применялись радиозатменные методы [3].

Начиная с концептуального проекта MICROLAB (США) в 1995 г., предназначенного для демонстрации возможностей радиозатменного метода для глобальных исследований атмосферы Земли, стало ясно, что RO-метод вызвал революцию в атмосферном зондировании, поскольку никакая другая система измерений одновременно не обеспечивает такие высококачественные, глобальные наблюдения за ионосферой, стратосферой и тропосферой. Миссия MICROLAB работала вплоть до 1998 г., был получен значительный объем дан-

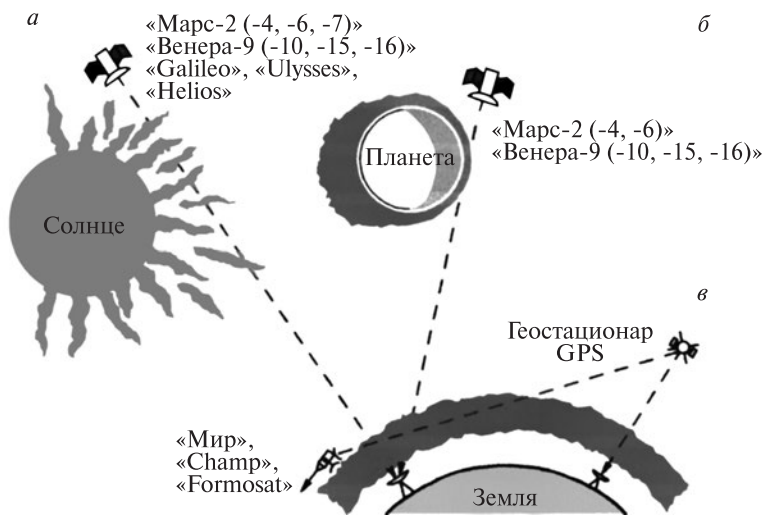


Рис. 1. Коллаж радиозатменных измерений околосолнечной плазмы (а), атмосферы и ионосферы планет (б) и Земли (в). Рисунок взят из статьи Н.А. Арманд, Ю.В. Гуляев, А.Л. Гаврик, А.И. Ефимов, С.С. Матюгов, А.Г. Павельев, Н.А. Савич, Л.Н. Самознаев, В.М. Смирнов, О.И. Яковлев Результаты исследования солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами. УФН, Т. 180, № 5, 2010

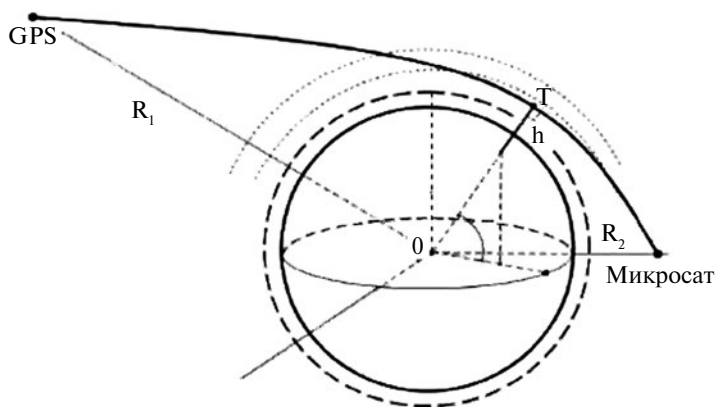


Рис. 2. Геометрия радиозатменного мониторинга атмосферы

ных о высотных профилях температуры атмосферы $T(h)$ и электронной концентрации в ионосфере $N_e(h)$, проведено их сопоставление с данными наземных измерений и доказана высокая точность [4—7].

Данные радиозатменных наблюдений в настоящее время являются определяющими в метеорологических прогнозах, контроле климатических изменений, а также в исследованиях ионосферы и космической погоды.

На рис. 1 показаны основные радиозатменные спутниковые эксперименты по исследованию атмосфер планет и Земли. Иллюстрация геометрии радиозатменных измерений приведена на рис. 2.

Радиозатменные исследования атмосферы Земли реализуются с помощью двух спутников — спутника-излучателя (из действующих группировок радионавигационных спутников GPS, ГЛОНАСС и формируемой группировки GALILEO) и спутника-приемника сигналов (в нашем случае — Микросат), находящихся на орбитах разной высоты (R_1 и R_2) и движущихся с разными скоростями относительно поверхности Земли. При заходе спутника-приемника в зону тени Земли относительно навигационного спутника перигей лучевой траектории, перемещаясь вдоль линии **ТО**, проходит через ионосферу и атмосферу.

Приемник на низкоорбитальном спутнике регистрирует сигналы на двух частотах, изменения фазы и амплитуды которых содержат информацию о характеристиках околоземного пространства вдоль трассы распространения радиоволн. В приближении локальной сферической симметрии околоземной среды эти изменения вызваны, в основном, влиянием областей ионосферы и атмосферы вблизи точки перигея лучевой траектории. Далее, по измеренным изменениям фаз и амплитуд и по известным эфемеридам спутников (излучателя и приемника) можно рассчитать высотный профиль угла рефракции и затем, с помощью преобразования Абея, найти высотную зависимость показателя преломления в атмосфере, а затем и высотный профиль электронной концентрации в ионосфере [6—7].

Во многих случаях РО-профили высотного распределения электронной концентрации хорошо согласуются с данными наземных ионозондов; однако, в некоторых случаях, применение стандартного преобразования Абея приводит к существенным ошибкам, как показано на рис. 3.

Эти ошибки вызваны тем, что приближение сферической симметрии в инверсии Абея не всегда справедливо; ошибка наибольшая в низких широтах и на высотах в максимуме и ниже слоя F. Метод, в котором используется ассимиляционная модель ионосферы, существенно уменьшает ошибку.

Ассимиляционная модель представляет собой численную физическую (или математическую) модель, основанную на решении систем уравнений, описывающих динамику верхней атмосферы, включая самосогласованное взаимодействие с другими областями системы Солнце — Земля. Такая модель описывает глобальные трехмерные распределения основных параметров ионосферы (концентраций ионов и электронов, температуры и скоростей) на сетке, как правило, свыше одного миллиона точек в слое между 80 и 30000 км. Метод численного моделирования с использованием ассимиляции текущих данных наблюдений дает возможность получить в квазиреальном времени с существенно большей точностью глобальные распределения параметров ионосферы и дать прогноз изменений этих параметров. Современные методы обработки радиозатменных данных, основанные на теории линейных и не-

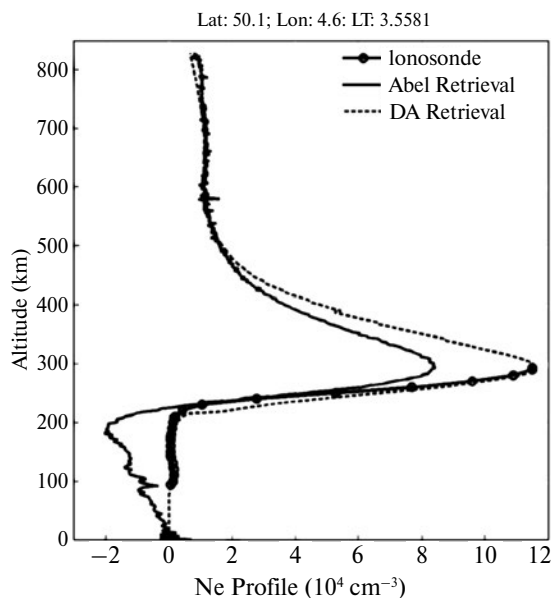


Рис. 3. Пример сравнения профилей $N_e(h)$, полученных наземным ионозондом, по данным обработки радиозатменных измерений с использованием преобразования Абеля (Abel retrieval) и более точного метода обработки с помощью ассимиляционной модели ионосферы (DA — data assimilation) [11]

линейных представлений волновых полей, позволяют достигать высокой точности определения параметров атмосферы и ионосферы [8—11].

Планируемые программы радиозатменных экспериментов

Дальнейшее развитие РО-экспериментов предполагает (в продолжение действующему с 2006 г. проекту COSMIC [10]) запуск новой группировки системы COSMIC, которая позволит получать примерно в десять раз больше данных РО-зондирования, чем действующий проект. Британская компания Surrey Satellite Technology Limited (SSTL) объявила о заключении контракта с Национальной космической организацией Тайваня на разработку и изготовление 12 спутников для глобальной метеорологической системы FORMOSAT-7/COSMIC-2, создаваемой тайваньскими специалистами совместно с NASA. Запуск первых шести космических аппаратов запланирован на 2016 г. [12].

Разрабатываются и другие проекты: CICERO (Community Initiative for Continuing Earth Radio Occultation) [13] и спутники нового поколения Iridium Next [14].

Российские организации радиокосмического комплекса (ФГУП НПП ВНИИЭМ, ОАО «Российские космические системы» и Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН) анонсировали планы на разработку космической системы на основе сверхмалых спутников «Радиомет-СМКА» для радиозатменного мониторинга атмосферы и ионосферы сигналами ГНСС GPS, ГЛОНАСС и GALILEO [15].

Сравнение характеристик зондирования аппаратуры проектов «Радиомет-СМКА» и действующего COSMIC («Формосат-3») приведено в табл. 1.

Применение новых технологий позволит проводить максимально возможный объем обработки сигналов непосредственно на борту СМКА «Радиомет» и передавать напрямую на наземные станции потребителей уже готовую информацию о физических параметрах нижней атмосферы (высоты 0...50 км) и ионосферы (высоты 90...400 км).

Другой российский проект, в состав которого включена аппаратура для радиозатменных измерений — космический комплекс «Ионозонд», он создается ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» по заказу Федерального космического агентства. КК «Ионозонд» предназначен для мониторинга геофизической обстановки путем измерения основных параметров верхней атмосферы (магнитосферы и ионосферы), солнечной активности и передачи полученных данных по радиоканалам на наземный комплекс приема, обработки и распространения информации (НКПОР) для потребителей РФ: Росгидромета, Роскосмоса, МЧС России, Минсвязи, Минтранса и др.

В составе космического сегмента «Ионозонд» четыре КА «Ионосфера». Ожидаемые сроки запусков:

- КА «Ионосфера» № 1, № 2 — 2014 г.
- КА «Ионосфера» № 3, № 4 — 2015 г.

Отметим, что в планируемых радиозатменных измерениях на КА «Ионосфера» будет использоваться аппаратура ПЭС, аналогичная по своим характеристикам аппаратуре, которая включена в состав КНА «Ионосат-Микро».

Число КА радионавигационных спутниковых систем (РНСС), пригодных для радиозатменных измерений, постоянно увеличивается. К 30-ти КА GPS (NASA) добавились 24 КА системы ГЛОНАСС (Россия), известны планы наращивания группировок GALILEO (Европейское космическое агентство) и COMPASS (Китай). Эти системы после завершения развертывания будут состоять из 24—30 КА каждая, что существенно увеличит число данных РО-зондирования, полученных приемником низкоорбитального спутника.

Таблица 1

Система радиозатменного зондирования	«Formosat-3» (COSMIC)	«Радиомет-СМКА»
Регистрируемые радионавигационные сигналы	GPS	GPS, GLONASS, GALILEO
Число ежедневных измерений	1500...2500	До 8 000
Средний период повторных замеров	~1 раз в день	3...4 раза в день
Наблюдение полярных зон	Нет	Есть
Конечные параметры атмосферы и ионосферы	На Земле	На борту КА
Оперативность доставки данных потребителям	≥3 часов	Вплоть до РМВ (реальный масштаб времени)

THE WORLD OF GNSS MULTI-CONSTELLATION AND MULTIFREQUENCY

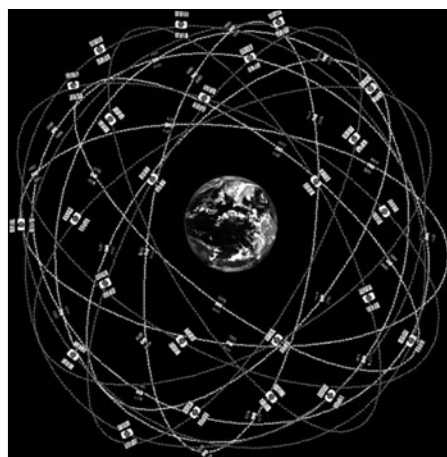
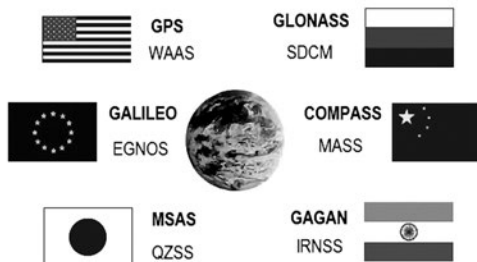


Рис. 4. Группировки радионавигационных спутников

К 2015 г. возможное число RO-зондирований в день может достичь 10 000, что примерно в десять раз превышает сегодняшний объем данных.

Сводные данные по совместимым РНСС приведены в табл. 2.

На рис. 4, а показаны все известные группировки РНСС, включая региональные MSAS (Япония) и GAGAN (Индия). На рис. 4, б дано наглядное представление низкоорбитального спутника с приемной аппаратурой и совокупности РНСС, примерно треть (при диаграмме приемной антенны в виде полусферы) из которых будет постоянно находиться в зоне приема и по каждому из них будет реализована геометрия радиозахода-радиовосхода. Не трудно оценить, что при использовании 3-х группировок РНСС, приведенных в табл. 2, после их полного развертывания число радиозатменных измерений на одном низкоорбитальном спутнике может достигать 1200–1300 за сутки.

Одной из прикладных задач, которая должна быть решена с помощью аппаратуры ПЭС — позиционирование КА «Микросат». Для решения этой задачи нет принципиальных сложностей. Оценка точности позиционирования выполнена в работе [16], где была разработана методика оценки погрешности

Таблица 2

Орбитальные характеристики совместимых навигационных спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС и GALILEO

Характеристика	GPS	ГЛОНАСС	GALILEO*
Число навигационных спутников	30	24	30
Число орбитальных плоскостей	6	3	3
Число спутников в каждой плоскости	5	8	10
Наклонение орбиты, град.	55	64.8	56
Высота орбиты, км	20180	19130	23222

позиционирования орбитальных потребителей РНСС. Суть методики заключается в сравнении координат, восстановленных из измерений псевдодально-стей между навигационными спутниками GPS и орбитальным потребителем, с координатами данного объекта, полученными с помощью лазерных станций слежения и высокоточных акселерометров. В качестве орбитального объекта для эксперимента был выбран низкоорбитальный спутник CHAMP. Наиболее вероятная ошибка определения местоположения спутника CHAMP не превышала 10 м. Однако, в условиях геомагнитных возмущений погрешность позиционирования может достигать 30 м.

Интеграция аппаратуры ПЭС в состав КА «Микросат»

Бортовая аппаратура ПЭС состоит из приемника и антенно-фидерного устройства.

В составе приемника применяется модуль OEM-платы TRE-G3T (навигационный приемник GPS/ГЛОНАСС/Galileo) — высокотехнологичная разработка фирмы JAVAD GNSS Inc. (США) и контроллер ввода-вывода информации.

Антенно-фидерное устройство включает в себя активную антенну AirAnt-G3T (GPS/ГЛОНАСС/Galileo) и радиочастотный кабель.

На рис. 5 (см. на цветной вкладке) показаны технологические образцы антенны и приемника аппаратуры ПЭС, изготовленные в ИЗМИРАН по государственному контракту с Российским космическим агентством (ОКР «Создание (доработка) научного прибора ПЭС, обеспечивающего проведение исследований высотного распределения электронной концентрации ионосферы и проведение космического эксперимента»).

Основные характеристики приемной аппаратуры ПЭС, включенной в состав комплекса научной аппаратуры КА «Микросат», приведены в табл. 3.

Интерфейсы аппаратуры ПЭС

- Информационный обмен между БА ПЭС и служебной аппаратурой КА реализуется с использованием трех интерфейсов: основного, резервного и технологического.

- Основной и резервный интерфейсы предназначены для приема командных сообщений, передачи ответных сообщений и результатов измерений.

- Командные сообщения могут передаваться в БА ПЭС по основному интерфейсу или по резервному.

- Ответные сообщения передаются по основному и резервному интерфейсу. Если включен режим передачи сигнала секундной шкалы времени (PPS), то по резервному интерфейсу всегда передается сигнал PPS.

- Технологический интерфейс может использоваться для приема из БА ПЭС результатов определения положения по протоколу NMEA.



Таблица 3

Измерения кодовых и фазовых задержек сигналов спутниковых навигационных систем	GPS L1/L2/L5 GLONASS L1/L2/L3 GALILEO E1/E5ab
Частотный диапазон	1559—1610 МГц 1164—1253 МГц
Характеристики приемной антенны ПЭС	
Усиление антенны	1559—1610 МГц — 4,0 дБ 1164—1253 МГц — 3,0 дБ
Поляризация	3,0 дБ max
КСВН	2,0 : 1
Импеданс	50 Ом
Усиление МШУ	30 ± 3 дБ
Коэффициент шума	1559—1610 МГц — 2,5 дБ max. 1164—1253 МГц — 2,0 дБ max.
Напряжение питания	4,7—12,0 В (85 мА/5. 0 В)
Тип антенны	Микрополосковая
В/ч разъем	TNC
Масса, г	320 ± 5
Размеры, мм	120 × 74 × 44
Корпус	Экран: GE PEI+40%GF Основание: Алюминий
Характеристики приемника ПЭС	
Число универсальных каналов	36
Погрешность по коду, не более	10 см
Погрешность по фазе, не более	1 мм
Максимальная частота первичных измерений	100 Гц
Среднеквадратическая ошибка определения положения	20 м
Среднеквадратическая ошибка определения скорости	0,5 м/с
Среднеквадратическая ошибка определения времени	0,5 мкс
Интерфейсы	RS-232/422, CAN, USB, Ethernet
Flash-память	2 Гб
Напряжение питания, В	+4,5÷40.0
Потребляемая мощность, Вт	3,6
Масса, кг	0,98 ± 0,05
Размеры, мм	197,5 × 127,5 × 76,5
Корпус	ADC 12

- Электрические параметры интерфейсов соответствуют стандарту RS485 для дуплексного режима работы. Скорость передачи данных равна 460800 бит/с.

Режимы работы аппаратуры ПЭС

• БА ПЭС имеет два основных режима работы: режим определения положения и режим первичных измерений.

• В режиме определения положения по основному интерфейсу передаются блоки данных содержащие информацию о результатах определения положения и времени с периодом 1 Гц. По технологическому интерфейсу (если включен режим NMEA) передаются сообщения NMEA, содержащие данные о времени, положении и условиях определения.

• В режиме первичных измерений по основному интерфейсу поступают блоки данных содержащие результаты измерений псевдодалностей по коду и фазе, частоты Доплера, отношения сигнал/шум и амплитуды квадратурных компонент сигнала.

Максимальный объем информации соответствует условию выполнения двухчастотных измерений для 16 спутников (8 спутников GPS и 8 спутников ГЛОНАСС) с периодом 50 Гц и не должен превышать 25 Кбайт/с.

Определение времени и способы передачи данных о времени

• Результаты определения времени могут передаваться от БА ПЭС по основному интерфейсу, резервному интерфейсу и технологическому интерфейсу.

• Пакеты даты и времени передаются по основному и резервному интерфейсам в составе блока данных БА ПЭС.

• Если включен режим сигнала PPS, то по резервному интерфейсу передается сигнал секундного импульса синхронизированного со шкалой времени UTC с погрешностью ± 500 нс. Длительность импульса 3,2 мс.

• Если включен режим NMEA, то по технологическому интерфейсу будут передаваться сообщения «GNS», имеющие в своей структуре поля времени определения положения.

Первичные измерения, выполняемые аппаратурой ПЭС

- Набор параметров, передаваемых ПЭС в режиме первичных измерений:
- псевдодалность по коду P/L1;
- псевдодалность по коду P/L2;
- псевдодалность по фазе P/L1;
- псевдодалность по фазе P/L2;
- доплеровский сдвиг частоты канала P/L1;
- доплеровский сдвиг частоты канала P/L2;
- отношение сигнал/шум для канала P/L1;



- отношение сигнал/шум для канала P/L2;
- квадратурные компоненты сигнала в канале P/L1;
- квадратурные компоненты сигнала в канале P/L2.

Вычисление электронной концентрации

- Разность псевдодальностей по коду на двух частотах позволяет определить интеграл электронной концентрации вдоль пути распространения радиоволн — ТЕС.
- Разность псевдодальностей по фазе на двух частотах позволяет определить изменение интеграла электронной концентрации вдоль пути распространения радиоволн (во время сеанса измерений).
- Квадратурные компоненты сигнала используются для вычисления амплитуды сигнала, вариации которой совместно с вариациями фазы позволяют обнаруживать и корректировать влияние неоднородностей ионосферы.
- Для сферически-слоистой модели атмосферы используется интегральное преобразование Абеля для восстановления вертикального профиля электронной концентрации.

Заключение

Методы радиозатменных спутниковых измерений параметров атмосферы и ионосферы с использованием глобальных радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС/GALILEO занимают ведущие позиции в действующих и планируемых международных и национальных программах по метеорологии, климатическим изменениям, а также по исследованиям ионосферы и космической погоды.

Включение в состав комплекса научной аппаратуры КА «Микросат» аппаратуры ПЭС следует рассматривать как вполне уместный шаг войти в «международный клуб» постановщиков радиозатменных спутниковых измерений, освоить и внедрить в практику геофизических исследований в Украине работы, без которых не может быть успешной выполнение программы, ее научных и прикладных приложений.

Наиболее важными из таких работ следует отметить создание инфраструктуры оперативной обработки данных радиозатменных измерений, освоение современных методов с использованием адаптивных моделей среды, контакты и взаимодействие с международными центрами. Предполагается, что первичные данные измерений КА «Микросат», полученные с помощью аппаратуры ПЭС, будут в свободном доступе для авторизованных пользователей.

Если говорить о возможном направлении использования этих данных, то следует учитывать специфику радиозатменных измерений — по своей сути дистанционных. Измерения высотной структуры атмосферы и ионосферы будут дистанционно удалены от местоположения КА на ~3—3,5 тыс. км (при вы-

соте орбиты КА ~600 км). Очевидно, что их прямое сопоставление с данными локальных измерений на КА «Микросат» в большинстве случаев будет малооправданным. Поэтому, на наш взгляд, главным направлением научного анализа данных аппаратуры ПЭС является их использование в адаптивных моделях среды. Через уточненные таким образом глобальные распределения параметров среды возможен ретроспективный анализ связи, скажем, крупномасштабных структур в ионосфере с источниками различного вида возмущений, в т.ч. и сейсмических.

В настоящее время данные с наземной сети приемников GPS с временным разрешением 30 с уже представлены в интернете для свободного использования. Идет интенсивный процесс интеграции системы GPS с российской навигационной системой ГЛОНАСС, а в перспективе такая интеграция предполагается и с европейской навигационной системой GALILEO.

Разработка технологий использования GPS-измерений для дистанционной диагностики ионосферы ведется по нескольким направлениям. Создана технология GIM (Global Ionospheric Maps) — построение глобальных ионосферных карт абсолютного вертикального значения полного содержания электронов (ПЭС). Карты ПЭС в формате IONEX представлены на сайте [14]. Ряд центров, включая ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) и Гидрометцентр России занимаются оперативным усвоением радиозатменных данных в модели численного прогноза погоды.

Дальнейшее использование полученных данных и накопление новых будет способствовать более эффективным метеорологическим и климатическим исследованиям, изучению влияния солнечной активности и антропогенных факторов на состояние атмосферы и ионосферы, анализу связей сейсмической активности с состоянием ионосферы.

Совокупным результатом данных исследований должен быть переход на качественно более высокий уровень понимания физических процессов в атмосфере и ионосфере Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альперт Я.Л., Добрякова Ф.Ф., Чудесенко Е.Ф., Шапиро Б.С. Электронная концентрация внешней ионосферы, оцененная по изучению радиосигналов Первого спутника // Доклады Академии наук, УФН, 65. — 1958. — С. 120.
2. Yakov Alpert. Making waves: stories from my life // Yale University Press. New Haven & London. — 2000.
3. Арманд, Гуляев Ю.В., Гаврик А.Л., Ефимов А.И., Матюгов С.С., Павельев А.Г., Савич Н.А., Самознаев Л.Н., Смирнов В.М., Яковлев О.И. Результаты исследования солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами // УФН. — 2010. — Т. 180, № 5.
4. Kursinski E.R., Hajj G.A., Bertiger W.I., Leroy S.S., Meehan T.K., Romans L.J., Schofield J.T., McCleese D.J., Melbourne W.G., Thornton C.L., Yunck T.P., Eyre J.R., and Nagatani R.N. Initial results of radio occultation of Earth's atmosphere using the global positioning system // Science. — 1996. — 271. — P. 1107–1110.

5. *Kursinski E.R., Hajj G.A., Hardy K.R., Schofield J.T., and Linfield R.* Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements // *J. Geophys. Res.*, 102. — 1997. — P. 23429–23465.
6. *Kursinski E.R., Hajj G.A., Leroy S.S., and Herman B.* The GPS radio occultation technique // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 11. — 2000. — P. 53–114.
7. *Gorbunov M. E. and Kornblueh L.* Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data, *J. Geophys. Res.* 196(D15). — 2001. — P. 17161–17169.
8. *Gorbunov M.E. and Lauritsen K.B.* Analysis of wave fields by Fourier integral operators and their application for radio occultations // *Radio Sci.*, 39, RS4010. — doi:10.1029/2003RS002971. — 2004.
9. *Schunk R.W., Scherliess L., Sojka J.J., Thompson D.C., Anderson D.N., Codresco M., Minter C.F., Fuller-Rowell T.J., Heelis R.A., Hairston M., and Howe B.M.* Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM) // *Radio Sci.*, 39, RS1S02. — doi:10.1029/2002RS002794. — 2004.
10. *Schreiner W., Rocken C., Sokolovskiy S., Syndergaard S., and Hunt D.* Estimates of the precision of GPS radio occultations from the COSMIC/FORMOSAT-3 mission // *Geophys. Res. Lett.*, 34, L04808. — doi:10.1029/2006GL027557. — 2007.
11. *Yue X., Schreiner W.S., Lin Y.-C., Rocken C., Kuo Y.-H., and Zhao B.* Data assimilation retrieval of electron density profiles from radio occultation measurements // *J. Geophys. Res.*, 116, A03317. — doi:10.1029/2010JA015980. — 2011.
12. *Cook K. and Wilczynski P.* COSMIC-2 weather forecasting and space weather monitoring in the 21st century // *Earthzine*. — 2010. — Mode of access: <http://www.earthzine.org/2010/10/13/cosmic-2-weather-forecasting-and-space-weather-monitoring-in-the-21st-century/>
13. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru>
14. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>
15. *Вишняков В.М., Виноградов А.А., Павельев А.Г., Яковлев О.И., Матюгов С.С.* Космическая система на основе сверхмалых спутников «Радиомет-СМКА» для радиозатменного мониторинга атмосферы и ионосферы сигналами ГНСС ГЛОНАСС и GPS // Восьмая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — Москва: ИКИ РАН, 15–19 ноября 2010 г.
16. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/222.pdf>

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПРОЕКТЕ «ИОНОСАТ-МИКРО»

В.Е. КОРЕПАНОВ, С.М. БЕЛЯЕВ

Введение

Одним из основных направлений экспериментальных космических исследований на сегодняшний день является изучение и, в особенности, прогноз космической погоды (КП). Не будем останавливаться на важности таких исследований — имеется множество публикаций на эту тему, как в отечественной, так и в зарубежной литературе. При этом, как правило, подразумевается, что КП контролируется солнечной активностью, и не упоминается о гораздо более слабом, но, тем не менее, существенном влиянии на околоземный космос мощных природных и антропогенных процессов, происходящих на Земле (см., например, [1]).

Наземные радиопередатчики, электростанции, линии электропередач и промышленные объекты образуют источники поступления в ионосферу электромагнитной (ЭМ) энергии, что порождает ряд специфических явлений, таких как генерация вторичных ЭМ эмиссий, отклонение хода ионосферных параметров от медианных значений и т.д. Происходит устойчивый рост техногенного воздействия на ионосферу, возможные последствия которого сегодня трудно оценить. Поэтому важно провести статистически достоверное исследование вариаций ионосферных параметров за счет природных и искусственных факторов, прежде всего связанных со значительным увеличением производства ЭМ энергии. Соответственно, задачей проекта «Ионосат-Микро» является мониторинг ЭМ волновых процессов в широком диапазоне частот (от КНЧ до ВЧ) с расширенной наземной поддержкой. Тем самым может быть создан инструмент для изучения техногенных возмущений ионосферы и определения их критического уровня. Значительный интерес также имеет практическое использование указанных наблюдений для контроля за распределёнными по Земле средствами производства и потребления ЭМ энергии, как в региональных, так и в глобальных масштабах.

Вызванные наземными процессами ЭМ эффекты наблюдаются в ионосфере, начиная с запуска первых научных спутников. Несмотря на долгую историю таких исследований, вопросы, связанные с ЭМ загрязнением окружающей среды, изучены недостаточно. ЭМ шумы земного происхождения

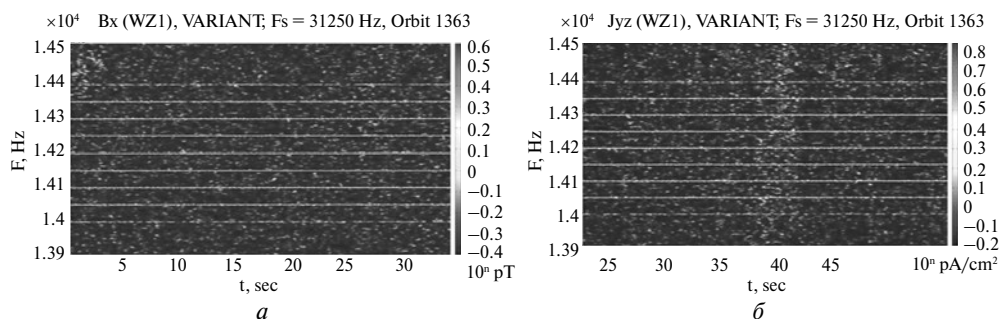


Рис. 1. Гармоники частоты 50 Гц, транспонированные в область 14,2 кГц: *а* — по магнитному полю, *б* — по плотности пространственного тока

были обнаружены на спутниках ARIEL-3 и -4 [2], в частности, шумовые сигналы очень низкой частоты (ОНЧ), вызванные гармониками излучения линий электропередач и навигационных передатчиков [3].

Наблюдения ЭМ излучений на низкоорбитальных спутниках ИНТЕРКОС-МОС-19, КОСМОС-1809, АКТИВНЫЙ и АРЕХ подтвердили существенное увеличение интенсивности высокочастотных ЭМ шумов над населенными районами Европы и Азии (например, [4, 5]): усиление около 20 дБ на фоне нормального уровня наблюдалось над всей Евразией. Однако и гармоники промышленной частоты 50 (60) Гц также постоянно наблюдаются с борта спутников, при этом в самых различных частотных диапазонах. Так, в области повышенных частот наблюдаются, как правило, целые наборы спектральных линий, разделенных 50 или 100 Гц. Их амплитуда увеличивается в области 1...2 кГц, однако, как показывают экспериментальные данные, они могут наблюдаться и на частотах до 15 кГц.

На рис. 1 показаны достаточно мощные гармоники частоты 50 Гц, зарегистрированные на борту спутника «Сич-1М» в эксперименте «Вариант» [6] на юге Аравийского полуострова (на высоте ~340 км) в каналах измерения магнитной индукции (рис. 1, *а*) и плотности пространственного тока (рис. 1, *б*). При этом ни в этом районе, ни в магнито-сопряженной точке мощных производителей или потребителей ЭМ энергии не обнаружено, что позволяет говорить о глобальном характере ЭМ загрязнений ионосферы, связанных, скорее всего, с суб-ионосферным распространением ЭМ волн указанных диапазонов.

Действительно, учитывая, что линии электропередач могут иметь длину до нескольких тысяч километров, они могут представлять собой антенну соответствующей длины для излучения ЭМ волны 50 или 60 Гц. Излучение возникает следующим образом. Электрический ток обычно подается потребителям по проводам трехфазной электрической линии. Эти провода образуют гигантские петли тока с площадью более нескольких десятков квадратных километров, а амплитуда тока может составлять до 4 кА. Такая электрическая линия образует мощную токовую петлю с очень большим вертикальным маг-



Рис. 2. Влияние гармонического излучения линий электропередач на земную среду (взято из: [7]). Стрелки соединяют известные физические процессы, которые не были количественно оценены

нитным моментом (порядка $10^{11} \text{ А} \cdot \text{м}^2$), которая и является источником ЭМ поля 50 или 60 Гц. Токи в линиях электропередач, силовых трансформаторах и промышленном оборудовании потребителей часто содержат высшие гармоники, и эти последние излучаются с большей эффективностью. Следует подчеркнуть, что нормальное значение коэффициента гармоник в линии электропередачи находится в пределах 6 %, а допустимый предел — 20 %. Имеются экспериментальные результаты, которые показывают, что в линиях электропередач могут наблюдаться гармоники 23-го порядка и выше. В результате, потребление электроэнергии действует в двух направлениях: оно изменяет ионосферу и магнитосферу над линией электропередачи и одновременно излучает сигнал основной частоты и ее гармоник в полости Земля — ионосфера.

Таким образом, обнаружено весьма сложное явление воздействия на ионосферу гармонического излучения линий электропередач, которое может иметь определенные экологические последствия. Рис. 2 иллюстрирует гипотетическую картину взаимодействия различных природных и техногенных процессов в околоземном пространстве [7], в том числе с участием гибридных резонансов линий электропередач, и показывает, что влияние излучения линий электропередач может вызвать высыпание энергичных электронов из радиационных поясов Земли. Физика обнаруженного явления заключается в нелинейном взаимодействии сильных электрических и магнитных полей с ионосферной и магнитосферной плазмой и с заряженными частицами в радиационных поясах. Таким образом, увеличение мирового потребления электроэнергии может вызвать дополнительные потоки энергичных электронов с не вполне известными последствиями для окружающей среды.

Такие эффекты действительно часто наблюдаются с борта спутников при исследованиях ЭМ полей и концентрации заряженных и нейтральных частиц. Учитывая, что на борту спутника «Ионосат-Микро» будет установлен хорошо оснащенный измерительный комплекс для изучения ЭМ излучений в широком частотном диапазоне, исследование этих процессов включено в научные задачи эксперимента. Ожидается, что в результате проведения эксперимента может быть получена глобальная карта, которая будет отражать распределение регионального среднего уровня возмущений и его суточные/сезонные колебания. Возможно, что при дальнейшем развитии исследований могут быть экспериментально установлены и количественные соотношения, что позволит оценить уровни ЭМ загрязнения, создаваемые отдельными странами.

Так, известно, что компонента ЭМ поля, которая взаимодействует с плазмой ионосферы прямо над линией питания, нагревает электроны в нижней ионосфере. Соответствующая оценка, сделанная в [8], полагает, что именно нагрев электронов является демаскирующим фактором передатчика ВМС США в Висконсине: расчеты показывают, что увеличение средней температуры электронов ($T_e = 300$ K) может достигать 10 %, в зависимости от времени суток и положения линии. Такие отклонения могут показаться небольшими, однако следует подчеркнуть, что этот фактор действует постоянно, днем и ночью. В результате совокупный эффект может стать существенным, особенно если рассматривать не одну линию, а, например, региональную систему энергоснабжения, охватывающую большую площадь.

Изложенного выше достаточно для обоснования важности изучения взаимодействия постоянно растущего ЭМ излучения с ионосферой Земли. Рассмотрим состав аппаратуры, который будет использован для проведения соответствующего эксперимента в рамках спутниковой миссии «Ионосат-Микро».

Аппаратурный комплекс для изучения параметров ионосферы, связанных с взаимодействием мощных наземных источников ЭМ энергии

Изучение взаимодействия мощного излучения линий электропередач с ионосферой требует исследования следующих явлений:

- пространственно-временной структуры и глобального распределения неоднородностей в космической плазме;
- глобальной структуры и динамики электрического тока, электрических и магнитных полей в широком диапазоне частот;
- волновой структуры ЭМ излучений и турбулентности в различных пространственных и временных масштабах.

Целесообразна синхронизация соответствующих космических экспериментов с наземными наблюдениями, а также сочетания как активных, так и пассивных экспериментов.

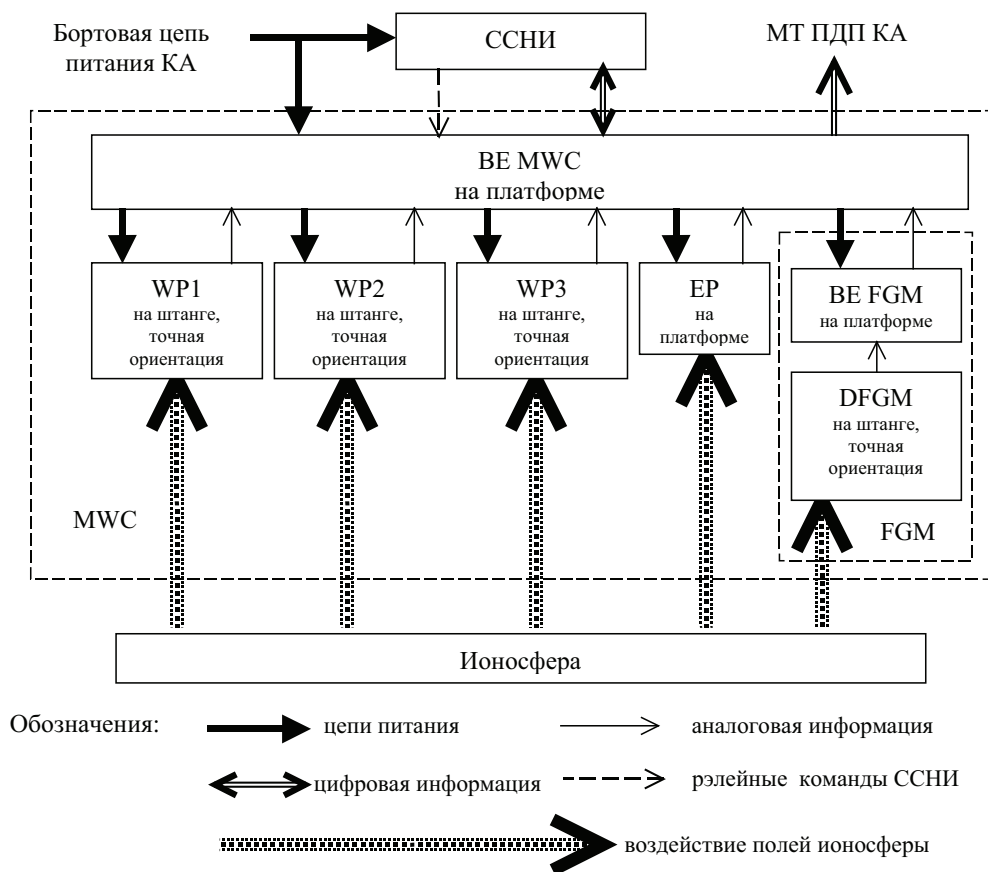


Рис. 3. Блок-схема MWC

Для реализации этой программы исследований научная аппаратура планируемой миссии должна, в первую очередь, измерять такие параметры в ионосфере, как векторы ЭМ полей и плотности тока во всем диапазоне частот, от квазипостоянного до 20 кГц, дополняемые данными о плотности и температуре плазмы. Весь комплекс научных задач проекта «Ионосат-Микро» и планируемые режимы измерений изложены в работах [9]. В дальнейшем основное внимание будет уделено описанию магнитно-волнового комплекса (MWC), предназначенного для измерения ЭМ параметров ионосферы.

Комплекс MWC состоит из следующего набора ЭМ датчиков и блока электроники:

- три волновых зонда — WP1, WP2 и WP3;
- электрический зонд ЕР;
- магнитометр FGM, состоящий из блока электроники BE FGM и датчика DFGM;
- блок электроники BE MWC.

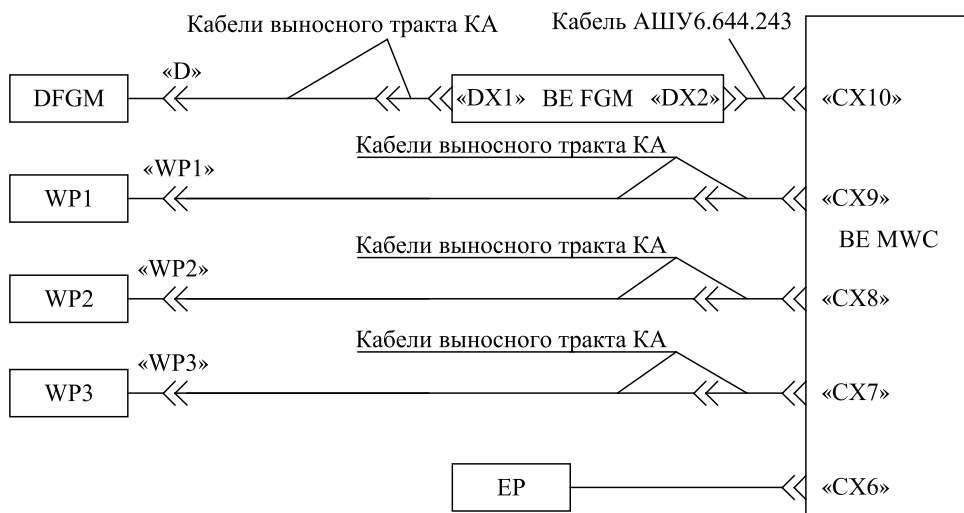


Рис. 4. Схема подключения составных частей MWC

Массогабаритные характеристики и энергопотребление составных частей MWC приведены в табл. 1, блок-схема MWC — на рис. 3, а схема подключения составных частей — на рис. 4.

Для обеспечения качественных измерений все волновые зонды (WP1, WP2 и WP3) и датчик феррозондового магнитометра (DFGM) размещаются на штангах КА. Электрический зонд (EP), штанга для которого не предусмотрена конструкцией КА, расположен на платформе КА на максимальном расстоянии от плоскости раскрытия выносных штанг (плоскости расположения WP1, WP2 и WP3). Блоки электроники BE FGM и BE MWC расположены на платформе КА.

Таблица 1

Массогабаритные характеристики составных частей MWC

Обозначение составной части	Масса, кг	Габаритные размеры, мм	Потребляемая мощность, Вт
BE MWC	2,6	226 × 194 × 80	4...6 (вместе с датчиками)
FGM:			
BE FGM	0,35	140 × 85 × 40	0,35
DFGM (без учета кабельной части)	0,15	Ø40 × 62	0,15
Кабельная часть		300 ± 10	
WP1, 2, 3 (без учета кабельной части)	0,4	325 × 65 × 65	0,3
Кабельная часть		350 ± 10	
EP (без учета кабельной части)	0,3	Ø49 × 185	0,2
Кабельная часть		800 ± 10	

Питание MWC осуществляется от бортовой сети напряжением 27 В, которое постоянно поступает в ВЕ MWC. Коммутация питания происходит внутри ВЕ MWC по командам, поступающим из системы сбора научной информации спутника (ССНИ).

Условная схема размещения составных частей комплекса представлена на Рис. 5. MWC позволяет измерять следующие ЭМ параметры ионосферы:

- вектор (три компоненты) квазипостоянного магнитного поля (FGM X, FGM Y и FGM Z);
- вектор (три компоненты) переменного магнитного поля (WP1 В, WP2 В и WP3 В);
- вектор (три компоненты) переменной составляющей плотности пространственного тока в плазме (WP1 I, WP2 I и WP3 I);
- постоянную составляющую величины потенциала корпуса КА (EP DC);
- переменную составляющую разности потенциалов между точками размещения:

EP и WP1 (сигнал E1),
 EP и WP2 (сигнал E2),
 EP и WP3 (сигнал E3),
 WP2 и WP3 (сигнал E4).

Последний набор данных с известной погрешностью даст нам также и вектор переменного электрического поля в косоугольной системе координат. Необходимые для его вычисления расстояния и углы могут быть найдены из рис. 5. Параметры измеряемых сигналов с указанием режимов измерения приведены в табл. 2.

В блоке электроники комплекса производится оцифровка аналоговых сигналов датчиков, управление их режимами работы, передача оцифрованных данных и служебной, телеметрической информации в ССНИ.

Состав телеметрической информации, которая передается от блока электроники MWC в ССНИ и в служебную систему КА в различных режимах, приведен в табл. 3, 4.

Измерение температуры проводится для повышения достоверности научных измерений, так как реальные значения температур на штангах могут выходить за пределы рабочих температур датчиков, что приводит к дополнительной погрешности измерений параметров ионосферы.

Для обеспечения синхронизации измерений преобразование аналоговых сигналов WP(1...3) В, WP(1...3) I, E1...E4 в цифровой код производится параллельно работающими независимыми каналами АЦП по команде «измерение». Так как частоты опроса сигналов FGM X...Z, T, EP DC, WP(1...3) T значительно ниже частот опроса других сигналов, преобразование их в цифровой код производится последовательно двумя АЦП в следующем порядке:

- FGM X, FGM Y, FGM Z, EP DC;
- WP1 T, WP2 T, WP3 T, FGM T.

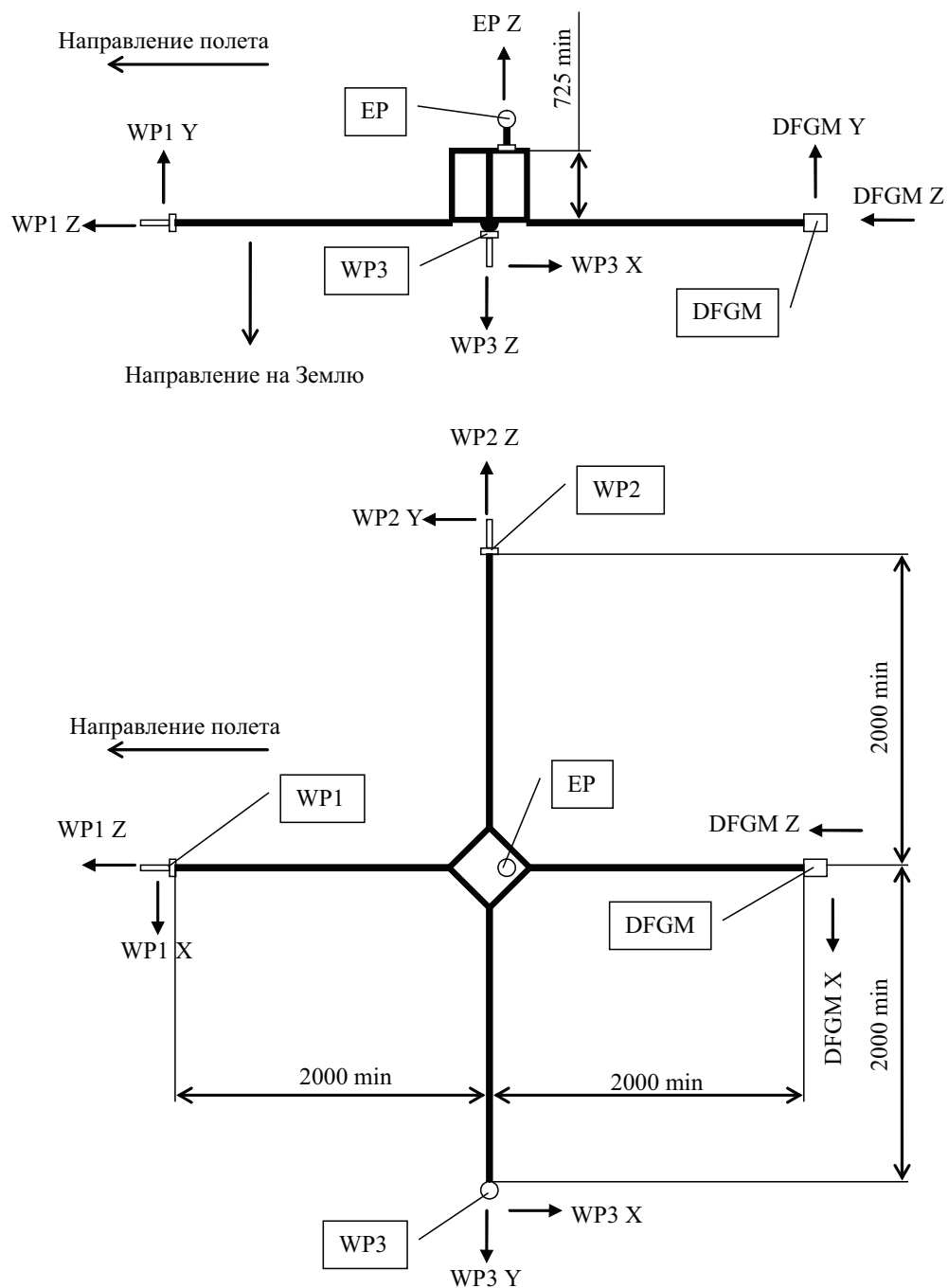


Рис. 5. Схема взаимного расположения датчиков комплекса MWC

режим М — 0.58;

Перечень и параметры сигналов, измеряемых блоком электроники MWC

89



Состав телеметрической информации, передаваемой МWC в ССНИ

Параметр	Обозначение сигнала	Вид сигнала	Режим, в котором передается информация
Наличие напряжения питания WP1	U WP1	Логический: «1» — есть напряжение; «0» — нет напряжения	После включения, Т
Наличие напряжения питания WP2	U WP2		
Наличие напряжения питания WP3	U WP3		
Наличие напряжения питания FGM	U FGM		
Наличие напряжения питания EP	U EP		
Напряжение «+ 5VD»	+ 5VD	Цифровой, 8 бит	Т
Ток потребления по цепи «+ 5VD»	I VD	Цифровой, 8 бит	Т
Температура WP1	WP1 T	Цифровой, 8 бит	Т, М, S, перед Е
Температура WP2	WP2 T	Цифровой, 8 бит	Т, М, S, перед Е
Температура WP3	WP3 T	Цифровой, 8 бит	Т, М, S, перед Е
Температура DFGM	FGM T	Цифровой, 8 бит	Т, М, S, перед Е
Напряжение «+ 3.3V»	+ 3.3V	Цифровой, 8 бит	Т
Напряжение «+ 5V» аналоговое	+ 5V	Цифровой, 8 бит	Т
Температура узла питания МWC	MWC T	Цифровой, 8 бит	Т
Состояние процессора BE МWC	VP MWC	Лог. «1» — норма; «0» — ошибка	Т
Состояние включения FGM	FGM ON	Лог. «1» — включен; «0» — выключен	После включения, Т, М, S, перед Е
Режим работы FGM	MODE FGM	Лог. «1» — рабочий; «0» — тестовый	Т, М, S, перед Е
Состояние генератора сигнала калибровки WP и EP	ON CALIBR	Лог. «1» — включен; «0» — выключен	Т, М, S, перед Е
Режим работы каналов WP В	MODE В WP	Лог. «1» — рабочий; «0» — тестовый	Т, М, S, перед Е
Режим работы каналов WP I	MODE I WP	Цифровой, 2 бита: «00» — команд не было; «01» — рабочий; «10» — тестовый; «11» — недопуст. знач.	После включения, Т, М, S, перед Е
Режим работы EP	MODE EP	Цифровой, 2 бита: «00» — команд не было; «01» — рабочий; «10» — тестовый; «11» — недопуст. знач.	После включения, Т, М, S, перед Е

режим МБ — 34.34;

режим Е — 114.45.

Тестовый режим (Т) предназначен для оценки работоспособности MWC при входном контроле, наземной отработке в составе КА и в полете. Продолжительность режима (без учета времени обработки информации) — 15 с. В режиме Т проводится:

- тестирование WP, EP и FGM;
- тестирование управляющего процессора MWC;
- формирование и передача в ССНИ телеметрической информации в соответствии с результатами тестирования.

Перейдем к описанию датчиков WP, EP и FGM, входящих в состав комплекса. Каждый из этих датчиков уже был опробован в условиях космического полета [10]. Остановимся лишь на их основных особенностях, учет которых необходим для правильной интерпретации результатов измерений в рамках данного проекта.

Датчики MWC

В состав датчиков комплекса MWC входят три волновых зонда WP, один электрический зонд EP и датчик магнитометра постоянного поля DFGM. Особенности установки этих датчиков на борту спутника описаны выше.

Волновой зонд WP был разработан в содружестве с Институтом космических исследований АН СССР (научный руководитель С.И. Климов) с целью исследования возможности совмещения измерения нескольких физических

Таблица 4

Состав телеметрической информации, передаваемой в ПДП КА

Параметр	Обозначение сигнала	Вид сигнала
Контрольный сигнал работоспособности процессора BE MWC	MWC.OK	Замыкание оптронного ключа на общий провод модуля телеметрии ПДП КА (COM TM): «замкнуто» — норма; «разомкнуто» — ошибка или процессор выключен
Контрольный сигнал наличия напряжения питания BE MWC	MWC.PW	Замыкание оптронного ключа на общий провод модуля телеметрии ПДП КА (COM TM): «замкнуто» — питание подано; «разомкнуто» — питание не подано
Контроль стыковки датчиков MWC	MWC.LINK	Замыкание цепи MWC.LINK на общий провод модуля телеметрии ПДП КА (COM TM): «замкнуто» — все приборы WP1, WP2, WP3, EP, DFGM и BE FGM подключены; «разомкнуто» — хотя бы один из приборов WP1, WP2, WP3, EP, DFGM и BE FGM не подключен

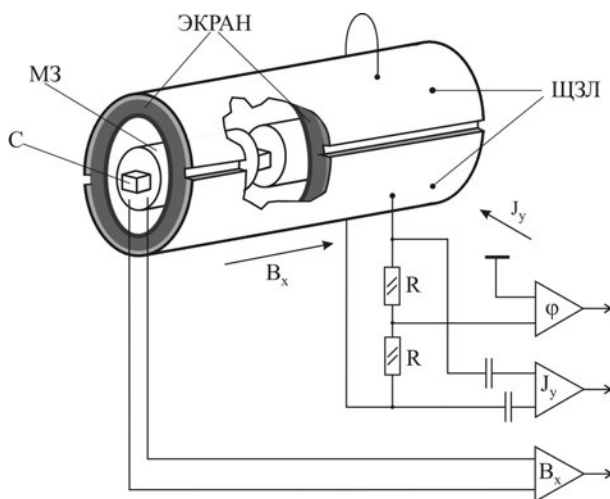


Рис. 7. Схема построения волнового зонда LEMI-602

величин — плотности пространственного тока, индукции магнитного поля и электрического потенциала — в одном приборе. Такая потребность возникла в связи с уменьшением размеров ИСЗ для научных исследований и, в особенности, необходимостью уменьшения количества штанг для установки датчиков на борту ИСЗ. Его общий вид и конструкция приведены на рис. 6 (см. на цветной вкладке) и 7 [11].

Как видно из схемы, в одном корпусе этого датчика находятся индукционный магнитометр, внешний экран которого выполнен разрезным и играет роль контактных пластин щелевого зонда Ленгмюра, успешно использованного ранее для измерения плотности пространственного тока на борту ИСЗ «Прогноз-8» [12]. В данной конструкции эти же пластины щелевого зонда используются как датчик электрического потенциала. Особенности работы волнового зонда рассмотрены в [11]. Как показала практика, в первом же эксперименте «Вариант» на борту спутника «Січ-1М» этот прибор показал достоверные результаты измерения всех трех величин в космической плазме — плотности пространственного тока, магнитной индукции и электрического потенциала [6].

К сожалению, в следующем эксперименте на борту микроспутника «Чибис-М» (запущен в январе 2012 г.), где также были установлены два волновых зонда, не удалось получить результаты измерения плотности пространственного тока, хотя величины магнитной индукции и электрического потенциала измерены этим прибором достаточно точно [13]. Это заставило провести модернизацию и повторные исследования токового канала волнового зонда — щелевого зонда Ленгмюра — с целью повышения его разрешающей способности. Такой модифицированный зонд прошел повторные испытания в плазменной камере Института технической механики НАНУ и ГКАУ при поддержке лабо-

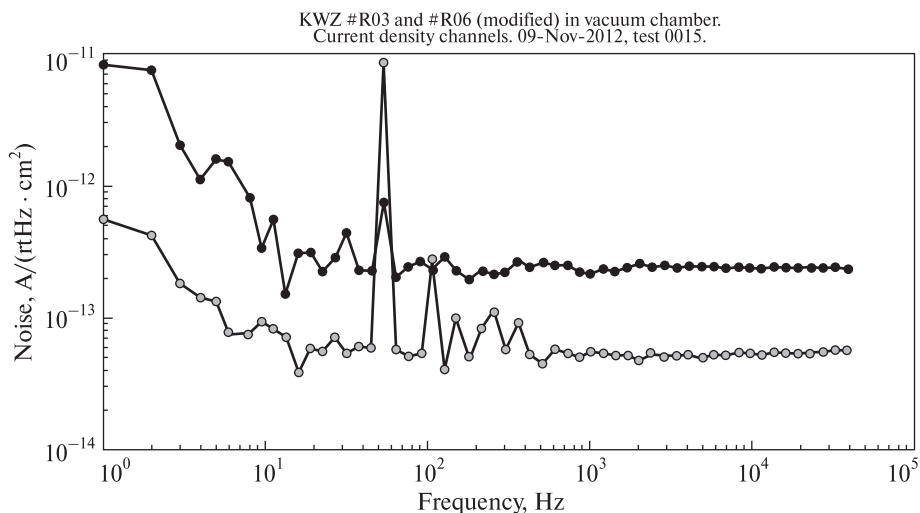


Рис. 8. Результаты испытаний щелевого зонда Ленгмюра в плазменной камере

ратории проф. В.А. Шувалова. Спектральная плотность шума для модифицированного (зеленая кривая) и немодифицированного (синяя кривая) вариантов щелевого зонда Ленгмюра в камере плазмодинамического стенда показана на рис. 8. Из графиков следует, что шум усовершенствованного варианта приблизительно в 4—5 раз ниже шума прежнего варианта щелевого зонда Ленгмюра. Сравнение достигнутой чувствительности щелевого зонда Ленгмюра с чувствительностью такого же прибора, показавшего хорошие результаты в эксперименте «Вариант» на спутнике «Сич-1М» [6], позволяет надеяться на получение надежных результатов измерений в будущем эксперименте.

Наиболее давно в практике экспериментальных космических исследований используется электрический зонд (ЕР). Его начальный вариант был построен в 1970-х гг. в ОКБ Института космических исследований АН СССР. В первом же эксперименте на борту спутника «Космос-484» впервые в мире с помощью этих зондов были получены достоверные результаты измерения всех трех компонент вектора электрического поля в ионосфере [12]. В дальнейшем, после тщательного анализа условий работы электрического зонда в ионосфере [14], удалось несколько уменьшить его размеры без ухудшения метрологических параметров, и в таком виде этот прибор постоянно используется в отечественных и зарубежных экспериментах (например, «Компас», «Потенциал», «Вариант»). Внешний вид электрического зонда LEMI-502, который будет использован в описываемом эксперименте, приведен на рис. 9 (см. на цветной вкладке).

Ввиду малого размера спутника и связанного с этим ограничения на количество штанг, а также учитывая положительный опыт использования волновых зондов для формирования измерительной базы напряженности электрического поля в эксперименте «Вариант» [10], принято решение применить похожую

схему расположения датчиков (см. рис. 5), при которой только в общей точке системы электрических датчиков установлен собственно электрический зонд, а в трех остальных точках для контакта с плазмой используются проводящие пластины волновых зондов WP. Такая конструкция, ввиду разной формы и разных условий обтекания отдельных датчиков, не может претендовать на качественные измерения постоянной компоненты вектора электрического поля, но для измерения переменных сигналов она успешно использовалась, что, в частности, подтвердилось и в эксперименте на спутнике «Чибис» [13].

Магнитометр постоянного поля LEMI-012 (рис. 10 на цветной вкладке) построен по схеме, аналогичной прибору ДМ1 эксперимента «Обстановка-1» на борту Международной космической станции, с использованием многолетнего опыта, накопленного в ЛЦ ИКИ в области создания низкошумящих феррозондовых магнитометров [15]. Основной его особенностью является одновременное снижение уровня шумов и потребляемой мощности, что крайне важно для космического эксперимента.

Сведения об уровне шумов (пороговой чувствительности), максимальном уровне регистрируемых сигналов и частотном диапазоне измерений всех описанных датчиков приведены в табл. 2.

Заключение

Программа научных исследований на борту КА «Ионосат-Микро» довольно разнообразна и, судя по приборному составу, может быть успешно выполнена. Важной особенностью этих исследований является их преемственность — после запуска первого ИСЗ планируется несколько последующих запусков с аналогичным приборным составом, что позволит решать поставленные задачи в их естественном развитии. Решение описанной здесь научной задачи, а также выполнение остальной программы исследований [9] возможны только в результате длительного мониторинга состояния ионосферы и в такой последовательности, когда полученные результаты корректируют параметры и состав приборного обеспечения последующего эксперимента.

Работа выполнена при поддержке ГКАУ, контракт 4-04/13.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф. Монография. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2012. — 555 с.
2. Bullough K., Kaiser R. *Strangeways*, H.J. Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. — Dec., 1985. — V. 47. — P. 1211—1223.
3. Молчанов О. А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. — Москва: Наука, 1985. — 224 с.
4. Parrot M. World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite // Annales Geophysicae. — 1990. — V. 8. — P. 135—145.

5. Rothkaehl H., Parrot M. Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics — 2005. — V. 67, Issue 8—9. — P. 821—828.
6. Dudkin F., Korepanov V., Lizunov G. Experiment VARIANT — first results from wave probe // Adv. Space Res. — 2009. — V. 43, № 12. — P. 1904—1909.
7. Parrot M., Zaslavski Y. Physical mechanisms of manmade influences on the magnetosphere // Surveys in Geophysics. — 1996. — V. 17, № 1. — P. 67—100.
8. Row R.V., Mentzoni M. H On D-region Electron Heating by a Low-Frequency Terrestrial Line Current With Ground Return // Radio Science. — 1972. — V. 7, Issue 11. — P. 1061—1066.
9. Лизунов Г.В., Лукенюк А.А., Макаров А.Л., Фёдоров О.П. Космический проект Ионосат-Микро: цели и методы // Космический проект «Ионосат-Микро». — К. : Академперіодика, 2013. — С. 11—25.
10. Корепанов В.Є., Крючков Є.І., Лізунов Г.В., Федоренко А.К., Дудкін Ф.Л. Експеримент «Варіант» на супутнику «Січ-1М» — Перші результати // Космічна наука і технологія. — 2007. — Т. 13, № 4. — С. 10—17.
11. Korepanov V., Dudkin F. Comparative Analysis of Current Density Meters Operating in Space Plasmas // Adv. Space Res. — 1999. — 23, № 8. — P. 1541—1544.
12. Агарков В.Ф., Антонов Н.М. и др. Измерение вектора напряженности постоянного электрического поля на спутнике «Космос-484» // Космические исследования. — 1977. — Т. XV, Вып. 1. — С. 94—101.
13. Климов С.И., Вавилов Д.И., Готлиб В.М., Долгоносков М.С., Каредин В.Н., Новиков Д.И., Корепанов В.Е., Дудкин Ф.Л., Ференц Ч., Боднар Л. Исследование ионосферной электромагнитной активности на микроспутнике «Чибис-М» // 8-я Ежегод. конф. «Физика плазмы в Солнечной системе». — 4—8 февраля 2013. — Москва. — Сборник тезисов. — С. 61.
14. Сопрунюк П.М., Климов С.И., Корепанов В.Е. Электрические поля в космической плазме. — Киев: Наукова думка, 1994. — 190 с.
15. Korepanov V., Marusenkov A. Flux-Gate Magnetometers Design Peculiarities // Surveys in Geophysics. — September 2012. — V. 33, Issue 5. — P. 1059—1079.

АППАРАТУРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕЙТРАЛЬНОГО И ЗАРЯЖЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОЕКТЕ «ИОНОСАТ-МИКРО»

С.Н. КУЛАГИН, Н.И. ПИСЬМЕННЫЙ, Н.А.ТОКМАК, А.Г. ЦОКУР

Изменения состояния ионосферы являются индикатором, реагирующим как на воздействия «сверху» (Солнце, гелиосферные возмущения), так и воздействия «снизу» (процессы в Земле и на её поверхности). При этом ионосфера реагирует на воздействие «сверху», как правило, постфактум (с опозданием), а на воздействия «снизу» (скажем, землетрясения) может реагировать с опережением. Это обстоятельство целесообразно использовать для прогнозирования пространственно-временной локализации природных и техногенных катастрофических явлений. Флуктуации электрических и магнитных полей, основных кинетических параметров нейтрального и заряженных компонентов, развитие неустойчивостей в ионосферной плазме могут служить предвестниками землетрясений, извержений вулканов, торнадо, песчаных бурь и прочих катаклизмов [1–3]. Для мониторинга и регистрации флуктуаций основных кинетических параметров, как предвестников катастрофических явлений, их локализации могут быть использованы диагностические средства, и, прежде всего, средства контактной диагностики на орбитальных космических платформах [4–9].

Состояние ионосферной плазмы, ее нейтрального и заряженных компонентов характеризуется основными кинетическими параметрами, такими, как температуры электронов T_e , ионов T_i и нейтралов T_n , концентрации нейтральных N_n и заряженных частиц $N_{i,e}$ (ионов и электронов), степени неизоэрмичности T_e / T_i , ионизации $\varepsilon_i = N_i / (N_i + N_n)$ и потенциал пространства (плазмы) ϕ_0 . Для диагностики плазмы низкой плотности в ионосфере обычно используются зондовые методы. При этом зондовые методы диагностики потоков разреженной неизоэрмической плазмы в лабораторных условиях и в ионосфере при давлениях ниже, чем 10^{-2} Па не замкнуты: вольтамперные характеристики (ВАХ) электрических зондов не позволяют определить параметры тяжелых частиц — ионов и нейтралов плазмы.

С целью повышения информативности зондовых методов при диагностике неизоэрмической плазмы низкой плотности в ионосфере в состав комплекса научной аппаратуры КА «Сич-2» (запущен 17.08.2011 г. на гелиосинхронную орбиту высотой 700 км и наклоном 98°) включены две зондовые системы, разработанные и изготовленные в Институте технической механики (ИТМ):

1. Датчик электронных компонентов плазмы (ЭКП) — одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра радиусом $r_p = 0,05$ см и длиной $l_p = 12,0$ см с охранным электродом радиусом $r_g = 0,2$ см и длиной $l_g = 12,5$ см. При измерениях ВАХ ось симметрии зонда Ленгмюра должна быть ортогональна вектору скорости $\vec{U}_\infty$ полета КА.

2. Датчик нейтральных компонентов плазмы (НКП), состоящий из двух зондов давления с инверсно-магнетронными преобразователями (ИМП) в качестве чувствительных элементов. Нормали к апертурам входных отверстий ИМП взаимно-ортогональны. При измерениях нормаль к апертуре входного отверстия первого датчика ИМП $\vec{n}_1$ должна быть параллельна вектору скорости $\vec{U}_\infty$ полета КА ($\theta_1 = 0$), а нормаль $\vec{n}_2$ к апертуре второго датчика ИМП — перпендикулярна вектору скорости $\vec{U}_\infty$ ($\theta_2 = \pi/2$). Углы θ_1 и θ_2 — между нормалью $\vec{n}_{1,2}$ и вектором скорости полета КА.

Применение датчиков на КА «Сич-2» с использованием разработанных теории, процедур, анализа и обработки выходных сигналов приборов [10, 11] позволили замкнуть задачу диагностики неравновесной разреженной плазмы и определить полный комплекс локальных значений основных кинетических параметров, характеризующих состояние околоспутниковой среды [12—14].

При решении задачи научно-технического обеспечения диагностики ионосферной плазмы в проекте «Ионосат-Микро» в ИТМ были учтены некоторые сложности, возникшие при эксплуатации аппаратуры на КА «Сич-2» и анализе, интерпретации выходных сигналов приборов.

С учетом этих обстоятельств в ИТМ для проекта «Ионосат-Микро» на базе датчиков НКП и ЭКП разработаны и изготовлены усовершенствованные приборы для диагностики нейтральных (детектор DN) и заряженных частиц (детектор DE, состоящий из двух взаимно-перпендикулярных зондов Ленгмюра).

На рис. 1, а и 1, б (см. на цветной вкладке) показаны изготовленные в ИТМ в рамках проекта «Ионосат-Микро» приборы. Детектор DN показан с блоком электроники, изготовленным Львовским центром ИКИ НАНУ и ГКАУ.

Для повышения чувствительности детектора DN по сравнению с датчиком НКП улучшены параметры разряда в ионизационной камере ИМП, минимизировано влияние технологических факторов, ухудшающих параметры разряда, таких как стабильность, амплитуды выходных сигналов (ток, напряжение и пр.), уменьшено влияние газовыделения на ток разряда; упрощена конструкция, значительно уменьшены габаритные размеры и вес, улучшены магнитные характеристики, повышена прочность и надежность узла крепления магнитной системы.

Выходными сигналами детектора DN являются:

- ток газового разряда ИМП 1;
- ток газового разряда ИМП 2;
- температура корпуса ИМП 1;
- температура корпуса ИМП 2.



Диапазон тока газового разряда каждого из инверсно-магнетронных преобразователей датчика DN составляет от 10^{-10} А до 10^{-4} А. Диапазон изменения температур корпуса составляет от минус 80 до плюс 80 °С. Детектор DN управляется высоковольтным модулем питания с выходным напряжением постоянного тока от 500 до 4000 В.

Рабочий диапазон детектора DN:

- температура нейтралов $5 \cdot 10^2 \leq T_n \leq 3 \cdot 10^3$ К;
- концентрация нейтралов $10^4 \leq N_n \leq 10^{10}$ см⁻³.

Массогабаритные характеристики детектора DN приведены в таблице 1 (для сравнения приведены характеристики датчика НКП).

Технические характеристики детектора DN приведены в таблице 2.

Детектор DE конструктивно включает два взаимно-ортогональных цилиндрических электрических зонда, каждый из которых состоит из измерительного и охранного электродов. Такая компоновка детектора DE позволяет в процессе эксплуатации определять по выходным сигналам ориентацию зондов относительно вектора скорости набегающего потока (полета КА).

Диапазон синхронного изменения потенциала измерительного и охранного электродов детектора DE составляет минус 15 — плюс 15 В относительно корпуса КА. Величина постоянного тока в цепи «измерительный электрод —

Таблица 1

Массогабаритные характеристики детектора DN и датчика НКП

Наименование составной части	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Детектор DN (с блоком электроники, но без учета кабельной группы)	117 × 100 × 100	1,264
Датчик НКП (без учета кабельной группы)	134 × 130 × 100	2,2

Таблица 2

Основные технические данные детектор DN

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон тока каждого из ИМП при изменении давления от $5 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-7} Па в газовой среде, А	$10^{-10}—10^{-4}$
Рабочее напряжение постоянного тока, В	4,6
Величина нескомпенсированного магнитного момента, А · м ²	0,02
Посадочная плоскость, мм	70,0 × 96,0

Примечание. Величина нескомпенсированного магнитного момента датчика НКП составила 0,12 А · м²

Таблица 3

Массогабаритные характеристики детектора DE

Наименование составной части	Габаритные размеры, мм, не более	Масса, кг, не более
Детектор DE, состоящий из двух взаимно-перпендикулярных электрических зондов (без учета кабельной части)	$245 \times 245 \times 35$	0,055
Габаритные размеры каждого из электрических зондов без учета кабельной группы, мм:		
— диаметр;	$35,0 \pm 0,2$	
— длина, не более	$245,0 \pm 0,5$	
Масса прибора (каждого из электрических зондов), г	$27,5 \pm 1,0$	

Таблица 4

Основные технические данные детектора DE

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон изменения потенциала электрода зонда, В	От минус 15 до плюс 15
Постоянный ток в цепи «измерительный электрод — корпус КА»:	
— при плюс 15 В, не более, мкА	30,0
— при минус 15 В, не более, мкА	1,0
Постоянный ток в цепи «охранный электрод — корпус КА»:	
— при плюс 15 В, не более, мкА	100,0
— при минус 15 В, не более, мкА	5,0

корпус КА» при изменении потенциала измерительного электрода от минус 15 до плюс 15 В ограничена диапазоном от 10^{-10} до 10^{-4} А.

Рабочий диапазон детектора DE:

- зондовый ток $10^{-10} \leq I_p \leq 10^{-4}$ А;
- температура электронов $10^3 \leq T_e \leq 10^4$ К;
- температура ионов $5 \cdot 10^2 \leq T_i \leq 5 \cdot 10^3$ К;
- концентрация ионов и электронов $10^2 \leq N_{i,e} \leq 10^8$ см⁻³.

Массогабаритные характеристики детектора DE приведены в таблице 3.

Технические характеристики детектора DE приведены в таблице 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарев В.И., Тельцов М.В., Школьников С.И. Пространственное распределение и динамика продольных токов во время магнитных возмущений по наблюдениям на ИСЗ «Интеркосмос—Болгария—1300» // Космические исследования. — 1988. — Т. 26, № 4. — С. 604—613.

2. Николаева Н.С., Дубинин Э.М., Израйлевич П.Л., Подгорный И.М. Связь между электрическим полем и продольными потоками по данным спутника «Интеркосмос–Болгария–1300» // Космические исследования. — 1988. — Т. 26, № 3. — С. 463–467.
3. Курт В.Г., Зайдель Р.М. Геофизические исследования космологического происхождения космических гамма–всплесков // Космические исследования. — 1996. — Т. 34, № 4. — С. 400–406.
4. Горбехт М.Б., Лапшин М.Н., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Ионосферный отклик на подводные Курильские землетрясения по наблюдениям со спутников GPS // Исследования Земли из космоса. — 2011. — № 1. — С. 30–38.
5. Сказик А.И. Определение положения источника акустико–гравитационной волны, находящегося вблизи земной поверхности по данным спутниковых измерений электронной концентрации в ионосфере // Труды 23 Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». — Санкт-Петербург, 2005. — Вып. 5. — С. 455–459.
6. Фаткулин М.Н., Солодовников Г.К., Можаяев А.А., Мигулин В.В. Флуктуации амплитуды радиоволн в ионосфере, вызванные землетрясением в Спитаке. // Космические исследования. — 1998. — Т. 36, № 4. — С. 387–390.
7. Боярчук К.А., Ораевский В.Н., Пулинец С.А., Ружин Ю.Я., Хегай В.В. Система малых спутников для прогнозирования землетрясений // Космонавтика и ракетостроение. — 2002. — № 1 (26). — С. 50–59.
8. Кузнецов В.Д., Ораевский В.Н. «Полярно–эклиптический патруль» для исследования Солнца и контроля космической погоды // Космонавтика и ракетостроение. — 2002. — № 1 (26). — С. 50–59.
9. Jebreton J.P., Sverak S., Travnicek P., Maksimovic M., et al. The ISJ Langmuir probe experiment processing on board Demeter: Scientific objectives, description and first results. // Planetary and Space Science. — 2006. — № 54. — P. 472–486.
10. Шувалов В.А., Кочубей Г.С., Приймак А.И., Резниченко Н.П., Токмак Н.А., Лазученков Д.Н. Контактная диагностика высокоскоростных потоков разреженной плазмы // Теплофизика высоких температур. — 2005. — Т. 43, № 2. — С. 1–9.
11. Шувалов В.А., Письменный Н.И., Приймак А.И., Кочубей Г.С. Зондовая диагностика высокоскоростных потоков разреженной частично диссоциированной плазмы // Приборы и техника эксперимента. — 2007. — № 2. — С. 1–9.
12. Шувалов В.А., Корепанов В.Е., Лукенюк А.А., Токмак Н.А., Кочубей Г.С. Моделирование зондовых измерений параметров околоспутниковой плазмы на КА «Сич-2» // Космічна наука і технологія. — 2012. — Т. 18, № 6. — С. 5–13.
13. Шувалов В.А., Лукенюк А.А., Письменный Н.И., Кулагин С.Н. Зондовая диагностика околоспутниковой среды на КА «Сич-2» // Космічна наука і технологія. — 2013. — Т. 19, № 1. — С. 13–19.
14. Шувалов В.А., Письменный Н.И., Лазученков Д.Н., Кочубей Г.С. Зондовая диагностика потоков лабораторной и ионосферной разреженной плазмы // Приборы и техника эксперимента. — 2013 — № 3. — (в печати).

ДИАГНОСТИКА СПЕКТРА ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОЧАСТОТНОГО АНАЛИЗАТОРА RFA

Х. РОТКЕЛЬ, М. МОРАВСКИ, М. КШЕВСКИ, Г.В. ЛИЗУНОВ

Научные задачи

Ионосфера Земли привлекает внимание учёных не только в своём существенном качестве — как газоплазменная оболочка планеты, одна из геосфер, — но и как природная лаборатория, в которой реализуются труднодостижимые на Земле физические условия. Волновые процессы в ионосфере охватывают широчайший диапазон пространственных и временных масштабов: от сантиметров (дебаевский радиус ионосферной плазмы) до планетарных размеров, от долей герц (альфвеновские волны) до полутора десятка мегагерц (ленгмюровские колебания). Введение прибора RFA в состав научной аппаратуры, созданной для проекта «Ионосат-Микро», преследует целью измерение полного спектра ионосферных волн. Данные эксперимента предполагается использовать для изучения следующих явлений.

Турбулентность ионосферной плазмы

Элементарным процессом, лежащим в основе генерации плазменной турбулентности, является взаимодействие «волна — частица». Это взаимодействие создаёт канал обмена энергией и импульсом между электромагнитным полем и плазменной средой и перераспределяет энергию по ансамблю волн и частиц. Как показывает опыт, турбулентность присутствует в ионосфере всегда (обычно это слабая турбулентность, хотя документированы наблюдения локализованных зон сильной турбулентности, например, в дугах полярных сияний [1]). Турбулентность накладывает отпечаток на всю картину ионосферной динамики — спектральный состав радиоэмиссий, процессы переноса (диффузию, вязкость и теплопроводность, характеризуемых аномальными транспортными коэффициентами), нагрев и ускорение заряженных частиц и пр. [1].

Важной чертой ионосферных плазменных процессов является связь возмущений различных масштабов. Иногда наблюдаются очень сложные цепочки связанных событий. В качестве примера рассмотрим генезис одного из наиболее грандиозных геокосмических явлений — полярного сияния [2–6]. Согласно современным представлениям, источник авроральных процессов

находится в ночном секторе магнитосферы, где происходит возбуждение локальных, поперечных к магнитному полю Земли электрических токов. Их замыкание через магнитосопряжённую ионосферу порождает глобальную магнитосферно-ионосферную электрическую цепь, сила тока в которой достигает значительных величин (например, в электроструях сильных полярных сияний сила тока составляет 1...10 кА, а возмущение магнитного поля Земли 50...500 нТ). Под действием плазменных неустойчивостей в токнесущей магнитной силовой трубке развивается ионно-звуковая турбулентность, приводящая к генерации аномального сопротивления плазмы и/или двойных электрических слоёв [7, 8] (согласно другим гипотезам — инерционных альфвеновских волн [9, 10]). Эти процессы индуцируют продольное электрическое поле, под действием которого происходит ускорение части заряженных частиц до энергий 10...30 кэВ. Бомбардируя атмосферу энергичные магнитосферные частицы порождают полярное сияние, а в ионосферной плазме — плазменно-пучковую неустойчивость. В дугах сильных полярных сияний регистрируется генерация ленгмюровских колебаний и связанная с этим ВЧ турбулентность [1, 11].

На рис. 1 (см. на цветной вклейке) представлен пример регистрации на спутнике «Polar» структуры авроральных электрических токов, втекающих и вытекающих из ионосферы. С использованием модели магнитного поля Земли OVT-2 эта структура привязана к географическим и магнитным координатам. На рисунок нанесён синхронный снимок полярного сияния в ультрафиолетовом спектре, полученный на спутнике NOAA. Коллаж показывает взаимную обусловленность процессов — авроральной электроструи, полярного сияния и связующего их, вторгающегося вдоль магнитных силовых линий пучка электронов (Н.В. Хотяинцев, частное сообщение, 2002).

Радиогало ионосферы

Наблюдения широкополосных электромагнитных излучений на борту низкоорбитальных спутников «Интеркосмос-19», «Космос-1809», «Активный», АПЭКС, КОРОНАС-И свидетельствует об усилении волновой активности ионосферы над Европой и Азией [12, 13]. Характерный пример планетарного распределения волнового поля представлен на рис. 2 (см. на цветной вклейке). Над всей Евразией рост интенсивности радиоэмиссий достигает ~ 20 дБ.

Согласно [14], яркость радиогало ионосферы возрастает под действием сугубо техногенного эффекта — работы ширококвещательных радиостанций. Гипотетическая последовательность событий при этом следующая: сигналы земных радиостанций воздействуют на радиационные пояса Земли, вызывая ускорение и выведение в конус потерь энергичных электронов. Возникающие таким образом потоки высыпавшихся частиц вторгаются на ионосферные высотные уровни, где они испытывают рассеяние на турбулентных флуктуа-

циях плазмы и высвечивают широкополосное тормозное излучение, регистрируемое в космических экспериментах.

Физические процессы, связанные с грозовой активностью

Та же цепочка взаимодействий, что и в предыдущем пункте, но теперь на ионосферу воздействуют вистлерные волны, излучаемые молниевыми разрядами. Регистрация в проекте «Ионосат-Микро» ионосферных радиоэмиссий ОНЧ диапазона (вистлеры) и одновременно ВЧ диапазона (излучение при рассеянии выпадающих частиц радиационных поясов) позволит исследовать связь указанных процессов.

Глобальное распределение волнового поля в ионосфере

Провалы плотности плазмы, связанные с морфологической структурой ионосферы (такие как среднеширотный провал, плазменные «баблы» и т.д.) демонстрируют повышенную волновую активность. Иногда наблюдается чёткая локализация вкраплений плазменной турбулентности внутри плазменных неоднородностей (см. [14]). Для изучения этой связи в проекте «Ионосат-Микро» предлагается провести совместный анализ спектров ионосферных эмиссий (по данным измерений инструментом RFA) и распределения концентрации плазмы в ионосфере (по данным инструмента DE).

Анализатор спектра RFA

Радиочастотный анализатор RFA (Radio Frequency Analyzer) является прибором для измерения трех компонент электрического поля в частотном диапазоне 50,0 кГц–15 МГц. Прибор состоит из двух основных частей:

1. Радиоприемник и блок управления (RFA-E);
2. Трёхкомпонентная электрическая антенна (RFA-AE).

Модуль RFA-E расположен в приборном отсеке, как правило во внутренней части космического аппарата, тогда как антенна RFA-AE должна быть установлена снаружи на проводящей части корпуса спутника или на выносной штанге на некотором удалении от него. Основные характеристики RFA представлены в таблице 1.

RFA допускает два типа измерений. В первом случае прибором выдаются динамические Фурье-спектры составляющих электрического поля, а во втором — их волновые формы.

После включения, RFA автоматически выполняет внутренние процедуры тестирования и формирует первый служебный ТМ блок, после чего, также автоматически, начинается цикл измерений. Режим построения спектров (SPECTRUM) выполняется по умолчанию. Данные измерений (один спектральный набор за один цикл) сохраняются во внутренней памяти, компонуется в пакеты и затем передаются в систему телеметрии.



Возможны следующие режимы функционирования RFA:

1. OFF: питание прибора полностью выключено. После включения питания процессоры перезагружаются;
2. STANDBY: энергосберегающий режим — генерируются только служебные (НК, от HouseKeeping) пакеты и/или научные данные, которые передаются из буфера в систему телеметрии;
3. SPECTRUM: рабочий режим (по умолчанию).
4. WAVE: рабочий режим.
5. MONITORING: режим ограничения потока данных — только некоторые спектры или компрессированные данные.
6. CALIBRATION: режим внутренней калибровки датчиков.

Блок контроля RFA основан на 32-битном микропроцессоре, осуществляющем одновременно весь цикл управления прибором и обработки данных.

Таблица 1

Основные характеристики RFA

Параметры	Значения
<i>Основные</i>	
Масса, кг	1,1 ($\pm 0,2$)
Мощность, Вт	10,0 (+20 % / -30 %) — полное включение ~2,5 (+25 % / -50 %) — режим ожидания или дежурный режим (TM Dump)
Напряжение питания, В	28,0 (± 4)
Размеры, мм	190,0 $\times$ 160,0 $\times$ 92,0 (будут уточняться)
<i>Функциональные</i>	
Количество каналов	3
Диапазон частот	50,0 кГц—15,0 МГц
Спектральное разрешение	~1,0 кГц (в диапазоне 50—1000 кГц) ~20,0 кГц (в диапазоне 1,0—15,0 МГц)
Разрешение по времени	25,0 нс
Динамический диапазон	80,0 дБ — спектральный режим (будет уточняться) 65,0 дБ — волновой режим
<i>Рабочие</i>	
Дискретные команды	нет
Телеметрический (ТМ)/ тестовый (ТС) интерфейс	RS 422 (будет уточняться)
ТС поток	2—3 команды в течение одной сессии/орбиты
ТС длина пакета	16 байт (будет уточняться)
ТМ поток	~2—4 Кбайт/с
ТМ длина пакета	256 байт (будет уточняться)
Внутренний буфер памяти	2 Мбайт (минимум 10 мин непрерывных измерений)

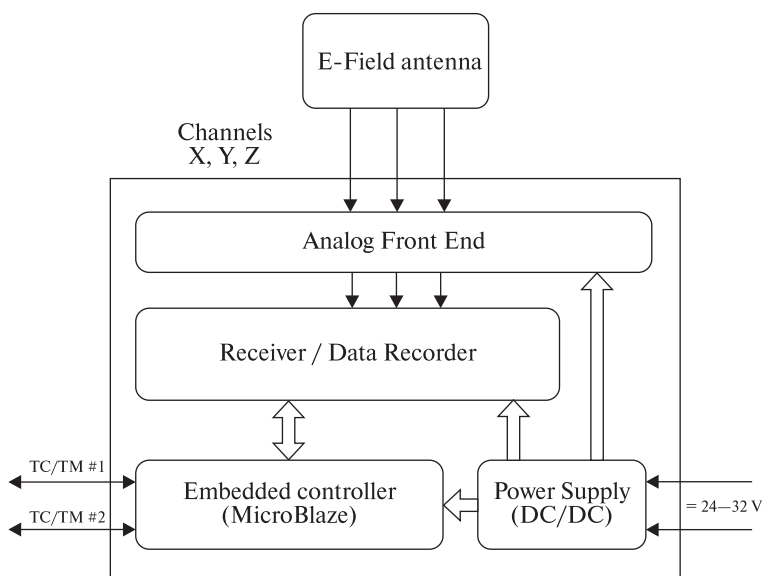


Рис. 3. Функциональная схема RFA

Внутреннее программное обеспечение служит для выполнения следующих операций:

1. Сбор данных — построение спектров измеренных составляющих электрического поля и накопление данных в буферной памяти;
2. Синхронизация процессов измерения и установка меток времени;
3. Форматирование и сжатие данных, сбор и хранение пакетов телеметрии во внутреннем ТМ-буфере;
4. Служебный (НК) мониторинг — сбор служебных данных (тестирование напряжения и температуры), подготовка пакетов служебной информации;
5. Управление телеметрией — отправка сформированных пакетов телеметрической информации в подсистему телеметрии;
6. Тестирование — получение пакетов командной телеметрии с проверкой на достоверность и последующим их выполнением или запретом на отсылку;
7. Контроль состояния прибора — контроль исполнения команд, изменяющих режимы работы прибора, а также контроль таблиц его состояния;
8. Управление энергопотреблением прибора.

Функциональная диаграмма RFA показана рис. 3. На рис. 4 (см. на цветной вкладке) представлена фотография блока RFA-E. Толщина стенок корпуса блока 1,5 мм.

Три дипольные антенны блока RFA-AE предназначены для детектирования электрического поля плазменных волн в радиочастотном диапазоне. Антенны соединены с низкошумящими предусилителями, служащими для согла-

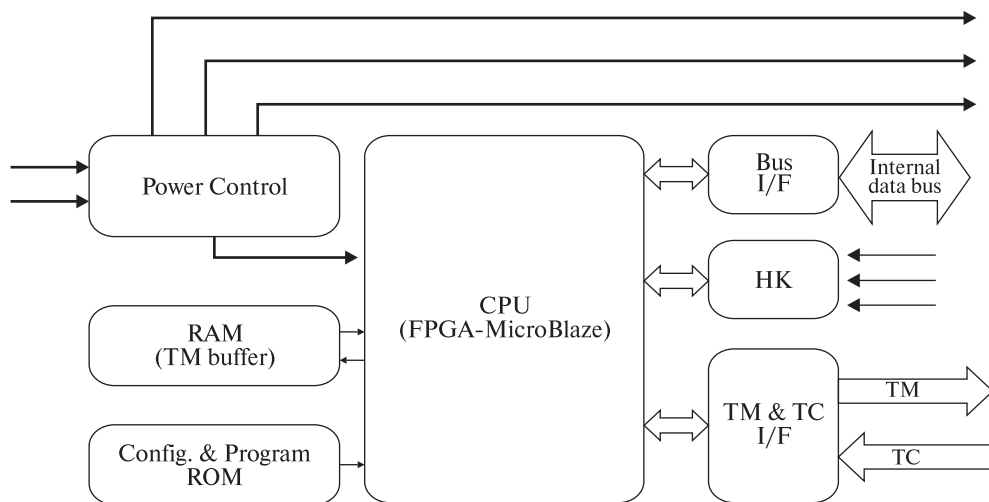


Рис. 6. Функциональная схема блока управления

сования переменного импеданса антенн в ионосферной плазме с импедансом соединительного кабеля ($Z = 50 \text{ Ом}$). Для получения относительно хорошего отношения сигнал/шум и предупреждения искажения сигнала коэффициент усиления выбран фиксированным ($\sim 10 \text{ дБ}$). Далее сигналы поступают на аналоговый внешний интерфейс, откуда после фильтрации (для избегания эффекта наложения спектров) передаются в модуль записи волновых данных WRC.

Антенны выполнены в виде бериллиево-бронзовых трубчатых конструкций длиной 1,5 м, диаметром 6 мм и толщиной 0,05 мм, которые разворачиваются в рабочее положение миниатюрным шаговым двигателем. Преимуществами такой конструкции являются ее малая масса (375 г вместе с предусилителями и двигателем) и компактность в сложенном состоянии (диаметр 200 мм, высота 90 мм). Фотография антенного блока представлена на рис. 4 (см. на цветной вкладке). В таблице 2 указана масса узлов RFA.

Блок управления RFA (рис. 6) обеспечивает трехканальное 12 битное аналого-цифровое преобразование сигналов. Каждый аналоговый канал включает в себя входной усилитель, служащий для разделения и симметрирования сигналов,

Таблица 2

Масса прибора и его основных узлов

Масса	Всего, г
Электронный блок (RFA-E)	1100,0 (± 200)
Блок антенн (RFA-AE)	200,0 (± 20)
Проводные соединения	100,0 (± 50)
Масса RFA	1400,0 (± 270)

а также сдвига уровня напряжений для согласования со входом АЦП. Данные в цифровой форме временно поступают во внутренний буфер. Затем они обрабатываются, анализируются и сжимаются в бортовом процессоре обработки сигналов. В зависимости от текущего режима работы и используемого алгоритма выходные данные могут быть в виде: исходных или сжатых волновых форм, наборов чисел (вычисленных волновых мод), полного спектра или сжатого набора спектральных мод. Сбор и преобразование данных контролируются аппаратной логикой, реализованной в FPGA (Field-Programmable Gate Array), в соответствии с предварительно запрограммированным режимом работы. Бортовая память может использоваться как кольцевой буфер или реализовать FIFO-алгоритм (принцип простой очередности) в зависимости от режима работы.

Преобразователь питания «постоянный ток — постоянный ток» (DC/DC) обеспечивает гальваническую развязку между первичной и вторичной линией электропитания, а также узлами аппаратуры. Любое постоянное напряжение на основной шине питания в диапазоне 24–32 В (в том числе короткое замыкание) не опасно для устройства.

Заключение

Целью космического эксперимента, предлагаемого в данной работе, является регистрации и изучение спектра ионосферных плазменных волн. Для этого в комплексе научной аппаратуры «Ионосат-Микро» служат инструменты:

1. Векторный магнитометр FGM с рабочим диапазоном 0–1 Гц, обеспечивающий прецизионное измерение магнитного поля. Эксперимент с измерением электрического поля в этой части спектра не производится. Тем не менее, использование только магнитометра для регистрации КНЧ плазменных процессов представляется оправданным, поскольку указанные процессы носят магнитогидродинамический характер;

2. Волновые зонды WP с рабочим диапазоном 0,1–20 кГц, которые вместе с электрическим зондом EP обеспечивают регистрацию всех компонент магнитного и электрического полей;

3. Радиочастотный анализатор RFA с рабочим диапазоном 50 кГц–15 МГц, предназначенный для ежесекундной регистрации спектра электрического поля. В этом диапазоне диагностика магнитных возмущений не производится, что соответствует представлению о преимущественно электростатическом характере турбулентности ионосферной плазмы в НЧ — ВЧ диапазоне;

4. Два зонда Ленгмюра DE для ежесекундного измерения концентрации и температуры фоновой плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мишин Е.В., Ружин Ю.Я., Телегин В.А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 264 с.

2. *Маров М.Я., Колесниченко А.В.* Введение в планетную астрономию. — М.: Наука, 1987. — 456 с.
3. *Lysak R.L., Dum C.T.* Dynamics of magnetosphere-ionosphere coupling including turbulent transport // *Journal of Geophysical Research*. — 1983. — V. 88. — P. 365.
4. *Borovsky J.E.* Auroral arc thicknesses as predicted by various theories // *Journal of Geophysical Research*. — 1993. — V. 98. — P. 6101.
5. *Lysak R.L.* Electrodynamic coupling of the magnetosphere and ionosphere // *Space Science Reviews*. — 1990. — V. 52. — P. 33.
6. *Knudsen D.J.* Structure, acceleration, and energy in auroral arcs and the role of Alfvén waves // *Space Science Reviews*. — 2001. — Vol. 95. — P. 501.
7. *Галеев А.А., Сагдеев Р.З.* Токовые неустойчивости и аномальное сопротивление плазмы // *Основы физики плазмы. Дополнение к т. 2* / Под ред. А.А. Галеева и Р. Судана. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — С. 5.
8. *Волокитин А.С., Красносельских В.В.* Двойные слои в плазме // *Исследования космического пространства. — Итоги науки и техники, ВИНТИ АН СССР*. — 1988. — Т. 28. — С. 129.
9. *Clark A.E., Seyler C.E.* Electron beam formation by small-scale oblique inertial Alfvén waves // *Journal of Geophysical Research*. — 1999. — V. 104. — P. 17233.
10. *Stasiewicz K., Bellan P., Chaston C., Kletzing C., Lysak R., Maggs J., Pokhotelov O., Seyler C., Shukla P., Stenflo L., Streltsov A., Wahlund J.-E.* Small scale Alfvénic structure in the aurora // *Space Science Reviews*. — 2000. — V. 92. — P. 423–533.
11. *Lizunov G., Khotyaintsev Yu., Stasiewicz K.* Parametric decay to lower hybrid waves as a source of modulated Langmuir waves in topside ionosphere // *Journal of Geophysical Research*. — 2001. — V. 106. — No A11. — P. 24755–24764.
12. *Parrot M.* World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite // *Annales Geophysicae*. — 1990. — V. 8. — P. 135–145.
13. *Rothkaehl H., Parrot M.* Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2005. — V. 67, Issue 8–9. — P. 821–828.
14. *Rothkaehl H., Klos Z.* Broadband HF emissions as an indicator of global changes within the ionosphere // *Adv. Space Res.* — 2003. — V. 31. — P. 5.
15. *Malingre M., Berthelier J.-J., Pfaff R., Jasperse J., and Parrot M.* Lightning-induced lower-hybrid turbulence and trapped Extremely Low Frequency (ELF) electromagnetic waves observed in deep equatorial plasma density depletions during intense magnetic storms // *Journal Geophys. Res.* — 2008. — V. 113. — A11320. — doi:10.1029/2008JA013463.

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ «МИКРОСАТ»

А.Л. МАКАРОВ, Ю.А. ШОВКОПЛЯС,
С.И. МОСКАЛЕВ, Д.А. ГАЛАБУРДА

Космический аппарат (КА) «Микросат» разрабатывается по заказу Государственного космического агентства Украины в рамках Общегосударственной целевой научно-технической космической программы Украины и предназначен для проведения:

- наблюдений динамических процессов в ионосфере Земли;
- технологических экспериментов в условиях космического пространства по отработке бортовых приборов и элементов перспективных КА.

Космический аппарат массой ~195 кг планируется запустить при первом пуске ракеты космического назначения «Циклон-4» с космодрома Алкантара (Бразилия) на околокруговую солнечно-синхронную орбиту со следующими номинальными параметрами:

- высота орбиты над поверхностью Земли на экваторе ~668 км;
- наклонение орбиты к плоскости экватора ~98,1 градуса;
- местное среднее солнечное время в нисходящем узле орбиты 10 часов 31 минута.

Период обращения КА по орбите составляет приблизительно 98 минут. Срок активного существования должен составить не менее трех лет.

КА состоит из полезной нагрузки (~75 кг) и космической платформы (~120 кг), создаваемой на основе платформы спутника Egyptosat-1 (запущен в 2007 г.) и КА «Січ-2» (запущен в 2011 г.).

В состав полезной нагрузки КА входят:

- комплекс научной аппаратуры «Ионосат-Микро»;
- малогабаритная астроизмерительная система МАИС-Б;
- бесплатформенный астроинерциальный блок БАИБ-02;
- бортовая аппаратура скоростной радиолинии X-диапазона (СРЛ-X);
- экспериментальная аммиачная двигательная установка (АДУ);
- экспериментальная батарея химическая (ЭБХ);
- экспериментальная батарея солнечная (ЭБС);
- экспериментальные панели (ЭП) с терморегулирующими покрытиями.

Комплекс научной аппаратуры «Ионосат-Микро» обеспечивает измерения параметров электрического и магнитного полей, нейтральных и заряженных частиц на ионосферном высотном уровне с целью изучения динамиче-



ских процессов в ионосфере и их связи с космическими и земными источниками энергоснабжения. В состав комплекса научной аппаратуры входят:

- магнитно-волновой комплекс MWC в составе:
- три волновых зонда WP1, WP2, WP3,
- электрический зонд EP,
- феррозондовый магнитометр постоянного поля FGM, включающий датчик DFGM и блок электроники BE FGM,
- блок электроники BE MWC;
- анализатор плотности частиц (АПЧ) в составе:
- датчик нейтральных частиц ионосферной плазмы DN,
- блок датчиков заряженных частиц ионосферной плазмы DE,
- блок электроники BE DN-DE;
- анализатор спектра электрического поля RFA в составе:
- блок электроники RFA-E,
- блок антенн RFA-AE,
- комплект кабелей RFA;
- GPS-ГЛОНАСС измеритель полного электронного содержания (ПЭС) в составе:
- приемник ПЭС,
- антенно-фидерное устройство ПЭС;
- система сбора научной информации (ССНИ);
- комплект кабелей.

Волновые зонды WP1, WP2, WP3, датчик DFGM, блок датчиков DE и блок антенн RFA-AE размещаются на четырех разворачиваемых штангах длиной ~2 м с целью минимизации влияния на эти приборы электромагнитных полей, создаваемых остальной аппаратурой КА.

Система сбора научной информации обеспечивает сбор, сохранение информации в накопителе объемом 100 Гбайт и передачу ее в радиолинию.

Натурные эксперименты с МАИС-Б, БАИБ-02, СРЛ-Х, АДУ, ЭБХ, ЭБС, ЭП на борту КА «Микросат» проводятся с целью подтверждения их работоспособности, надежности и срока эксплуатации в условиях воздействия факторов космического пространства.

Малогабаритная астроизмерительная система МАИС-Б обеспечивает непрерывное (в процессе сеансов измерений) определение ориентации КА относительно инерциальной (второй экваториальной) системы координат с точностью измерения угловых координат визирной оси не хуже 6° и вокруг визирной оси не хуже 45°.

Основными задачами натурального эксперимента с МАИС-Б являются:

- отработка ее взаимодействия с подсистемой определения и управления ориентацией КА и с прибором БАИБ-02 в условиях космического полета;
- уточнение программно-математической модели определения ориентации и усовершенствование алгоритмов обработки информации;

- исследование помех, возникающих в условиях орбитального полета, существенно влияющих на работу прибора и трудно воспроизводимых в земных условиях, отработка алгоритмов противодействия помехам;

- оценка вероятности опознавания звезд и точности определения ориентации.

Бесплатформенный астроинерциальный блок БАИБ-02 обеспечивает измерение проекций вектора абсолютной угловой скорости КА в диапазоне $\pm 10^\circ/\text{с}$ вокруг каждой из осей и вычисление кватерниона ориентации КА относительно инерциальной (второй экваториальной) системы координат с последующей коррекцией по информации МАИС-Б.

Прибор БАИБ-02 представляет собой моноблок, в состав которого входят блок чувствительных элементов на базе четырех волоконно-оптических гироскопов и блок электроники, включающий специализированный вычислитель, вторичные источники электропитания, блок коммутации первичного электропитания.

Погрешность определения проекций вектора абсолютной угловой скорости составляет не более $0,14^\circ/\text{ч}$. Скорость ухода кватерниона ориентации (без коррекции по информации МАИС-Б) составляет не более $0,24^\circ/\text{ч}$.

Бортовая аппаратура скоростной радиолинии X-диапазона (СРЛ-X) обеспечивает передачу на наземную станцию приема данных:

- информации полезной нагрузки КА, получаемой от системы сбора научной информации комплекса научной аппаратуры «Ионосат-Микро», с информационной скоростью 30,72 Мбит/с через слабонаправленное антенно-фидерное устройство (АФУ-С) с максимальным коэффициентом усиления 6 дБ;

- тестовой информации, формируемой самой СРЛ-X, с информационной скоростью 320 Мбит/с через направленное антенно-фидерное устройство (АФУ-Н) с максимальным коэффициентом усиления 23 дБ.

Экспериментальная аммиачная двигательная установка (АДУ) обеспечивает создание малой реактивной тяги вдоль направления полета КА (для разгона) или против направления его полета (для торможения) путем включений двигателей в одном из следующих режимов:

- «холодном» — при истечении из сопел двигателей паров аммиака;
- «горячем» — при истечении из сопел двигателей продуктов разложения аммиака.

В состав АДУ входят:

- двигатели разгона и торможения (2 шт.);
- пневмогидравлические узлы (баки, горловины заправочные, электроклапаны, парогенератор, ресивер, вентиль, штуцеры проверочные);
- трубопроводы;
- блок управления;
- функциональные и телеметрические датчики давления и температуры;
- кабели;
- элементы крепления.



Номинальная тяга двигателей АДУ в обоих режимах составляет 5 гс (0,049 Н). Удельный импульс тяги двигателей составляет:

- в «холодном» режиме — 90 с (882 м/с);
- в «горячем» режиме — 255 с (2500 м/с).

Экспериментальная батарея химическая (ЭБХ) обеспечивает отработку в условиях космического пространства и получение данных о характеристиках литий-ионных (Li-ion) аккумуляторов промышленного изготовления. В процессе орбитального полета при проведении экспериментов ЭБХ работает в буферном режиме со штатной химической батареей и солнечной батареей подсистемы электроснабжения и используется в качестве дополнительного вторичного источника питания бортовой аппаратуры.

ЭБХ на базе шестнадцати Li-ion цилиндрических аккумуляторов типа 18650, соединенных по топологии 8s2p, имеет следующие основные технические характеристики:

- выходное напряжение — от 24 до 34 В;
- номинальная емкость — $3,0 \text{ А} \cdot \text{ч}$;
- максимальная энергоемкость при токе разряда не более 2,0 А — не менее $80 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$;
- средний ток разряда — 2,5 А;
- максимальный ток разряда — 15 А (в течение не более трех минут);
- пиковый ток разряда (в течение не более трех секунд) — 18 А;
- коэффициент использования тока и энергетический коэффициент полезного действия — не менее 0,92 и 0,87 соответственно;

Экспериментальная батарея солнечная (ЭБС) обеспечивает отработку в условиях космического пространства и исследование электроэнергетических характеристик новых высокоэффективных арсенид-галлиевых фотопреобразователей (ФП) и фотоэлектрических модулей на их основе различной технологии изготовления и конструктивного исполнения, собранных современными методами на гибком лако-фольговом диэлектрике.

В состав ЭБС входят две панели (ПЭБС 1 и ПЭБС 2) прямоугольной формы с размерами $100 \times 300 \text{ мм}$ каждая и блок контроля (БК ЭБС).

ПЭБС 1 содержит два гибких модуля ФП (ПЭБС 1-1 и ПЭБС 1-2) и датчик температуры. Модуль ПЭБС 1-1 укомплектован десятью серийными однопереходными GaAs/Ge ФП типа SSJ с повышенной эффективностью и прямоугольными защитными диодами. Геометрические размеры ФП $20 \times 40 \text{ мм}$, КПД $\approx 21,5 \%$ для условий AM0 ($T = 25^\circ \text{C}$). Генерируемый ток модуля ПЭБС 1-1 при перпендикулярном освещении заатмосферным солнечным потоком — не менее 0,45 А при напряжении 4,4 В в точке, близкой к максимальной мощности. Модуль ПЭБС 1-2 укомплектован десятью серийными трехпереходными InGaP/GaAs/Ge ФП типа CTJ 25 с интегрированными защитными диодами. Геометрические размеры ФП $20 \times 40 \text{ мм}$, КПД $\approx 25 \%$ для условий AM0 ($T = 25^\circ \text{C}$). Генерируемый ток модуля ПЭБС 1-2 при перпендикулярном освещении

щении заатмосферным солнечным потоком — не менее 0,24 А при напряжении 10,5 В в точке, близкой к максимальной мощности.

ПЭБС 2 также содержит два модуля ФП (ПЭБС 2-1 и ПЭБС 2-2) и датчик температуры. Модуль ПЭБС 2-1 укомплектован десятью ФП, аналогичными используемым в модуле ПЭБС 1-2. Модуль ПЭБС 2-2 укомплектован десятью серийными трехпереходными InGaP/GaAs/Ge ФП типа СТJ 28 и треугольными внешними защитными диодами. Геометрические размеры ФП 20 × 40 мм со срезанным углом, КПД $\approx 27,5\%$ для условий АМ0 ($T = 25^\circ\text{C}$). Генерируемый ток модуля ПЭБС 2-2 при перпендикулярном освещении заатмосферным солнечным потоком — не менее 0,26 А при напряжении 11 В в точке, близкой к максимальной мощности.

Две экспериментальные панели (ЭП 1 и ЭП 2) с терморегулирующими покрытиями устанавливаются с целью исследования деградации покрытий при воздействии факторов космического пространства. На каждую сотовластовую панель, покрытую полиамидной пленкой, нанесены два типа термопокрытий: полиуретановое ПУ-1 (белое) и эпоксиполиуретановое ЭУ-1 (черное).

Панель ЭП1 устанавливается на плите основания (наверху КА), панель ЭП2 — на плите установочной (снизу КА). Под каждой панелью размещаются чехлы из десяти слоев экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ). В центре участков с термопокрытиями установлено по одному датчику температуры.

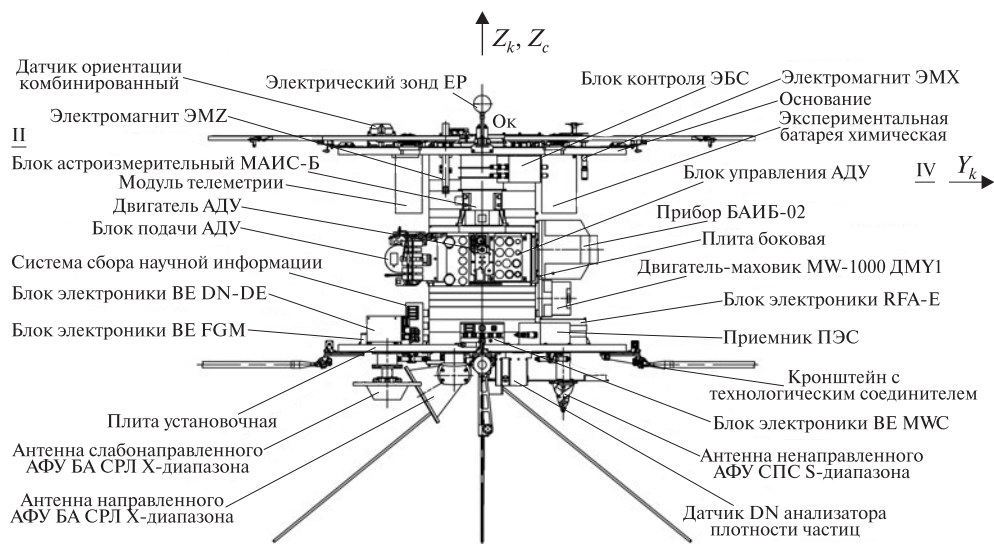
В состав космической платформы КА входят:

- связная подсистема S-диапазона (СПС-S);
- подсистема данных платформы (ПДП);
- подсистема определения и управления ориентацией (ПОУО);
- подсистема электроснабжения (ПСЭС);
- подсистема терморегулирования (ПСТР);
- датчик отделения (ДО);
- межсистемная кабельная сеть (МКС);
- конструкция.

Связная подсистема S-диапазона обеспечивает прием на борту КА команд управления и передачу с борта КА телеметрической информации о состоянии его подсистем.

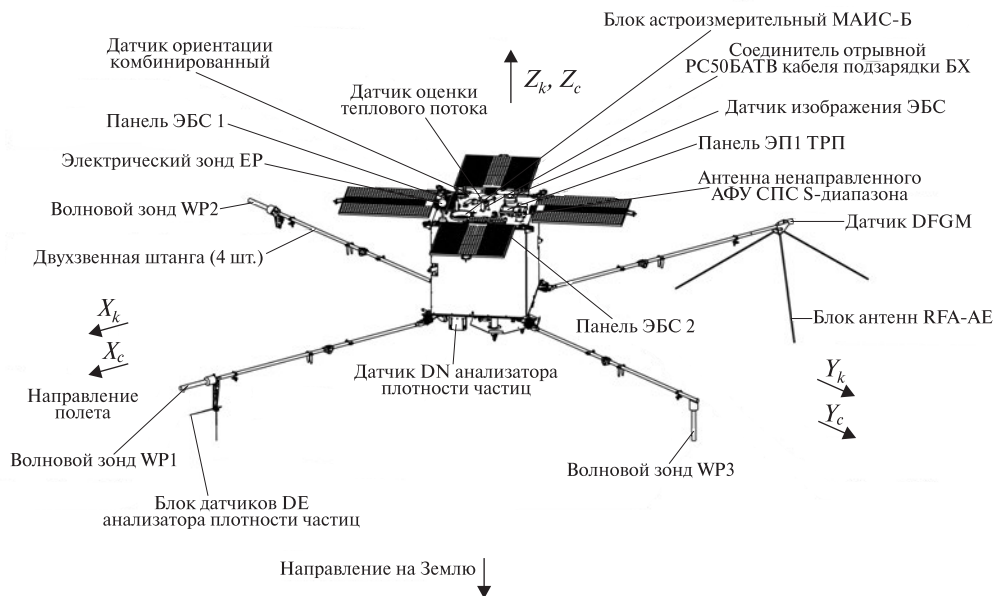
В состав подсистемы данных платформы входят бортовой цифровой вычислительный комплекс, обеспечивающий управление подсистемами КА, и модуль телеметрии, обеспечивающий сбор телеметрической информации от бортовых подсистем.

В состав подсистемы определения и управления ориентацией входят датчик ориентации комбинированный и магнитометр, обеспечивающие определение параметров ориентации КА, а также магнитные исполнительные органы и тангажный двигатель-маховик (2 шт.), обеспечивающие управление ориентацией КА. Подсистема определения и управления ориентацией обеспечивает трехосную ориентацию КА в орбитальной системе координат



Вид со стороны I полуплоскости

Рис. 1. Размещение аппаратуры внутри корпуса КА



Вид со стороны основания

Рис. 2. Общий вид КА в аксонометрии, вид сверху

(на Землю) с точностью не хуже 5 градусов при угловой скорости стабилизации не более $0,01^\circ/\text{с}$.

В состав подсистемы электроснабжения КА входят солнечная батарея на основе арсенид-галлиевых фотопреобразователей (четыре панели общей площадью $1,6 \text{ м}^2$), буферная химическая батарея, аппаратура управления, регулирования и контроля. В течение срока активного существования КА подсистема электроснабжения обеспечивает среднесуточную мощность не менее 70 Вт, максимальную мощность не менее 410 Вт в течение 15 минут на освещенной части витка орбиты. Для полезной нагрузки выделяется не менее 18 Вт среднесуточной и 200 Вт максимальной мощности.

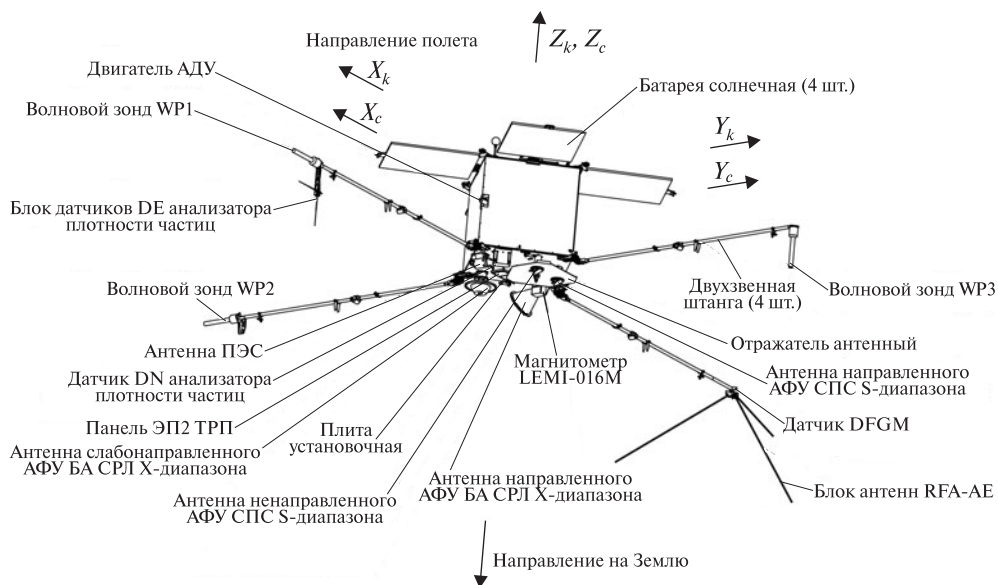
Подсистема терморегулирования КА обеспечивает поддержание температуры бортовых подсистем в заданных диапазонах. На КА применена подсистема терморегулирования пассивного типа. В ее состав входят тепловые экраны, терморегулирующие покрытия с заданными коэффициентами A_s (интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения) и ϵ (степень черноты, интегральный коэффициент излучения), чехлы из экранно-вакуумной теплоизоляции, тепловые изоляторы, датчики температуры.

Конструкция КА обеспечивает заданное относительное пространственное положение приборов бортовых подсистем. Пакет унифицированных рамочных модулей бортовой аппаратуры, блок АДУ, плита установочная и плита основания, совместно скрепленные шестью шпильками, образуют силовой корпус КА. Боковые грани корпуса закрыты четырьмя тепловыми экранами. Грани рамочных модулей развернуты относительно боковых граней плит на угол 45° . Внутри корпуса в четырех угловых зонах, ограниченных рамочными модулями, тепловыми экранами и плитами, располагаются приборы полезной нагрузки и подсистем платформы.

Общий вид КА «Микросат» и размещение приборов полезной нагрузки представлены на рис. 1–3.

Четыре панели солнечной батареи выполнены поворотными. В транспортном положении панели размещаются вдоль тепловых экранов корпуса КА фотопреобразователями наружу и прикреплены к плите основания с помощью механизмов поворота, устанавливающих панели в рабочее положение поворотом на 90° . Зачековка панелей солнечной батареи в транспортном положении обеспечивается с помощью пирочек, расположенных на плите установочной.

Для вынесения датчиков комплекса научной аппаратуры «Ионосат-Микро» на расстояние $\sim 2 \text{ м}$ от корпуса КА используются четыре разворачиваемые двухзвенные штанги, звенья которых (корневое и периферийное) выполнены в виде труб диаметром 22 мм с толщиной стенки 1 мм. Каждая штанга содержит корневой и промежуточный механизмы поворота, обеспечивающие разворот соответственно корневого звена на угол 90° и периферийного звена на угол 180° .



Вид со стороны плиты установочной

Рис. 3. Общий вид КА в аксонометрии, вид снизу

Включение КА осуществляется при его отделении от ракеты-носителя по сигналам двух командных датчиков отделения, установленных на плите основания. После отделения КА обеспечивает расчехровку и поворот панелей солнечной батареи и штанг, гашение полученных при отделении угловых скоростей и начальное построение трехосной ориентации в орбитальной системе координат.

В течение срока активного существования КА «Микросат» будет функционировать в соответствии с разработанной Программой научных исследований и технологических экспериментов.

В настоящее время идет сборка, интеграция и испытания КА. Запуск планируется осуществить в 2014 году.

Запуск КА «Микросат» позволит проводить долговременный пространственно-временной мониторинг основных параметров ионосферы Земли, результаты которого будут использованы для:

- развития фундаментальных научных представлений физики солнечно-земных связей;
- диагностики текущего состояния «космической погоды»;
- разработки методик диагностики природных и техногенных катастрофических явлений (в том числе прогнозирования сейсмической активности).

Технологические эксперименты на борту КА «Микросат» позволят испытать в условиях космического пространства впервые созданные отечественной

промышленностью приборы высокоточного определения ориентации космических аппаратов, высокоскоростную радиолинию, перспективную двигательную установку малой тяги, исследовать характеристики высокоэффективных литий-ионных аккумуляторов и арсенид-галлиевых фотопреобразователей, изучить поведение терморегулирующих покрытий. Результаты технологических экспериментов позволят повысить конкурентоспособность перспективных космических аппаратов украинской разработки.

КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «ИОНОСАТ-МИКРО»

А.А. ЛУКЕНЮК, В.Е. КОРЕПАНОВ, В.А. ШУВАЛОВ, С.Г. ШЕНДЕРУК

Назначение и состав приборного комплекса

Комплекс научной аппаратуры (КНА) «Ионосат-Микро» предназначен для проведения измерений на борту космического аппарата (КА) «Микросат» с целью получения информации о состоянии ионосферы при воздействии на нее солнечной и магнитной активности, а также метрологических, сейсмических и техногенных процессов. Кроме указанного выше, при создании КНА «Ионосат-Микро» решаются вопросы технологической отработки инструментария для космических исследований.

Блок — схема КНА «Ионосат-Микро» приведена на рисунке 1.

Как видно из рисунка, в состав КНА «Ионосат-Микро» входят:

- магнитно-волновой комплект MWC, который содержит три волновых зонда WP1, WP2 и WP3, феррозондовый магнитометр FGM и измеритель потенциала космического аппарата (электрический зонд) EP;
- анализатор плотности частиц АПЧ — прибор для определения концентрации заряженных (датчики DE1, DE2) и нейтральных (датчик DN) частиц космической плазмы;
- радиочастотный спектроанализатор RFA;
- прибор для определения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы;
- система сбора научной информации ССНИ.

Измеряемые приборами КНА «Ионосат-Микро» физические величины и технические характеристики приборов приведены в работе [1].

Для устранения влияния собственных электромагнитных полей КА на результаты измерений волновые зонды WP1, WP2, WP3, датчики DE1, DE2, DFGM и блок антенн RFA-AE будут размещены на штангах на расстоянии 2-х метров от платформы КА. Остальные приборы будут размещены на платформе. Электронные блоки ССНИ, MWC и АПЧ изготовлены в виде моноблоков. Конструкции их корпусов выполнены с учётом необходимости защиты электронных схем от ожидаемых доз радиации. На рисунке 2 (см. на цветной вкладке), приведены внешние виды центрального блока ССНИ и блока электроники АПЧ, а на рисунке 3 (см. на цветной вкладке) электронные платы центрального блока ССНИ.

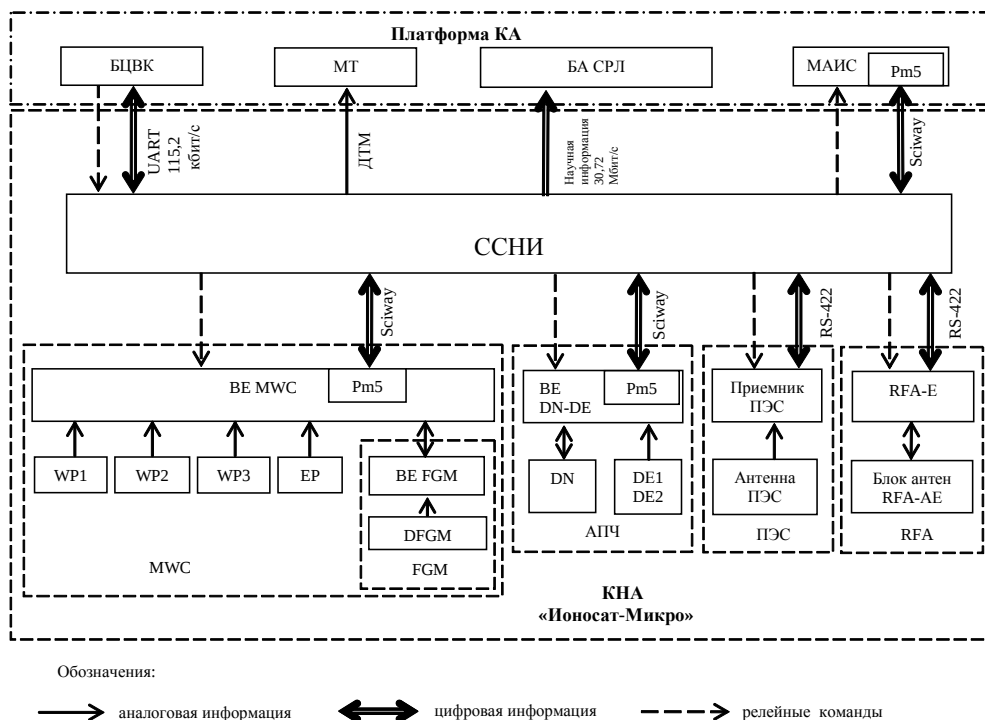


Рис. 1. Блок-схема КНА «Ионосат-Микро»

Ключевым устройством КНА «Ионосат-Микро» является ССНИ, которая обеспечивает:

- управление научными приборами, а также прием информации от научных приборов со скоростью 100 Мбит/с;
- прием массивов данных и команд, которые поступают от бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК);
- считывание и обработку информации в соответствии с принятыми командами или наперед заданными программами;
- накопление и сохранение накопленной информации;
- привязку научной информации к астрономическому времени, данным навигации, ориентации КА и других аннотационных данных;
- формирование и кодирование выходного потока цифровых данных для передачи их на наземные пункты приема информации;
- передачу данных в бортовую аппаратуру скоростной радиолинии X-диапазона (БА СРЛ) и БЦВК;
- выдачу данных датчиковой и цифровой телеметрии.

Учитывая то, что информационный обмен между КНА «Ионосат-Микро» и системами КА «Микросат» происходит через ССНИ, центральный блок и



периферийные процессорные микромодули ССНИ резервированы. Каждый из комплектов ССНИ имеет каналы связи с основными и резервными комплектами БЦВК и БА СРЛ.

Сброс информации в бортовую аппаратуру радиолинии X-диапазона осуществляется через каналы синхронной передачи данных, при этом как синхроимпульсы так и импульсы данных формируются ССНИ. Взаимодействие между ССНИ и БЦВК производится по последовательному асинхронному каналу передачи данных со скоростью 115,2 кбит/с.

Обмен информацией между центральным блоком ССНИ и приборами MWC, АПЧ и МАИС-Б производится по специально разработанному быстродействующему интерфейсу Sciway с Data-Strobe кодированием [2]. Для обеспечения взаимодействия указанных приборов с центральным блоком ССНИ по интерфейсу Sciway они содержат в своем составе периферийные процессорные микромодули Pm5. Микромодули Pm5 входят в состав ССНИ, содержат интерфейс Sciway и выполняют роль центральных процессорных модулей приборов [3, 4]. Информационная связь Pm5 с центральным блоком ССНИ обеспечивается специализированным контролером синхронных каналов ССНИ [5, 6].

Обмен информацией между центральным блоком ССНИ и приборами ПЭС и RFA осуществляется с использованием стандартных интерфейсов RS-422.

Данные датчиковой телеметрии поступают в модуль телеметрии (МТ) платформы КА через соответствующие сигнальные линии.

Наряду с данными научных измерений, ССНИ обеспечивает запись и передачу в БА СРЛ информацию об изображениях участков звездного неба, полученную малогабаритной астрономической измерительной системой (МАИС-Б), которая используется для определения ориентации КА.

Режимы работы КНА «Ионосат-Микро»

Для КНА «Ионосат-Микро» предусмотрены следующие режимы работы:

- медленный мониторинг;
- быстрый мониторинг;
- высокочастотные измерения;
- сброс информации КНА-X;
- сброс информации КНА-S;
- тестирование КНА «Ионосат-Микро»;
- тестирование радиолинии 30,72;
- запись информации МАИС-Б.

Работу КНА «Ионосат-Микро» в указанных выше режимах обеспечивает ССНИ. Установление режимов работы осуществляется по командам, которые поступают в ССНИ из БЦВК. В режимах «Медленный мониторинг», «Быстрый мониторинг» и «Высокочастотные измерения» предусмотрено считывание и накопление в памяти ССНИ информации о состоянии ионосферы с

частотой обновления 500 Гц, 30 кГц и 100 кГц, соответственно. Необходимо отметить, что в КНА «Ионосат-Микро» режимы работы для всех его составляющих могут устанавливаться индивидуально.

В режиме «Сброс информации КНА-Х» осуществляется передача информации из накопительной памяти ССНИ в бортовую аппаратуру скоростной радиолинии Х-диапазона (30,72 Мбит/с). Информация упаковывается в транспортные кадры в соответствии с рекомендациями стандарта CCSDS, при этом для повышения надежности передачи информации осуществляется ее скремблирование и RS-кодирование. Передача информации производится в сопровождении формируемой ССНИ тактовой частоты 30,72 МГц.

Режим «Сброс информации КНА-S» предназначен для передачи информации из накопителя ССНИ в БЦВК с целью её дальнейшего сброса на Землю по командной радиолинии СПС S-диапазона (32 кбит/с). Информация передается в БЦВК согласно формату протокола YSSP в виде выходных пакетов, сформированных в соответствии с рекомендациями стандарта CCSDS. В этом режиме предусматривается передача отчетов, формируемых ССНИ, в том числе списков файлов, содержащихся в накопителе ССНИ. Кроме того, данный канал связи является резервным для передачи низкочастотной научной информации, если сброс данных через скоростную радиолинию будет невозможным.

Для проверки работоспособности КНА «Ионосат-Микро» и скоростной радиолинии предусмотрены соответствующие режимы работы «Тестирование КНА «Ионосат-Микро» и «Тестирование радиолинии 30,72». В режиме «Тестирование КНА «Ионосат-Микро» будет производиться диагностика научных приборов и ССНИ. Для тестирования скоростной радиолинии ССНИ формирует тестовую информацию и передает её в аппаратуру радиолинии. Для текущего контроля работоспособности аппаратуры на протяжении сеанса работы КНА «Ионосат-Микро» ССНИ формирует и передает в БЦВК с интервалом 30 с пакеты цифровой телеметрии. Кроме этого, сигналы датчиковой телеметрии КНА «Ионосат-Микро», при помощи которых ведется постоянный контроль наиболее критичных параметров, передаются в модуль телеметрии (МТ) КА.

В режиме «Запись информации МАИС-Б» ССНИ принимает и сохраняет в накопительной памяти массивы данных изображений видимых участков звездного неба для последующей передачи их в составе информации КНА «Ионосат-Микро» в бортовую аппаратуру радиолинии.

С целью повышения эффективности работы КНА «Ионосат-Микро» предусмотрена его работа в совмещенных режимах:

- режимы «Медленный мониторинг» или «Быстрый мониторинг» могут реализовываться совместно с одним из режимов «Сброс информации КНА-Х» или «Сброс информации КНА-S»;
- режимы «Медленный мониторинг» или «Быстрый мониторинг» — совместно с режимом «Запись информации МАИС-Б»;



- режим «Запись информации МАИС-Б» — совместно с режимом «Сброс информации КНА-Х» или «Сброс информации КНА-S»;
- режимы «Медленный мониторинг» или «Быстрый мониторинг» — совместно с режимом «Тестирование радиолинии 30,72»;
- режим «Тестирование радиолинии 30,72» — совместно с режимом «Сброс информации КНА-S»;
- режим «Запись информации МАИС-Б» — совместно с режимом «Тестирование радиолинии 30,72»;
- режим «Сброс информации КНА-Х» — совместно с режимом «Сброс информации КНА-S»;
- режимы «Медленный мониторинг» или «Быстрый мониторинг» — совместно с режимом «Запись информации МАИС-Б» и одним из режимов «Сброс информации КНА-Х» или «Сброс информации КНА-S».

В КНА «Ионосат-Микро» реализована файловая система накопления данных. Из совокупности данных, поступающих с приборов, формируются отдельные файлы данных, привязанные к своим источникам. Файлы сохраняются в накопителе ССНИ и образуют очередь для передачи их на Землю. После передачи файлы удаляются из очереди, но сохраняются в накопителе ССНИ и при необходимости могут быть переданы повторно. Для повторной передачи, выбор файлов осуществляется путем передачи в ССНИ массива информации, в котором содержатся имена необходимых файлов. После соответствующей обработки массива, файлы выставляются в очередь для повторной передачи на Землю.

Кроме файлов данных, в ССНИ формируются файлы с отчетами о результатах выполненных процедур, которые также образуют системную очередь для передачи. К таким процедурам могут принадлежать составление списков файлов, которые содержатся в накопителе ССНИ, а также файлов, которые находятся в очереди передачи данных по системной очереди. Файлы из системной очереди имеют приоритет при передаче на Землю.

КНА «Ионосат-Микро» автономно от служебных подсистем КА ведет шкалу времени, которая используется для привязки результатов измерений ко времени их проведения. Синхронизация шкалы времени КНА «Ионосат-Микро» осуществляется сигнальными метками времени, которые поступают от прибора ПЭС. Дополнительно, как резервный вариант, синхронизация шкалы времени КНА «Ионосат-Микро» будет осуществляться путем подачи от БЦВК через одну секунду после поступления пакета проверки сети и далее через каждые 60 с пакетов с кодом бортовой шкалы времени и пакетов с началом секундного отчета.

Для обеспечения наземной обработки научной информации, из БЦВК в ССНИ каждую секунду передается необходимая аннотационная информация, содержащая координаты центра масс и проекции вектора скорости КА по осям X, Y и Z в Гринвичской системе координат, элементы кватерниона ориентации КА в орбитальной системе координат, значения абсолютной/относи-

тельной угловой скорости КА в каналах крена, тангажа, рыскания, проекции вектора магнитного поля Земли на оси крена, тангажа, рыскания связанной системы координат, бортовую шкалу времени, время выдачи аннотационной информации от начала секундного отсчета, первичные данные измерений параметров магнитного поля Земли магнитометром системы управления ориентацией спутника, а также информацию о режимах включенной аппаратуры КА. Аннотационная информация будет привязываться к данным измерений при формировании файловой системы накопления данных.

Для контроля работы КНА «Ионосат-Микро» на протяжении сеанса работы формируются и передаются в БЦВК с интервалом в 30 с пакеты цифровой телеметрической информации.

Управление КНА «Ионосат-Микро»

Циклограмма работы КНА «Ионосат-Микро» предусматривает подачу питания в ССНИ, настройку ССНИ на работу в требуемом режиме, включение необходимого состава научных приборов, установление режимов работы для научных приборов, снятие питания с ССНИ. На все составляющие КНА «Ионосат-Микро» от бортовой сети постоянного тока КА подается напряжение 24...34 В. Подача питания в ССНИ, которая выполняется при поступлении от модуля команд КА релейных команд «Включение питания основного комплекта ССНИ КНА «Ионосат-Микро» или «Включение питания резервного комплекта ССНИ КНА «Ионосат-Микро» определяет начало работы КНА «Ионосат-Микро».

По интерфейсным командам, которые поступают от БЦВК в ССНИ, последняя осуществляет управление научными приборами. Управление научными приборами со стороны ССНИ выполнено таким образом, что состав приборов и их режимы могут устанавливаться индивидуально для каждого из запланированных экспериментов. Для включения или отключения научных приборов в ССНИ подаются интерфейсные команды «Включение приборов КНА «Ионосат-Микро» и «Отключение приборов КНА «Ионосат-Микро», соответственно. Состав приборов, к которым относятся указанные команды, определяется соответствующим кодированием аргументных частей этих команд и каждый раз может быть иным. После включения научных приборов с БЦВК в ССНИ подаются интерфейсные команды: «Задание настройки комплекса МВС», «Задание настройки АПЧ», «Задание настройки измерения ПЭС», «Задание настройки анализатора RFA». По этим командам с соответствующими кодами их аргументных частей ССНИ устанавливает режимы и профили измерений индивидуально для каждого из включенных приборов. Начало сеансов измерений в установленных режимах и запись данных измерений в накопитель ССНИ наступает после подачи в ССНИ интерфейсной команды «Начало измерений КНА «Ионосат-Микро». Для начала режимов тестирования КНА «Ионосат-Микро»



или тестирования радиолинии 30,72 выдается одна интерфейсная команда «Тестирование КНА «Ионосат-Микро» или СРЛ 30,72». Выбор объекта тестирования определяется кодом аргументной части команды. Для окончания режимов измерений и тестирования также используется только одна команда «Окончание измерений и тестирования КНА или СРЛ 30,72» с соответствующими кодами аргументной части команды.

Режим сброса информации КНА-Х начинается подачей интерфейсной команды «Передача информации КНА «Ионосат-Микро» в БА СРЛ» и заканчивается подачей интерфейсной команды «Окончание передачи информации КНА «Ионосат-Микро». Перед началом работы КНА «Ионосат-Микро» в режиме сброса информации КНА-S, который выполняется при непосредственной передаче, необходимо подать интерфейсную команду «Задание установок КНА «Ионосат-Микро»» с соответствующим кодированием. После подачи этой команды ССНИ проводит подготовку к сбросу информации через СПС-S, при этом выполняются операции направленные на уменьшение объемов информации, которую необходимо передать. Это могут быть операции прореживания информации, формирование файлов меньших размеров и др.

Для начала работы КНА «Ионосат-Микро» в режиме сброс информации КНА-S через командную радиолинию, подается интерфейсная команда «Передача информации КНА «Ионосат-Микро» в БЦВК». Для окончания сброса информации подается команда «Окончание передачи информации КНА «Ионосат-Микро». Поскольку режимы «Сброс информации КНА-Х» и «Сброс информации КНА-S» могут выполняться одновременно, то окончание данных режимов определяется кодами аргументной части команды «Окончание передачи информации КНА «Ионосат-Микро»».

Для начала режима записи информации МАИС-Б используется интерфейсная команда «Запись информации МАИС-Б». В этом режиме ССНИ осуществляет прием информации об изображениях участков звездного неба от МАИС-Б. Заканчивается режим при подаче интерфейсной команды «Окончание записи информации МАИС-Б».

Через 35 секунд после отключения питания от приборов КНА «Ионосат-Микро» подается релейная команда «Отключение питания КНА «Ионосат-Микро»». Эта команда поступает непосредственно на ССНИ и на каждый прибор КНА «Ионосат-Микро» и может использоваться в качестве аварийной команды. Однако перед выдачей этой команды следует подать интерфейсную команду «Подготовка к отключению КНА «Ионосат-Микро»» для завершения всех процессов в КНА «Ионосат-Микро».

Для задания дополнительных установок в КНА «Ионосат-Микро» (в частности, при работе с накопителем) используется интерфейсная команда «Задание установок КНА «Ионосат-Микро»», содержащая соответствующую кодировку аргументной части. Этой командой осуществляется запись массива информации в ССНИ, в котором может содержаться информация о необхо-

димости повторения сброса определенных файлов, данные для корректирования программного обеспечения КНА «Ионосат-Микро» или новая версия программного обеспечения КНА «Ионосат-Микро». Запись массивов информации в ССНИ производится через аппаратуру S-диапазона.

Порядок записи массива информации в ССНИ осуществляется следующим образом:

- подается команда «Задание установок КНА «Ионосат-Микро»» с соответствующей кодировкой аргументной части на очищение входного каталога;
- в зависимости от объемов информация передается за один или несколько сеансов;
- после передачи всего объема данных подается команда «Задание установок КНА «Ионосат-Микро»» с кодировкой аргументной части на обработку данных;
- после окончания обработки данных ССНИ передает в БЦВК результаты обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лизунов Г.В., Лукенюк А.А., Макаров А.Л., Фёдоров О.П. Космический проект Ионосат-Микро: цели и методы // Космический проект «Ионосат-Микро». — К. : Академперіодика, 2013. — С. 11—25.
2. Space engineering. Space Wire-Links, nodes, routers and networks. ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands. 24 January 2003. ECSS—E—50—12A. ESA Publications Division. ESTEC. Copyright 2003 E by the European Space Agency for the members of ECSS.
3. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Унифицированный интерфейс бортовых систем КА // Космический проект «Ионосат-Микро». — К. : Академперіодика, 2013. — С. 127—133.
4. Воськало В.І., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Уніфікація інтерфейсів космічної апаратури з використанням технології LVDS // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» № 546, «Комп'ютерні системи та мережі». — Львів, 2005.
5. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Спеціалізований контролер для збирання наукової інформації супутника «СІЧ-2», Вісник Національного університету «Львівська політехніка» № 717, «Комп'ютерні системи та мережі». — Львів, 2011.
6. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Використання технології фазування даних в інтерфейсі системи збору наукової інформації космічних апаратів // Науково-технічний журнал «Радіоелектронні і комп'ютерні системи» № 7. — Х.: «ХАІ», 2012.

УНИФИЦИРОВАННЫЙ ИНТЕРФЕЙС БОРТОВЫХ СИСТЕМ КА

В.С. ГЛУХОВ, А.А. ЛУКЕНЮК, С.Г. ШЕНДЕРУК

При создании перспективных информационных систем космических аппаратов (КА) предъявляются все более высокие требования к скоростям обмена и объемам передаваемых данных. Для обработки больших объемов данных возникает необходимость использовать распределенные архитектуры на основе технологий локальных сетей. Ключевыми элементами таких систем являются интерфейсы.

Высокоскоростные интерфейсы обычно являются двухточечными (usb, ethernet, spacewire). При построении сетей с использованием таких интерфейсов необходимо использование концентраторов, которые становятся критическими узлами с точки зрения надежности системы в целом. Для соединения двух подсистем с резервированием требуется полновязанная структура, которая увеличивает количество кабелей и вряд ли применима, если системы имеют более двух резервных комплектов.

Применение многоточечных интерфейсов и шинной топологии позволяет создавать отказоустойчивые системы с минимальным числом межблочных соединений, но существующие решения с асинхронной передачей данных (RS-485, CAN) являются относительно низкоскоростными.

В ЛЦ ИКИ разработан унифицированный высокоскоростной интерфейс для распределенных бортовых систем сбора данных и управления КА. Интерфейс получил название Sciway (читается как «сайвэй»; sci — сокращение от Science). Далее по тексту будет использоваться название Sciway.

В основу интерфейса положены следующие основные принципы:

- высокоскоростной многоточечный стандарт передачи сигналов, что дает возможность объединять устройства с разной степенью резервирования по шинной топологии;
- комбинация в одном интерфейсе относительно низкоскоростного асинхронного канала для решения задач управления и телеметрии, и отдельного высокоскоростного синхронного канала для передачи больших объемов данных;
- масштабируемость — в минимальной конфигурации используется только асинхронный канал, в базовой конфигурации добавляется одноканальный синхронный скоростной канал, в расширенных вариантах увеличивается раз-

рядность синхронного канала; при этом асинхронный канал управления остается одинаковым для всех конфигураций и режимов работы;

- обеспечение отказоустойчивости интерфейса на физическом и протокольном уровнях; поддержка построения систем с многократным резервированием;
- подача питания через кабель интерфейса от центрального блока на периферийные модули распределенной системы, что упрощает гальваническую развязку подключаемых устройств.

Для передачи сигналов в интерфейсе Sciway используется стандарт M-LVDS (EIA/TIA-899) — многоточечная передача дифференциальных сигналов с малыми напряжениями (Multipoint Low Voltage Differential Signaling). Этот стандарт позволяет объединять на шине до 32-х устройств и достигать высоких скоростей передачи при небольших энергетических затратах. Максимальная скорость по стандарту до 500 МБайт/с, при существующей на сегодняшний день элементной базе — 250 Mbps. Способ передачи сигналов — токовый ($\pm 11,3$ мА), типовое выходное напряжение передатчика — 565 мВ.

Приемопередатчики M-LVDS имеют контролируемую скорость нарастания фронтов, что повышает качество передачи сигналов, а также обеспечивают высокоимпедансное состояние своих выходов при отключенном питании. Последнее позволяет упростить построение интерфейсов между системами с холодным резервированием.

Для передачи сигналов M-LVDS используются экранированные витые пары с дифференциальным волновым сопротивлением 100 Ом. На концах линии передачи (рис. 1) устанавливаются согласующие терминаторы — резисторы номиналом 100 Ом.

В асинхронном канале управления интерфейса Sciway используется протокол CAN (Control Area Network). В CAN применяется ориентированный на сообщения принцип передачи данных. Сообщения передаются в виде коротких кадров (0...8 байт) с уникальным идентификатором и принимаются одновременно всеми узлами. Идентификатор сообщения определяет также его приоритет. В CAN протоколе реализуется побитный неразрушающий арбитраж. Гарантируется, что сообщение с большим приоритетом будет передано в первую очередь.

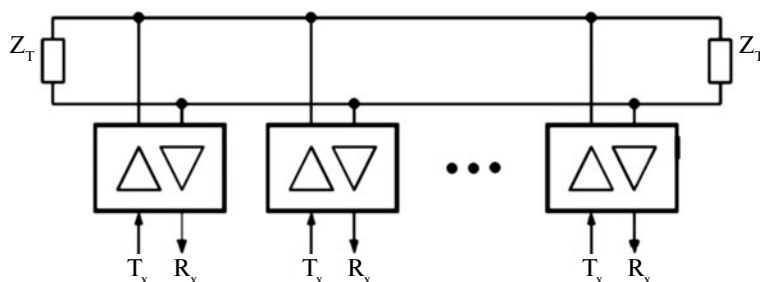


Рис. 1. Линия передачи M-LVDS

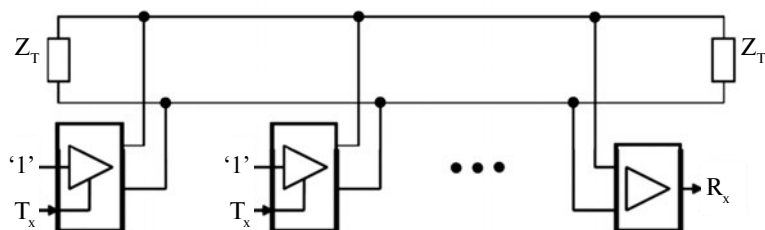


Рис. 2. Включение драйверов M-LVDS по схеме с рецессивным состоянием

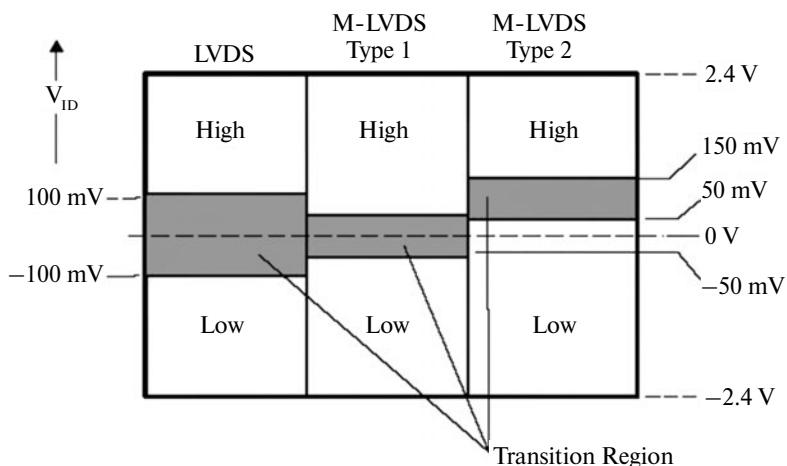


Рис. 3. Пороги переключения приемников LVDS и M-LVDS

Для обеспечения высокой надежности передачи данных по сети в CAN реализованы механизмы выявления и сигнализации ошибок, а также механизм локализации и отключения отказавшего или ненадежно работающего узла. Благодаря этим механизмам вероятность пропуска ошибки очень мала: $4.7e-11$ [темп возникновения ошибок]. Другими словами, например, при скорости передачи 500 кбит/с, 25 % загрузке шины и использовании в течении 2000 часов в год одна невыявленная ошибка может возникнуть только раз в 1000 лет. Более детально CAN протокол описан в [1, 2].

Для функционирования CAN протокола необходимо чтобы среда передачи сигнала имела два состояния — доминантное и рецессивное. В рецессивное состояние линия переходит тогда, когда все передатчики выдают рецессивный уровень сигнала. Если хотя бы один передатчик выдает доминантный уровень сигнала, линия переходит в доминантное состояние. Стандарт CAN определяет свой физический уровень передачи сигналов, однако в интерфейсе Sciway для всех сигналов используется единый метод передачи M-LVDS. Обычное включение драйверов M-LVDS не обеспечивает рецессивное состояние в линии. Поэ-

тому для сигналов асинхронного канала интерфейса Sciway используется включение драйверов M-LVDS по схеме «проводное ИЛИ» (рис. 2).

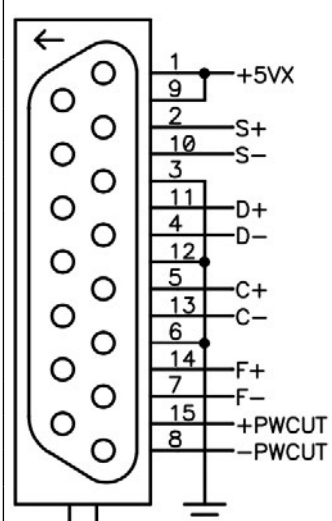
Вход передатчиков жестко привязан к логической '1', а передаваемые данные поступают на вход управления драйвера ('1' включает передатчик, '0' — отключает). При таком включении доминантным состоянием является наличие тока в линии (на выходе приемника — '1'), а рецессивным — отсутствие тока. Для того чтобы на выходе приемника при рецессивном состоянии линии был логический '0', приемник должен быть типа 2. Стандарт M-LVDS определяет два типа приемников — Type-1 с порогом переключения 0V и Type-2 со смещенным на +100mV порогом переключения (рис. 3).

Для передачи больших объемов данных на высоких скоростях в базовом варианте интерфейса Sciway к асинхронному каналу управления добавляется одноканальный синхронный полудуплексный канал передачи с тактированием от источника. Для реализации этого канала используются две сигнальные линии — Data и Strobe. При этом используется такой же метод DS-кодирования, как и в интерфейсах Spacewire, IEEE 1355, IEEE 1394 (Firewire) [3]. В такой схеме кодирования данные передаются без изменения, а сигнал стробирования меняет свое состояние только, если сигнал данных не изменяется при переходе от одного бита к другому (рис. 4).

На приемной стороне исходный сигнал тактирования восстанавливается путем логической операции XOR сигналов Data и Strobe. Такая схема кодирования

Таблица 1

Разъем интерфейса Sciway

	№	Сигнал	Функция
	1	+5VX	Питание +5В; подается от центрального блока в периферийные модули
	2	S+	Strobe: линия тактирования синхронного канала
	3	S-	Общий провод (сигнальная «земля»)
	4	D+	Data: линия данных синхронного канала
	5	D-	Общий провод (сигнальная «земля»)
	6	C+	Control: канал управления — передача/прием по CAN протоколу
	7	C-	Общий провод (сигнальная «земля»)
	8	F+	Func: многофункциональный сигнал — резервный, управление потоком, метка времени
	9	F-	Аварийный сигнал отключения питания: импульс релейной команды +27V, -27V
	10	+PWCUT	
	11	-PWCUT	

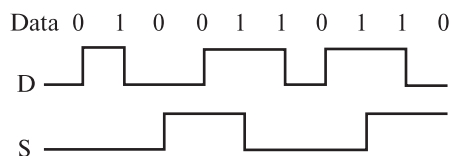


Рис. 4. Data-Strobe (DS) кодирование

выбрана потому, что обеспечивает большой запас по джиттеру (почти целый битовый интервал) по сравнению с простым тактированием (0.5 битового интервала).

Скорость передачи по синхронному каналу не фиксирована. Устройства могут выдавать данные с разными скоростями. Узел, принимающий данные должен обеспечивать прием на любой скорости вплоть до максимальной. Максимальная скорость синхронного канала интерфейса Sciway определяется существующей элементной базой и составляет 250 Mbps без гальванической развязки и 150 Mbps с гальванической развязкой. Особенности контролеров синхронных каналов, которые реализуют фрагменты интерфейса Sciway, приведены в работе [4].

Информация по синхронному каналу интерфейса передается в виде пакетов в формате исходного пакета (source packet) CCSDS.

В интерфейсе Sciway используется 15-контактный разъем типа MIL-DTL-83513 / Micro-D. На блоках устанавливается вилка (pin, plug), а розетка (socket, receptacle) является кабельной частью соединения. В табл. 1 показано распределение сигналов в разъеме и их функциональное назначение.

В интерфейсе предусмотрена шина питания +5V, по которой центральный блок распределенной системы может обеспечить частичное или полное питание периферийных модулей, что упрощает гальваническую развязку подключаемых устройств, а также дает возможность через интерфейс управлять включением/выключением приборов и получать датчиковую телеметрию.

Линия передачи сигнала F+, F- является резервной и в зависимости от режимов работы интерфейса может использоваться для выполнения различных функций. После включения питания проводится фаза диагностики состояния интерфейса, и при этом линия F+, F- дублирует сигнал канала управления C+, C-. Если в процессе диагностики не будет выявлено неисправностей, то в дальнейшем линия F+, F- может использоваться для аппаратного управления потоком синхронного канала или для передачи в периферийные узлы меток времени.

Для передачи сигналов M-LVDS используются изолированные экранированные витые пары с дифференциальным волновым сопротивлением 100 Ом. Кабель имеет общий экран, соединенный с корпусами разъемов. Внутренние экраны витых пар заземляются на одном конце кабеля.

Пакетирование сообщений CAN

Данные по CAN протоколу передаются в виде сообщений. Каждое сообщение имеет уникальный идентификатор, и может содержать до 8 байт полезных данных. Если объем одной порции информации превышает 8 байт, то для



Рис. 5. Пакетная передача данных по CAN каналу

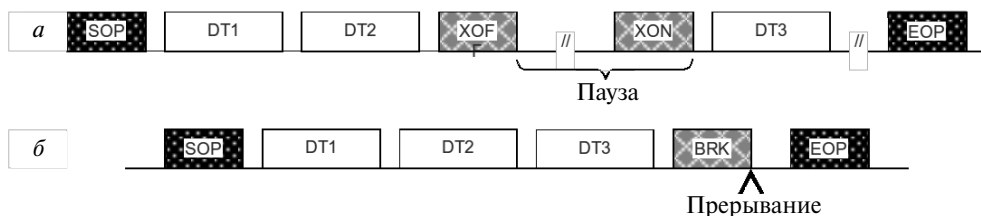


Рис. 6. Управление потоком данных по CAN каналу

ее передачи формируется пакет из необходимого количества 8-байтных фреймов данных и дополнительных служебных фреймов (рис. 5).

Пакет начинается со служебного сообщения начала пакета «Start Of Packet (SOP)» после которого идут фреймы данных DT1...DTn и заканчивается пакет служебным сообщением конца пакета «End Of Packet (EOP)». В фрейме начала пакета SOP задается длина блока полезных данных. Все фреймы данных имеют фиксированный размер 8 байт и передаются с одним идентификатором. Для передачи служебных сообщений используют другой более приоритетный идентификатор. Таким образом, создаются два виртуальных канала передачи — один для данных, другой — служебный.

При передаче блока данных принимающий узел может управлять потоком данных — приостанавливать (рис. 6, а) или прерывать (рис. 6, б) передачу.

Для приостановки приема пакета приемник формирует служебное сообщение приостановки обмена «eXchange Off (XOFF)», а для возобновления передачи — сообщение восстановления обмена «eXchange On (XON)». Для отказа от приема пакета приемник формирует служебное сообщение прерывания обмена «Break (BRK)». Узел, который передает пакет, должен принимать служебные сообщения от приемника пакета и соответствующим образом реагировать на них.

Синхронизация времени

Для синхронизации событий в распределенной системе построенной с использованием интерфейса Sciway предусмотрена возможность синхронизации локальных устройств отсчета времени с эталонным, глобальным для сети временем.

Информация о системном времени передается периодически от его источника в виде специального высокоприоритетного CAN-сообщения «TIME». Приборы, которым необходима синхронизация, принимают это сообщение и

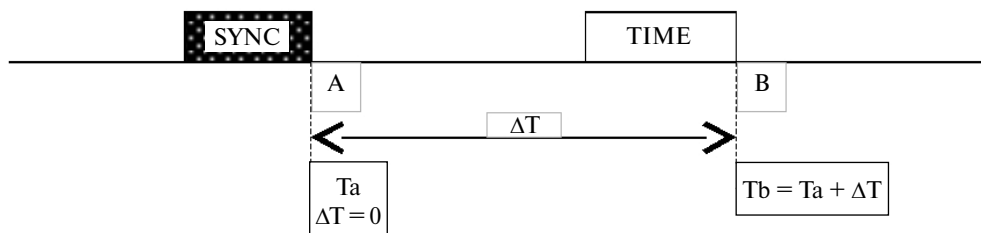


Рис. 7. Процедура синхронизации времени

соответствующим образом подстраивают свои локальные часы. Хотя сообщение о времени имеет высокий приоритет, его передача может быть задержана, если по шине в это время происходит передача другого сообщения. Такая задержка не детерминирована и может достигать в худшем случае максимальной длительности фрейма CAN.

Для обеспечения синхронизации времени с точностью до единиц микросекунд и независимости от скорости передачи данных по CAN протоколу в интерфейсе Sciway предусмотрена специальная процедура (рис. 7).

Источник системного времени сначала выдает служебный фрейм синхронизации «SYNC». После успешной передачи этого фрейма (точка A) в самом источнике фиксируется значение эталонного времени (T_a), а в приборах-потребителях значения локальных счетчиков (ΔT) сбрасываются в ноль. Зафиксированное в точке A системное время (T_a) передается в следующем фрейме «TIME». После успешного приема в приборах фрейма времени (точка B) значения локальных счетчиков ΔT фиксируются. Добавляя локально измеренную задержку ΔT фрейма «TIME» относительно фрейма «SYNC» к переданному значению системного времени T_a получают точное значение системного времени T_b .

Точность синхронизации по данному методу не зависит от возможных задержек при передаче фреймов «SYNC» и «TIME» и определяется только латентностью фиксации времени в источнике эталонного времени и точностью измерения задержки ΔT в приборах.

Обеспечение гарантоспособности интерфейсу Sciway, надежности передачи информации в значительной степени зависит от синхронизации процессу передачи информации с процессами, которые происходят в приемниках информации. Вопросы синхронизации в интерфейсе Sciway рассмотрены в работе [5].

Реализация интерфейса Sciway в КНА «Ионосат-Микро»

В КНА «Ионосат-Микро» интерфейс Sciway используется для организации обмена информацией между системой сбора научных данных (ССНИ) и быстродействующими обладающими большими объемами информации устройствами. ССНИ содержит четыре порта интерфейса Sciway. Для реализации интерфейса

Sciway со стороны приборов используются периферийные процессорные микро-модули ССНИ (Pm5), содержащие хорошо отлаженный интерфейс Sciway.

Вычислительные мощности Pm5 достаточны для использования их в качестве центральных процессорных модулей для широкого класса приборов. Поэтому они могут встраиваться в состав этих приборов. Сочленение Pm5 с остальными схемами этих приборов выполняется соответствующей прошивкой ПЛИС микромодуля.

Для обеспечения информационной связи Pm5 с центральным блоком ССНИ разработано специализированный контролер синхронных каналов ССНИ [6].

Внешний вид резервированного процессорного микромодуля Pm5 приведен на рис. 8 (см. цветную вкладку).

Наличие Pm5 в значительной степени упрощает и сокращает сроки разработки приборов для научных исследований и их стыковку с центральным блоком ССНИ

ЛИТЕРАТУРА

1. Описание протокола CAN[Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.itt-ltd.com/reference/ref_can.html.
2. Протокол CAN — оптимальное построение бортовой сети [Электронный ресурс]// — Режим доступа: <http://www.smd-component.ru/pdf/can-basic.pdf>.
3. Space engineering. Space Wire-Links, nodes, routers and networks. ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands. 24 January 2003. ECSS—E—50—12A. ESA Publications Division. ESTEC. Copyright 2003 E by the European Space Agency for the members of ECSS.
4. Глухов В., Лукенюк А., Шендерук С. НВІС системи збору наукової інформації супутника «Січ-2» // Матеріали 5-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання» ACSN-2011. — 29 верес. — 01 жовт. 2011. — С. 57—60.
5. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Використання технології фазування даних в інтерфейсі системи збору наукової інформації космічних апаратів // Науково-технічний журнал «Радіоелектронні і комп'ютерні системи». — Х.: ХАІ, 2012. — № 7.
6. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Спеціалізований контролер для збирання наукової інформації супутника «СІЧ-2» // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» № 717, «Комп'ютерні системи та мережі». — Львів, 2011.

КОМПЛЕКТ ПЛИС СИСТЕМЫ СБОРА НАУЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.С. ГЛУХОВ, А.А. ЛУКЕНЮК, С.Г. ШЕНДЕРУК

Вступление

Высокая надежность и эффективность системы сбора и обработки научной информации (ССНИ), которая использовалась на борту спутника «Сич-2» в эксперименте «Потенциал», подтвердила правильность принципов её построения. Анализ результатов эксплуатации ССНИ спутника «Сич-2» и новые задачи по созданию комплекса научной аппаратуры (КНА) «Ионосат-Микро» показали необходимость расширения исполняемых ею функций. Это, в свою очередь, обусловило требования ко второму поколению программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), в результате выполнения которых расширены их функциональные возможности, разработаны их модели, создан модельный стенд для комплексной проверки работы разработанных ПЛИС и всей системы. К комплекту ПЛИС ССНИ входят ПЛИС центрального блока, ПЛИС периферийных микромодулей (ПМ), ПЛИС контрольно-проверочной аппаратуры. Модельный стенд обеспечивает моделирование обмена информацией каналами Sciway (в том числе и интерфейсом CAN), последовательными каналами типа RS и через радиоканал, кроме того моделируются работа с динамической памятью и действие помех.

Структурные схемы ПЛИС ССНИ КНА «Ионосат-Микро» и модельного стенда

Принципы построения бортовой ССНИ для космических аппаратов описаны в [1—3]. В сравнении с ССНИ КНА «Потенциал» ССНИ КНА «Ионосат-Микро» дополнительно должна выполнять такие функции:

- осуществлять управление и принимать информацию от большего количества научных приборов со скоростью до 100 Мбит/с;
- выполнять RS-кодирование и скремблирование информации, передаваемой в бортовую аппаратуру скоростной радиолинии (БА СРЛ);
- передавать информацию в БА СРЛ со скоростью 30,72 Мбит/с;
- передавать научную информацию через командную радиолинию СПС-S (резервный вариант);

- принимать от бортового цифрового вычислительного комплекса аннотационную информацию и привязывать ее к научным данным, передаваемым на наземные пункты приема;
- принимать от малогабаритной астрономической измерительной системы информацию о изображении участков звездного неба.

Также необходимо выполнение дополнительных функций контрольно-проверочной аппаратурой (КПА) ССНИ КНА «Ионосат-Микро». В частности, это реализация RS-декодера, декодера Витерби, скремблера и тому подобное.

Для построения ССНИ широко используются ПЛИС [4, 5]. Поэтому реализация дополнительных функций ССНИ КНА «Ионосат-Микро» и КПА ССНИ КНА «Ионосат-Микро» осуществляется в значительной мере также с использованием ПЛИС. Если учесть, что периферийные микромодули ССНИ, содержащие ПЛИС, встроены в научные приборы в качестве центральных процессоров, становится актуальной задачей обеспечение качественной отработки ПЛИС. На рис. 1 (см. цветную вкладку) приведен внешний вид электронной платы блока электроники анализатора плотности заряженных и нейтральных частиц (АПЧ) космической плазмы с резервным периферийным микромодулем ССНИ.

Для отработки ПЛИС разработан модельный стенд (testbench), в состав которого входят модели всех ПЛИС ССНИ КНА «Ионосат-Микро». Данный программный стенд обеспечивает комплексное моделирование работы всех ПЛИС и интерфейсов, которые содержатся в ССНИ и её КПА.

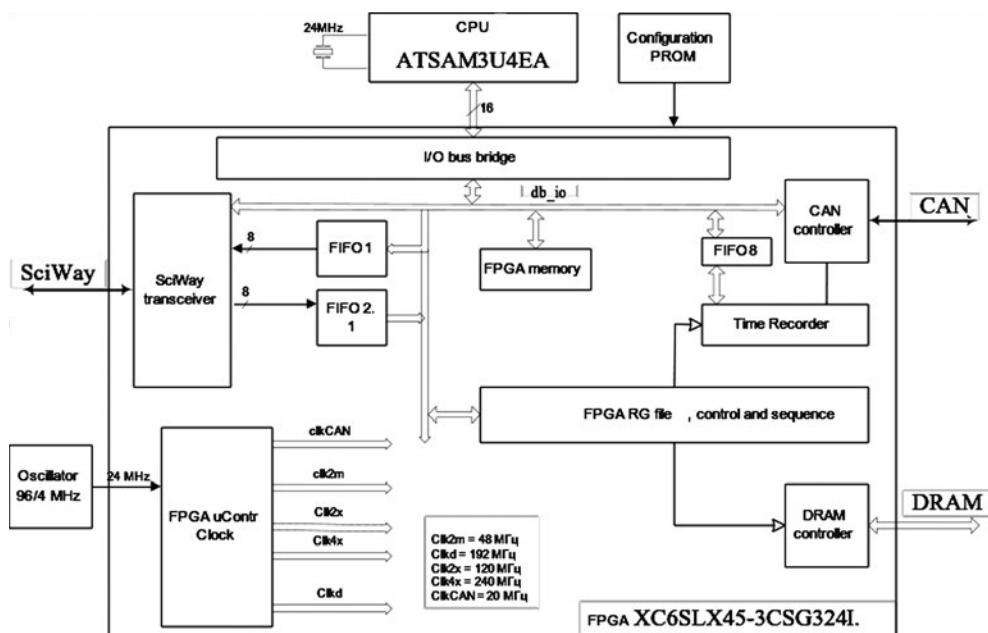
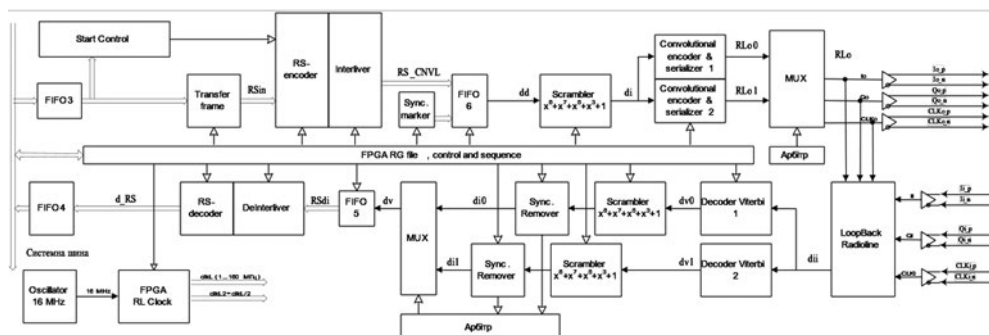


Рис. 2. Структурная схема ПЛИС периферийного микромодуля



136



ные коды и декодер Витерби, кодер-декодер Рида-Соломона, перемешивание и зашумление данных, синхромаркеры. Рабочие результаты имплементации ПЛИС периферийного модуля и центрального блока ССНИ показаны в таблице 1, в которой токи источников напряжения показано в форме «общий / в динамике / в статике».

Результаты имплементации ПЛИС периферийного микромодуля и центрального блока ССНИ

Параметр	ПМ	ЦБ
ПЛИС	xc6slx45	xc6slx150
Тип корпуса	csg324	fgg676
Быстродействие	—3	—3
Количество синхронных каналов SciWay	1	4
Частоты синхронного канала SciWay, МГц	120/240	125/250
Количество контроллеров CAN	1	4
Частота CAN, МГц	20	20
Системная шина микроконтроллера, бит	16	32
Частота микроконтроллера, МГц	24	31,25
Частота радиоканала, МГц	нет	1...160
Количество задействованных слайсов ПЛИС	1189 (17 %)	7758 (33 %)
Количество задействованных контактов ПЛИС	105	274
Количество блоков RAMB 16-битных	6 (5 %)	21 (7 %)
Количество блоков RAMB 8-битных	1 (1 %)	4 (1 %)
Количество DRAM (частота DRAM, МГц)	1 (192)	2 (200)
Потребляемая мощность, общая (на кристалле), мВт	913 (701)	3435 (2997)
джиттер синхронного канала, пс	200	200
температура кристалла ПЛИС, °С	40,8	68,2
ток источника V_{ccint} 1,2 В, мА	198 / 173 / 25	1107 / 900 / 207
ток источника V_{ssaux} 3,3 В, мА	90 / 42 / 48	139 / 68 / 71
ток источника V_{cco33} 3,3 В, мА	33 / 31 / 2	292 / 272 / 21
ток источника V_{cco18} 1,8 В, мА	150 / 14 / 136	380 / 94 / 286

Схема модельного стенда для отработки ПЛИС приведена на рис. 5. Модели микроконтроллеров — неполные и описывают только их интерфейсную часть, что позволяет моделировать обмены системными шинами. При моделировании работы ССНИ с помощью разработанного программного стенда можно изменять конфигурацию ССНИ, параметры и количество узлов, параметры и количество интерфейсов. Дополнительно моделируется реакция ССНИ на помехи, которые возникают в процессе передачи информации интерфейсами системы. Также можно моделировать поведение системы при возникновении аппаратных сбоев в её элементах. Ориентировочно, за 1 с работы модельного стенда моделируется 1 мкс реального времени работы ССНИ. По результатам проектирования топологии кристаллов ПЛИС определяются их тепловые режимы.

Направления дальнейших работ

На основе созданного модельного стенда предполагается уточнение алгоритмов работы ССНИ и планируется моделирование целостности сигналов, которые передаются внутри ССНИ с использованием IBIS-файлов, генерируемых при проектировании топологии ПЛИС. Отдельной задачей моделирования является определение энергетических характеристик ПЛИС.

Выводы

Анализ результатов использования ССНИ спутника «Сич-2» позволил сформулировать требования к новой перспективной ССНИ, на ПЛИС которой было положено исполнение дополнительных функций. Для моделирования работы ССНИ был разработан модельный стенд (testbench), в состав которого входят модели всех ПЛИС новой ССНИ и её КПА. Данный модельный стенд позволяет проведение комплексного моделирования работы всех ПЛИС и интерфейсов ССНИ, а также определить их технические характеристики. На основе созданного модельного стенда предполагается уточнение алгоритмов работы ССНИ и моделирование целостности сигналов, которые передаются внутри ССНИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лукенюк А.А., Шендерук С.Г.* Принципи побудови бортової системи збору та обробки наукової інформації для космічних досліджень // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки». Збірник доповідей. Частина II. 26—27 квітня 2007 р. — Київ. — С. 313—319.
2. *Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г.* Уніфікована бортова система збору і обробки інформації з наукової апаратури // Вторая Украинская конференция по перспективному космическому исследованию. Сборник тезисов. — Кацивели, Крым, 2002. — С. 68.
3. *Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г.* Спеціалізований контролер для системи збору наукової інформації супутника «Сич-2» // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі» — Львів, 2011. — № 717. — С. 10—16.

4. Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г. Використання реконфігурованих елементів у бортових системах збору й обробки даних // Вторая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям. Сборник тезисов. — Казивели, Крым, 2002. — С. 67.
5. Глухов В., Лукенюк А., Шендерук С. НВІС системи збору наукової інформації супутника «Січ-2» // Матеріали 5-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання» ACSN-2011. 29 вересня — 01 жовтня 2011. — Львів, Україна. — С. 57–60.
6. Recommendation for space. Data system standards. TELEMETRY CHANNEL CODING. CCSDS 101.0-B-5. Blue book. June 2001.
7. Recommendation for space. Data system standards. Packet telemetry. CCSDS 102.0-B-5. Blue book. November 2000.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УГЛОВОЙ ПРИВЯЗКИ ИЗМЕРЕНИЙ КОМПЛЕКСА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ СПУТНИКА «МИКРОСАТ»

**А.Л. МАКАРОВ, А.Г. МЕЛАНЧЕНКО,
И.А. ПЯТАК, В.С. ХОРОШИЛОВ**

Решение задач, поставленных в проекте «Ионосат-Микро», связано с необходимостью определения углового положения космического аппарата (КА). Для обеспечения привязки измерений комплекса научной аппаратуры угловое положение требуется определять с точностью более высокой, чем точность поддержания ориентации аппарата.

Определение ориентации с необходимой точностью может быть обеспечено с помощью звездного датчика МАИС-Б. Следует отметить, однако, что этот прибор представляет собой результат новой разработки, не апробированной в условиях космического полета, и его использование носит экспериментальный характер. Надежное решение поставленной задачи может быть выполнено по данным измерений магнитометра LEM1 и солнечного датчика ДОК.

Подобное сочетание приборов применялось на многих КА, разработанных КБЮ, и за истекшие десятилетия был накоплен положительный опыт определения ориентации с помощью такой системы. Бортовые приборы системы определения ориентации — магнитометр и солнечный датчик надежны, обладают приемлемыми конструкторскими характеристиками (вес, энергопотребление, стоимость) и изготавливаются отечественными предприятиями. Измерения этих приборов, помимо решения целевой задачи определения ориентации, дополнительно могут быть использованы как источник информации о геофизических параметрах, в частности — о магнитном поле Земли (МПЗ) [1, 2]. Создано необходимое математическое обеспечение, позволяющее выдавать значения углов ориентации КА и на интервалах с отсутствием измерений солнечного датчика (теневые участки орбиты).

Ранее задачи, аналогичные проекту «Ионосат-Микро», решались на КА «Сич-1М» с использованием аппаратуры «Вариант» [3]. В этом случае определение углового положения аппарата с помощью магнитометра и солнечного датчика сыграло важную роль для обеспечения реализации эксперимента в условиях нештатной работы системы ориентации КА [4].

Для прогноза возможностей процесса определения ориентации КА необходимо оценить его точностные характеристики. Точностные свойства зависят от погрешностей измерений, в первую очередь, от погрешностей датчиков.

Опыт многолетней работы со спутниковыми данными показывает, что, как правило, данные от магнитометра не реализуют в полной мере потенциальную точность этого прибора. В качестве основных причин могут быть названы следующие:

- действие помех от различных источников магнитного поля на борту КА;
- погрешности тракта передачи измерительных магнитометрических данных;
- отклонение математической модели магнитного поля Земли (МПЗ), используемой при интерпретации данных, от текущего состояния, действующего на время измерений;
- до настоящего времени полученная точность считалась достаточной для решения тех задач, которые были связаны с использованием магнитометрических данных, и цель повышения точности не ставилась.

Задача прецизионных измерений МПЗ, поставленная в проекте «Ионосат-Микро», требует обеспечения точности определения ориентации КА $0,01^\circ$. Такая точность может быть получена только в случае, если вновь разработанный прибор МАИС-Б с самого начала будет удовлетворять поставленным к нему требованиям. В других случаях в качестве альтернативы можно предусмотреть определение ориентации по данным системы, включающей магнитометр и солнечный датчик, с принятием комплекса мероприятий по повышению точности решения. Указанный подход может оказаться полезным и для решения других задач.

На Планетарном конгрессе Ассоциации космических полетов (2011 г., Москва) отмечен положительный опыт привлечения данных многих КА, например, в случае чрезвычайной ситуации. Так, во время землетрясения в Японии весной 2011 года была использована информация с 27 спутников 14 стран и с МКС [5]. Поэтому повышение качества интерпретации измерений научной аппаратуры будет способствовать повышению ценности измерений КА и создаст дополнительные возможности, в частности, для организации международного обмена информацией.

В настоящее время возникли условия для существенного повышения точности оценок определения ориентации КА при помощи рассматриваемой системы. К ним относятся, в первую очередь, использование датчиков с цифровым выходом и новых математических моделей глобального МПЗ, созданных благодаря осуществленным в 2000-е годы запускам новых КА для высокоточных магнитометрических измерений в околоземном пространстве. Следующим шагом должно явиться совершенствование методов обработки полученных данных об ориентации на основе разработки новых алгоритмов, обладающих адаптационными свойствами относительно складывающейся на борту помеховой обстановки.

В этих условиях основным фактором, определяющим возможность повышения точности оценивания ориентации, являются магнитные помехи, действующие на борту работающего КА.

Измерение собственного магнитного поля элементов конструкции и КА в целом является одной из обязательных составляющих современного производственного процесса. Однако, как показывает опыт обработки телеметри-

ческих данных, учет полученных при этом поправок не полностью компенсирует отклонение бортовых измерений от принятой модели МПЗ. Предполагается влияние, по меньшей мере, двух основных причин:

- измерения в наземных условиях проводятся при неработающей бортовой аппаратуре, что не позволяет учесть влияние токовой составляющей собственного магнитного поля КА;
- точность этих измерений (в некоторых случаях проводимых в производственных помещениях) остается под вопросом.

Зависимость точности от влияния возмущающих факторов возможно исследовать в ходе проектирования на основании математического моделирования, однако достоверные оценки могут быть получены только с учетом действительных значений помех, действующих в полете. До настоящего времени не ставилась задача определения реальных условий выполнения магнитометрических измерений на борту КА. В то же время, исследование этих условий позволит повысить точность измерительных данных и, в конечном итоге, точность определения ориентации КА.

Поэтому далее рассматривается задача оценки потенциальной точности определения ориентации аппарата при условии уточнения параметров магнитных помех в объеме магнитометра. Методика уточнения основана на обработке данных датчиковых измерений, полученных по телеметрическому каналу с находящегося в полете КА [6].

Плодотворность рассматриваемого подхода апробирована в ходе работ по определению ориентации КА «EgyptSat-1» и «Сич-2» путем обработки телеметрических данных. В ходе работы этих КА был получен и накоплен достаточный объем магнитометрической информации, которая дает возможность на практике решить ряд вопросов, связанных с оптимизацией алгоритмов интерпретации бортовых измерений. Создание банка телеметрических данных (в первую очередь — магнитометрических) создает возможность отработки на практике новых алгоритмических решений и получения достоверных оценок потенциальной точности определения ориентации КА проекта «Ионосат-Микро» по магнитометру и солнечному датчику.

Решение задачи включало набор необходимого количества измерительной информации. Использованы несколько десятков сеансов регистрации телеметрических измерений достаточной длительности (порядка 9...10 часов), что позволяло получить решение применительно ко всевозможным положениям вектора геомагнитного поля. Создано математическое обеспечение, обеспечивающее выборку из протокола телеметрических данных необходимых параметров. Параметры включали в себя значения измеренных проекций вектора геомагнитного поля, солнечного вектора (только для «Сич-2»), координат и скоростей КА. Каждый параметр выдавался в привязке ко времени.

Особенностью системы выдачи измерений является отсутствие синхронизации моментов измерения отдельных параметров. Отличия во временной

привязке связаны с тем, что очередное значение параметра выдается не с постоянным шагом по времени, а по принципу появления существенного изменения относительно предыдущего значения. Поскольку скорости изменения параметров могут сильно различаться (например, измеренные проекции вектора МПЗ и прямоугольные координаты КА), времена и количество измерений разных параметров, как правило, не совпадают.

Это потребовало проведения предварительной подготовки измерительных данных, заключающейся в формировании массивов «сечений», включающих значения всех требуемых параметров, на основе интерполяции их к единым моментам времени, определяемым с заданным шагом.

Оценка точности полученных измерений проводилась относительно параметров геомагнитного поля, задаваемого различными математическими моделями. При проведении работы рассматривались модели МАП-85, IGRF-95, -00, -05, -11, скорректированные на текущую дату с учетом параметров векового хода. Критерием являлись статистические среднеквадратические отклонения (с.к.о.) невязок, вычисленных как разность измеренного и расчетного (для данной орбиты и модели МПЗ) модуля поля.

В частности, с.к.о. σ невязок исходных значений (полученных по ТМ каналам, до корректировки) измеренного модуля МПЗ, по данным КА «Сич-2», составляет: для IGRF05 $\sigma = 800...900$ нТл; для IGRF11 $\sigma = 700...800$ нТл.

Для моделей других эпох увеличение отклонений измеренных параметров поля от прогнозируемых имеет вид прямой зависимости от интервала времени между датой эпохи и датой измерений. Наилучшие результаты достигаются с моделью, наиболее близкой (по времени) ко времени проведения измерений КА. Отсюда следует, что точность прогноза модели, выполняемая по заданным параметрам векового хода, является недостаточной. С другой стороны, можно сделать также заключение, что точность (или разрешение) бортовых служебных магнитометров таковы, что их измерения позволяют оценивать достоверность модели. Эти измерения могут быть использованы в качестве источника информации о геофизических параметрах, в том числе и для уточнения модели поля, или ее отдельных характеристик.

На рисунке 1 приведен график 1) невязок (со сдвигом на +2000 нТл) для данных, полученных при выдаче телеметрии на витке 5035 (от 26.07.2012); $\sigma = 744$ нТл. Из графика видно, что отклонения представляют собой периодический процесс, в котором, помимо случайной, значительную часть составляет регулярная составляющая. На первом этапе уточнения данных рассматривается построение модели магнитных помех, действующих на борту КА.

Используется модель помех, описываемая уравнениями Пуассона [7]

$$\delta \mathbf{B} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{B}_m + \Delta \mathbf{B}_p,$$

где $\delta \mathbf{B}$ — искомый вектор помех; $\mathbf{M}$ — матрица коэффициентов индуктивного намагничивания — магнитномягкой составляющей помехи; $\mathbf{B}_m$ — вектор гео-

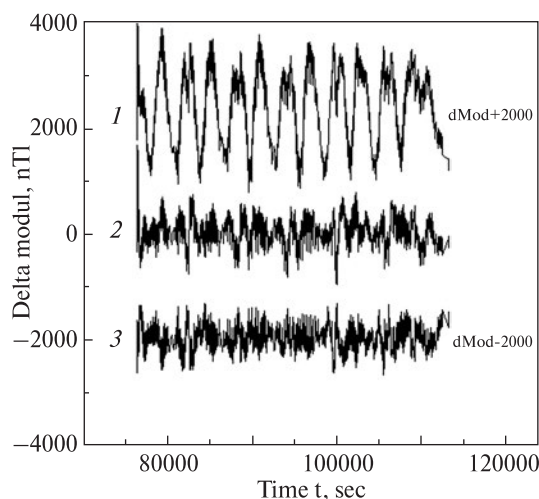


Рис. 1. Графики невязок измерений модуля МПЗ для витка 05035: 1 — в соответствии с полученными исходными измерениями; 2 — после уточнения действующих магнитных помех; 3 — после построения рабочей модели МПЗ

магнитного поля в точке установки измерительного прибора; $\Delta \mathbf{B}_p$ — вектор постоянной помехи — магнитнотвердой составляющей.

Применительно к этой модели разработан программный комплекс определения параметров действующей помехи как функции разности модулей векторов магнитного поля измеренного и расчетного. Вектор расчетного поля вычислялся в соответствии с принятой моделью МПЗ.

Каждый массив подготовленных данных ТМИ включал порядка 2000 измерений, выданных (преимущественно) с интервалом 20 секунд. В результате проведенных обработок ТМ данных, определения параметров помех и уточнения полученных измерений получены следующие значения с.к.о. невязок: КА «EgyptSat-1» $\sigma = 150...200$ нТл; КА «Сич-2» $\sigma = 250...300$ нТл (обработка носит предварительный характер).

В процессе работы определялись значения вектора постоянной помехи $\Delta \mathbf{B}_p$ и элементы матрицы $\mathbf{M}$ (только диагональные или также и недиагональные).

Решение показало, что у КА «Сич-2» постоянные помехи в проекциях на оси x , y , z связанной с КА системы координат имеют следующие значения: $\Delta B_{px} = 650...700$ нТл; $\Delta B_{py} = 250...300$ нТл; $\Delta B_{pz} = 400...450$ нТл.

Учет недиагональных членов матрицы индуктивных коэффициентов приводит к дополнительному уменьшению с.к.о. невязок на 5...15 нТл.

На графике 2) представлены отклонения для данных витка 5035 после учета вычисленных поправок; для него $\sigma = 300$ нТл.

Дальнейшее снижение невязок и уточнение магнитометрических данных проводилось путем создания рабочей модели геомагнитного поля на основе имеющихся магнитометрических измерений. В результате были получены значения коэффициентов, близкие к коэффициентам модели IGRF, однако обеспечивающие лучшее согласование с измерительными данными КА «Egypt-

Sat-1» и «Сич-2». Применение этой модели привело к снижению с.к.о. на 80...100 нТл. Соответствующие отклонения (со сдвигом на -2000 нТл) по данным витка 5035 представлены на графике 3), для которого $\sigma = 233$ нТл.

Приведенные результаты получены на основании данных об измерениях модуля, без учета сведений о фактической ориентации КА. При этом коэффициенты, входящие в уравнения Пуассона, не вполне наблюдаемы. Введение в решение данных об ориентации позволяет достичь дальнейшего повышения точности решения, если в качестве измерений рассматривать не модуль, а три проекции вектора магнитного поля на оси связанной с КА системы координат. Повышение точности связано с увеличением степени информированности системы обработки и улучшением обусловленности решения. Улучшения можно добиться также и без знания полной ориентации КА, а только введением в решение данных об измерениях другого вектора, например, солнечного.

В результате проведенных работ можно считать установленным на практике, что при адекватно организованной обработке измерений приборов типа LEMI возможно достичь ограничения погрешности магнитометрических данных в пределах ~ 300 нТл, с перспективой повышения точности. Считая, что минимальное значение модуля МПЗ на высоте 600 км составляет более 25000 нТл, можно оценить предельную погрешность определения направления измеренного вектора как $300/25000 \times 57,3^\circ = 0,69^\circ$. Сочетая измерения магнитометра и солнечного датчика (типа ДОК с погрешностью не более 1°), возможно обеспечить определение ориентации КА с точностью не хуже 1° на освещенных участках орбиты.

На теневых участках орбиты (продолжительностью до ~ 30 минут) выбор метода решения зависит от поставленной задачи. Если необходимо определить направление, близкое к направлению вектора геомагнитного поля, задача решается с использованием измерений одного магнитометра. В общем же случае, когда требуется знать полную ориентацию КА, алгоритм строится с использованием интерполяционных, кинематических или динамических моделей ориентации. Модели позволяют дополнить ненаблюдаемый магнитометром параметр ориентации на основе экстраполяции оценок, выполненных на освещенных участках орбиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пятак И.А. Использование спутниковых магнитометров для решения задач прикладной космонавтики // Сб. тезисов докладов Седьмой украинской конференции по космическим исследованиям, 3—8 сентября 2007 г., Евпатория. — С. 145.
2. Беляев С.М., Корепанов В.Є. Використання магнітометра системи навігації мікросупутника для вимірювань геомагнітного поля // Космічна наука і технологія. — 2011. — Т. 17, N 2. — С. 3—9.
3. Корепанов В.Є., Івченко В.М., Лізунов Г.В., Федоров О.П., Дудкін Ф.Л., Попель А.М. «Варіант» — перший міжнародний науковий експеримент на борту українського супутника // Космічна наука і технологія. — 2007. — Т. 13, № 4. — С. 3—9.



КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ

«ИОНОСАТ-МИКРО»

4. *Пятак И.А.* Определение ориентации космического аппарата «Січ-1М» по телеметрическим данным // Техническая механика. — 2010. — № 1. — С. 55–60.
5. Москва собирает космическую элиту // Новости космонавтики. — 2011. — Т. 21, № 11. — С. 54–55.
6. *Пятак И.А.* Определение постоянной составляющей погрешности магнитометра // Тез. докл. VIII сессии семинара по проблемам построения и использования магнитометрической аппаратуры. — Л.: Недра, 1970. — С. 42.
7. *Рыбалтовский Н.Ю.* Магнитно-компасное дело. — Л.: Гос. изд-во водного транспорта. Ленинградское отделение, 1954. — 492 с.

РАЗДЕЛ 3

НАЗЕМНЫЙ СЕКТОР



ЦЕНТР ХРАНЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ PROMIS

В.Н. РЕШЕТНИК, А.А. КУЗЬМИЧ, А.В. КОВАЛЬ, Е.В. ПЬЯНКОВА

Введение

Современные научно-технические проекты воплощаются в жизнь не только в качестве материального, но и интеллектуального информационного продукта. Результаты проектов фиксируются во всемирной компьютерной сети и через веб-сайты доступны широкому кругу лиц. Создаются специальные информационные сервисы, совмещающие базы данных космических проектов со средствами обработки информации; такое объединение оказывается конструктивным, поскольку пользователи всего мира получают доступ к данным из разных источников и способам их анализа, фактически не тратя время на поиск. Меняется и сам цикл обработки информации, становящийся все более независимым от конкретных участников проектов, что кардинально увеличивает результативность работы космических аппаратов (КА). История космонавтики знает много примеров, когда значимые научные данные не были обнародованы, оставались закрытыми или слабо доступными, в результате чего усилия целых команд учёных и конструкторов были сведены к нулю. В то же время относительно дешёвые и простые, но доступные научному сообществу проекты приобретали всемирный успех. С пониманием указанных обстоятельств авторы современных космических миссий открывают результаты измерений по истечению определенного промежутка времени.

Новые информационные технологии изменяют представление и о самих методах осуществления космических проектов. Размещение в сети оперативной информации о ходе измерений — «квик-луков» (quick-look), телеметрии, сведений о работе отдельных приборов — стирает временные задержки, в результате чего космический эксперимент приближается к эксперименту в режиме реального времени. Это позволяет команде управления полётом оперативно корректировать научную программу, что, однако, требует слаженной работы всего коллектива участников проекта, начиная от операторов принимающих станций и заканчивая научными руководителями. Как показывает мировой опыт, управление работой КА в экстремальных ситуациях не всегда производилось адекватно, в результате чего частично функционирующий спутник мог остаться без нужных указаний, или еще хуже, продолжать выполнять ранее подготовленную программу, что приводило к окончательному выходу КА из строя.

В Институте космических исследований НАНУ и ГКАУ (ИКИ) ведутся работы по созданию программно-серверного комплекса PROMIS (от PROCessed Measurements of Ionospheric Satellites). Комплекс будет осуществлять ряд взаимосвязанных функций: служить хранилищем данных ионосферных измерений и относящейся к ним информации, предоставлять удалённым пользователям доступ к данным и средствам их обработки, служить инструментом управления ходом космического проекта «Ионосат-Микро» и коммуникации его участников.

Техническая реализация центра PROMIS

Основные задачи работы центра PROMIS:

1. Сбор, архивация и хранение спутниковых и сопутствующих им наземных измерений ионосферных параметров;
2. Создание информационного ресурса отечественных ионосферных космических экспериментов «Вариант», «Потенциал» и «Ионосат-Микро», с описанием особенностей платформ КА, комплексов научной аппаратуры, научных заданий и другой представительской информации;
3. Создание мощного и современного веб-портала данных ионосферных наблюдений с возможностью онлайн доступа, разработка специального инструментария для интеллектуального анализа и визуализации данных;
4. Создание интерфейса для управления ходом КЭ «Ионосат-Микро» и коммуникации его участников;
5. Интеграция центра в систему глобальных геоинформационных сервисов. Создание виртуальной обсерватории для изучения динамики ионосферы широким кругом учёных, преподавателей, студентов и других интересующихся лиц.

Одним из первых возник вопрос выбора места расположения центра. Были проанализированы различные, обладающие своими плюсами и минусами варианты: профессиональные дата-центры, уже существующие сервера родственных организаций и т.д. В итоге было решено развернуть PROMIS в самом ИКИ, под управлением лаборатории спутниковых исследований ближнего космоса. Для этого было оборудовано помещение с контролем климата, закуплено и установлено необходимое серверное и сетевое оборудование, а также источники бесперебойного питания. Сотрудники лаборатории провели настройку сервера, установили необходимое программное обеспечение и обеспечивают администрирование работы сервера. Общая схема серверного комплекса представлена на рис. 1. Изначально для работы используется два физических сервера, которые могут в случае необходимости дублировать функции друг друга. На логическом уровне используется технология виртуализации серверов, что позволяет уменьшить зависимость программного обеспечения от особенностей компьютерного оборудования и реализовать механизм резервирования, при котором в случае выхода из строя одного сервера его функции будет временно выполнять другой.

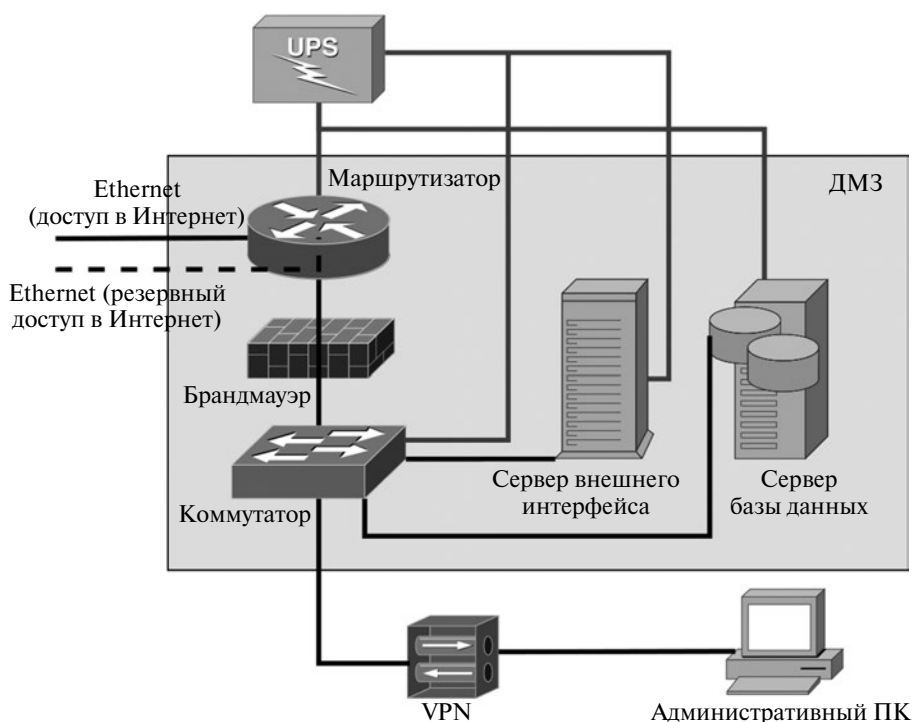


Рис. 1. Структура серверного комплекса PROMIS

Внутреннюю структуру центра PROMIS можно условно представить в виде пирамиды, каждый новый уровень которой основывается на нижележащих слоях (рис. 2). В самом низу лежит аппаратная составляющая, это серверный комплекс описанный ранее. Информационный сегмент — стандартное программное обеспечение, служащее штатному функционированию оборудования, позволяет разделять ресурсы, разграничивать доступ, проводить администрирование комплекса. Информационный сегмент является базисным для PROMIS API (PROMIS Application Programming Interface) и позволяет его создавать, расширять и модифицировать. PROMIS API — набор программных решений, разработанных в ИКИ, реализующий доступ к данным, а также позволяющих проводить обработку данных, их фильтрацию, первичный анализ и визуализацию. Схема взаимодействия PROMIS API с другими уровнями центра позволяет его расширять и модифицировать без значительных изменений всего серверного комплекса. Данное свойство очень полезно, поскольку невозможно реализовать все необходимые алгоритмы обработки заранее, часть из них будет создаваться в будущем в процессе обработки конкретных измерений.

Центр PROMIS имеет собственный веб-сайт, который делится на две основные части: представительская, содержащая информацию о космических



Рис. 2. Внутреннее представление центра PROMIS

проектах «Вариант», «Потенциал», «Ионосат-Микро» и научная — собственно данные спутниковых измерений и их графическое представление.

Представительская часть сайта содержит краткое описание проекта, авторского коллектива, состава научной аппаратуры КА. На отдельной странице размещается описание отдельных научных приборов, их массогабаритные характеристики, схематически показано место расположения всех приборных комплексов на платформе космического аппарата. Также планируется размещение фото- и видеоматериалов. Научное сообщество имеет возможность при помощи сайта узнавать новости о проекте, его состояние, связаться с авторами и многое другое.

Научная часть веб-интерфейса PROMIS предоставляет внешнему пользователю ряд различных веб-сервисов для работы с данными. Эти сервисы можно разделить на группы: сервисы поиска данных, сервисы визуализации данных и сервисы анализа — набор алгоритмов которые можно «на лету» применять к данным. Поскольку разным пользователям для работы с данными может потребоваться разное количество и разные типы таких сервисов — научная часть веб-интерфейса PROMIS должна быть достаточно гибкой с возможностью подстройки к потребностям пользователя, но при этом оставаться интуитивно понятной. Поэтому было решено построить веб-интерфейс на концепции работы с виджетами — отдельными окнами, выполняющими роль интерфейсов работы с различными типами сервисов. В данном случае виджеты не являются независимыми друг от друга — они будут работать с одними и теми же данными, но выполнять различные действия над ними. Например, визуализация данных и генерирование файла данных для скачивания с помощью

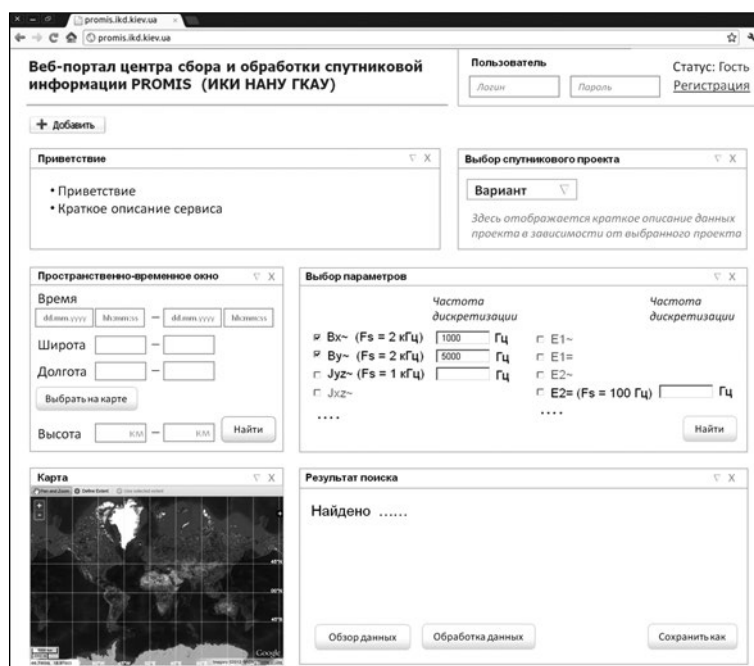


Рис. 3. Дизайн научной части пользовательского веб-интерфейса PROMIS

функционала веб-интерфейса PROMIS являются независимыми друг от друга функциями, но они могут работать над одной и той же выборкой данных.

Предварительный дизайн научной части веб-интерфейса PROMIS представлен на рис. 3. Концепция виджетов позволяет дополнять веб-интерфейс PROMIS новыми функциями на основе уже существующего дизайна.

Информационные потоки данных в PROMIS

В проекте «Ионосат-Микро» используется общепринятая классификация уровней обработки данных:

- 0 — файлы информации, полученные с КА;
- 1 — отсортированные (распакованные) по отдельным измерительным каналам данные, как они были записаны в систему сбора научной информации на борту КА;
- 2 — тарированные и очищенные от приборных сбоев данные измерений в общепринятых в физике ионосферы единицах;
- 3 — преобразованные данные второго уровня, обработанные при помощи специальных фильтров, графическое представление данных, совмещенное представление наборов данных нескольких различных приборов и т.д.

Данные космических измерений первоначально записываются в систему сбора научной информации на борту спутника, где они архивируются и подго-

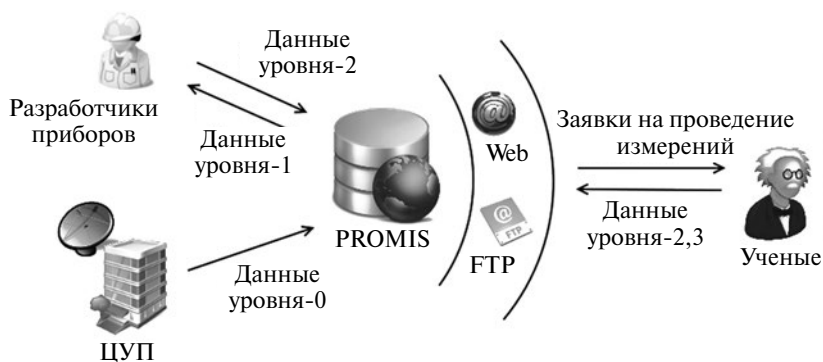


Рис. 4. Схема взаимодействия служб PROMIS с разработчиками приборов и конечными потребителями научной информации

тавливаются для передачи на Землю. При этом передаются как научные данные, так и сопроводительная телеметрическая информация. Последняя нужна для обработки научной информации, это, например, информация о местоположении космического аппарата, его ориентации, скорости движения и пр. Передача информации с борта КА «Микросат» в центр PROMIS описана в работе [1].

Дальнейшая обработка научной информации ведётся кооперацией проекта. С использованием средств центра PROMIS в ИКИ будет производиться раскадровка потока данных со спутника (данные «уровня-0») по измерительным каналам. При этом будет осуществляться проверка целостности и корректности данных, а также выделяться сопутствующая телеметрическая информация. Полученные в результате «сырые» данные измерений (данные «уровня-1») 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 и пр. Затем, обработанные авторами приборов научные данные (данные «уровня-2») будут возвращаться в ИКИ для размещения на веб-ресурсе проекта. Схема потоков информации между Центром и разработчиками приборов представлена на рис. 4.

Данные «уровня-2» уже могут быть проанализированы и интерпретированы научным сообществом. Для удобства доступа данные будут предоставляться по нескольким сетевым протоколам, таким как FTP и HTTP. Файлы с данными будут храниться в широко используемых форматах NetCDF и ASCII.

Спутниковые данные всех уровней обработки хранятся в базе данных центра PROMIS. Для её администрирования и сопровождения на сервере центра установлена реляционная система управления базами данных (РСУБД). РСУБД обеспечивает структурированное хранение данных, и гибкий способ доступа к данным с помощью запросов на языке SQL. РСУБД также позволяют производить дополнительную защиту разделением ролей доступа к информации и поддерживают целостность самих данных. Многие современные язы-

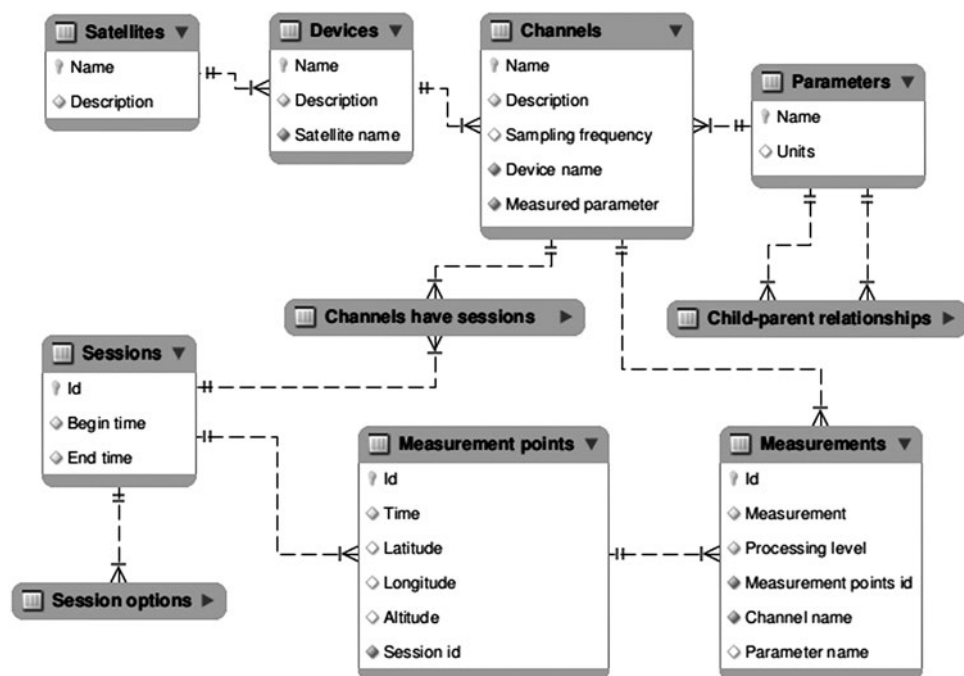


Рис. 5. Реляционная модель хранения информации в базе данных PROMIS

ки программирования имеют специальные интерфейсы для работы с наиболее популярными системами управления базами данных. Последнее позволяет создавать собственное программное обеспечение для обслуживания и работы с базой данных спутниковых наблюдений. При создании базы данных центра PROMIS учитывалась возможность ее расширения, необходимость хранения данных будущих научных космических проектов. Таким образом, структура базы нормализована и унифицирована для работы с различными по типам и параметрам данными. Структурная схема базы данных центра PROMIS представлена на рис. 5. Каждая таблица базы данных центра имеет первичный ключ, позволяющий уникально идентифицировать каждую запись, все связи между таблицами реализованы при помощи соответствия внешнего ключа одной таблицы первичному ключу другой. База данных хранит информацию не только непосредственно измеренную на борту космического аппарата и сопутствующие ей телеметрические данные, но и всю дополнительную информацию, например используемые единицы измерения конкретных физических величин, название приборов, название спутника и многое другое. Данная метainформация позволяет расширить возможности по поиску и непосредственной обработке данных, а также представлению результатов измерений.

Вкратце, структуру базы данных можно описать следующим образом: записи измеренных величин представлены в таблице «Measurements», каждое из-

мерение однозначно связано с пространственно-временной точкой из таблицы «Measurements points». Таблицы «Satellites», «Devices» и «Channels» образуют древовидную структуру и хранят информацию о спутнике, приборе и измерительном канале соответственно. Таблицу «Parameters» можно рассматривать как опцию к записям таблицы «Channels»: ее записи характеризуют физическую величину, измеряемую в данном канале. Таблица «Sessions» хранит информацию о сеансах включения приборов. Она имеет связь типа «многие ко многим» с таблицей «Channels». Таблица «Session options» содержит набор опций, описывающих сеансы таблицы «Sessions»: это может быть информация о режиме работы приборов во время определенной сессии измерений. Таким образом, данная структура базы данных выражает некоторый набор параметров, относящиеся к одному измерению: каждый спутник имеет набор приборов, которые, в свою очередь, имеют набор измерительных каналов, измерения в которых ведутся в рамках сессий. Каждая сессия состоит из ряда точек измерений с указанием режима работы прибора. Дополнительная таблица «Child-parent relationship» определяет уровень обработки данных посредством указания связи одних измерений с измерениями-родителями, на основе которых они были получены. Например: в случае, когда из двух каналов электрических зондов, которые измеряют электрический потенциал, были получены значения второго уровня электрического поля, то в таблице «Child-parent relationship» хранится связь измерений электрического потенциала, как родителя, с полученными измерениями электрического поля, как дочерними измерениями.

Технически реализацию наполнения базы данных можно разделить на два отдельных механизма, используемых одновременно. Первый — ручной, когда администратор самостоятельно добавляет записи в определенные таблицы. При помощи этого механизма создаются таблицы, и задаются основные информативные параметры космического проекта. Второй механизм — автоматический — реализован при помощи программных модулей, производящих наполнение базы данных. Данный механизм нужен для динамического наполнения базы данными, полученными со спутника или от разработчиков приборов.

Внутренняя структура PROMIS

Серверный комплекс PROMIS обслуживает ряд служб, часть из которых используется для администрирования и расширения проекта, тогда как иные работают непосредственно с запросами клиентов. Схема взаимодействия служб представлена на рис. 6. PROMIS определяет 4 роли доступа к данным: администратор, оператор контроля хода эксперимента, разработчики приборов, и остальные пользователи.

Администратор выполняет работы по настройке и сопровождению всего программного комплекса PROMIS, следит за корректной работой всех его составляющих. Оператор контроля хода эксперимента осуществляет составление заявок на проведение новых измерений, интегрируя при этом запросы

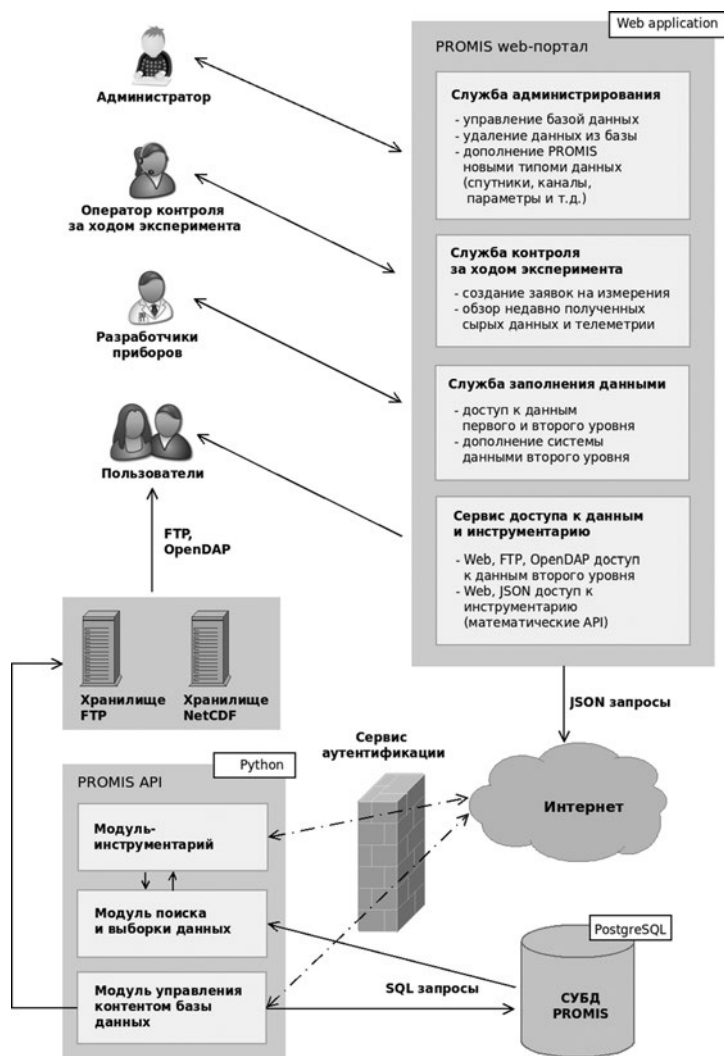


Рис. 6. Информационные потоки в центре PROMIS

ученых. Разработчики приборов в отличие от остальных пользователей имеют доступ к информации уровней 0 и 1.

Как видно из схемы, службы, используемые клиентами через сеть Интернет, не имеют прямого доступа к базе данных. Доступ организовывается через специальный механизм PROMIS API. Во-первых, это уменьшает риск повреждения или потери данных, а, во-вторых, PROMIS API предоставляет удобный интерфейс для получения данных в автоматическом режиме.

PROMIS API обеспечивают авторизованный доступ к данным (с помощью сервиса авторизации) и предоставляют возможность их обработки.

Сервис авторизации, в свою очередь, обеспечивает безопасность передачи данных через открытую сеть Интернет, а так же выполняет проверку подлинности пользователей на основании цифровых сертификатов. Сервис авторизации реализуется посредством стандартных открытых протоколов передачи данных входящих в стандарт IP SEC.

PROMIS API функционально разделен на три модуля: модуль поиска и выборки данных, модуль управления контентом базы данных и модуль-инструментарий.

Модуль поиска данных и модуль управления контентом базы — единственные компоненты системы, имеющие прямой доступ к базе. Модуль поиска предназначен для обслуживания пользовательских запросов, в то время как модуль управления контентом — для заполнения базы данными.

Модуль-инструментарий — модуль, обеспечивающий работу алгоритмов (инструментов) для анализа данных на стороне сервера. Отдельный инструмент получает выборку данных от модуля поиска, далее, на основе прочитанных данных, выбранный инструмент генерирует промежуточные результаты, которые могут быть переданы следующему инструменту или отосланы пользователю для дальнейшего принятия решения. Например, инструмент преобразования, получив данные при помощи универсального инструмента сложения данных, генерирует файлы в формате TXT или NetCDF, которые в дальнейшем пересылаются на FTP-сервер проекта.

При помощи инструментария данные «уровня-2» с нескольких приборов приводятся к единой временной шкале, и могут быть сведены в единую таблицу для дальнейшего анализа или преобразованы в графическое представление. Таким образом, при помощи инструментария можно получить новые данные — «уровня-3».

Конечный пользователь может либо работать непосредственно с инструментарием, используя JSON-запросы, либо ему предоставляется набор веб-сервисов, которые были описаны выше. Пользователь может составлять собственный сложный алгоритм обработки данных, включая последовательно набор более простых сервисов. Сами сервисы состоят из одного или более инструментов. Предусмотрена возможность реализации нескольких сценариев обработки, и в ее схеме появляются ветвления. Потенциально возможна обработка данных пользователя прямо на сервере PROMIS, данная особенность не исключалась при проектировании программного комплекса. Для этого запланирована возможность загрузки данных и алгоритмов на сервер центра.

В центре PROMIS планируется размещение наземных дистанционных ионосферных измерений проведенных в учреждениях-участниках проекта «Ионосат-Микро». Доступ к ним планируется организовать при помощи тех же веб-сервисов, что значительно упростит совместный анализ наземной обстановки, дистанционных наблюдений и ионосферных измерений *in situ*.

Таким образом, возможности обработки данных конечными пользователями весьма широки. Ученый, преподаватель или студент, имея доступ к сети

Интернет, при помощи набора простого программного обеспечения может реализовать многие научные идеи. Например, в случае работы с центром PROMIS, при помощи только браузера можно получить данные измерений ионосферного спутника, провести их фильтрацию и визуализацию, сравнить с наземными измерениями и параметрами геомагнитной и солнечной активности.

Особенностью работы центра PROMIS является возможность хранения всей доступной проекту информации, включая как научные, так и служебные телеметрические данные. Файлы с данными в автоматическом порядке поступают в базу данных, что позволяет проводить их экспрес-оценку при помощи специально разработанных сервисов. Оператор при помощи веб-интерфейса проводит предварительный анализ полученных данных, их целостность и корректность, при необходимости оценивает параметры космического аппарата, и после этого составляет заявку на будущие наблюдения. Список всех существующих заявок с детальным описанием доступен оператору в процессе подготовки и планирования научных измерений. Предусмотрена возможность загрузки в базу данных PROMIS предложений от разработчиков приборов и научной команды сопровождения эксперимента. Данные предложения содержат информацию о включении конкретного бортового датчика или комплекса аппаратуры в интересующие момент времени или координатах спутника, возможные режимы измерения и тому подобное.

Относительно простой и интуитивно-понятный интерфейс, наличие меню-помощи делают возможным применение веб-интерфейса центра PROMIS и в учебных целях. Студенты и аспиранты смогут выполнять лабораторные работы, проводить диагностику ионосферы по результатам космических экспериментов. Возможность представления данных в графическом виде значительно упрощает восприятие новой информации, позволяет сравнивать показания различных физических величин полученных на разных инструментах. Наличие данных и средств их предварительной обработки на серверах Центра позволяет выполнять практические задания независимо от платформы и операционной системы компьютеров студентов, что значительно упрощает проведение лабораторных работ. В случае большой популярности использования данных с учебной целью центр PROMIS сможет разместить учебные материалы, лабораторные задания и рекомендации к их выполнению на сайте проекта.

Авторы благодарны Г.В. Лизунову за активное обсуждение ключевых моментов статьи, полезные советы и правки, а также прекрасную редакторскую работу и моральную поддержку. Работа финансировалась в рамках проекта целевых инициатив УНТЦ-ГКАУ № 5567 и контракта ГКАУ № 1-15/12.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лизунов Г.В., Лукенюк А.А., Макаров А.Л., Фёдоров О.П. Космический проект Ионосат-Микро: цели и методы // Космический проект «Ионосат-Микро». — К. : Академперіодіка, 2013. — С. 11—25.

РАДИОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ХАРЬКОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ В.Н. КАРАЗИНА — СРЕДСТВО ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ В КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Л.Ф. ЧЕРНОГОР, К.П. ГАРМАШ, В.А. ПОДНОС, О.Ф. ТЫРНОВ

Введение

Специалистам хорошо известно, какой огромный объем новой научной информации был получен в 2000-х гг. при помощи французского ионосферного ИСЗ «DEMETER». Но достижения могли быть еще более впечатляющими, если бы космический эксперимент дополнялся комплексными наземными наблюдениями за процессами в ионосфере.

В настоящее время в Украине реализуется проект «Ионосат-Микро» [1], а в перспективе планируется осуществить проект «Ионосат» [2].

Успешная и эффективная реализация проекта «Ионосат-Микро» невозможна без согласования космических и наземных измерений, без совместного анализа динамических процессов в ионосфере в широком диапазоне пространственно-временных масштабов в широком диапазоне высот (от 60 до 1000 км и более). Дело в том, что измерения на космическом аппарате дают информацию о параметрах среды в месте его расположения. Параметры же динамических процессов определяются взаимодействием всех геооболочек (внутренних и внешних геооболочек). Для построения целостной картины динамических процессов необходима информация о процессах в этих геооболочках, об особенностях взаимодействия последних. Такую информацию могут дать наземные дистанционные методы.

Измерения на борту космического аппарата и согласованные наземные наблюдения не просто дополняют друг друга, они позволяют комплексно решить поставленную задачу. С формальной точки зрения ионосфера описывается системой уравнений со многими неизвестными. Чем больше параметров среды будет измеряться в ходе наземно-космического эксперимента, тем точнее будет решена задача.

В нашей стране имеется несколько обсерваторий, в которых длительное время (с 1960—1970-х гг.) ведутся систематические исследования физических процессов в ионосфере и околоземном космосе (геокосмосе). Исторически так сложилось, что в окрестностях г. Харькова разместились три обсерватории, принадлежащие Харьковскому национальному университету (ХНУ) име-

ни В.Н. Каразина, Институту ионосферы МОНМС и НАН Украины, Радиоастрономическому институту НАН Украины.

Начатые около 50 лет назад исследования геокосмоса в ХНУ имени В.Н. Каразина, интенсивно продолжаются и в настоящее время. Для этой цели была введена в строй радиофизическая обсерватория (РФО). В ней размещены автоматизированные и компьютеризированные системы дистанционного радиозондирования геокосмоса в широком диапазоне высот ($z \approx 50\text{—}1000$ км), которые непрерывно совершенствуются и модернизируются. Ниже дана краткая характеристика этих средств [3—5].

Комплекс дистанционного радиозондирования ионосферы, включающий в себя все размещенные в РФО радиотехнические системы, внесен в реестр научных объектов, которые составляют национальное достояние Украины.

Территориально РФО размещена в Харьковской области вблизи пос. Гайдари ($49^\circ 38'$ с.ш., $36^\circ 20'$ в.д.) и пос. Граково ($49^\circ 39'$ с.ш., $36^\circ 56'$ в.д.).

Уровень научных знаний. За последние десятилетия в мире накоплен большой объем уникальной информации о физико-химических процессах в геокосмосе. Основное внимание уделялось воздействию на геокосмическую среду процессов на Солнце, детально изучались солнечно-земные связи. Значительно меньше изучено влияние земных процессов под поверхностью, на поверхности и в атмосфере планеты на процессы в геокосмической среде. Еще меньше исследовано влияние мощных техногенных источников на процессы в околоземной космической среде.

Недостаточно изучено взаимодействие подсистем в системах «Солнце — межпланетная среда — магнитосфера — ионосфера — атмосфера — Земля — биосфера» (СМСМИАЗБ) и «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» (ЗАИМ), устойчивость подсистем к воздействиям со стороны других подсистем, возможности проявления триггерных (спусковых) механизмов энерговыделения.

Недостаточно изучены особенности проявления в геокосмосе воздействий от мощных источников энерговыделения как естественного, так и техногенного происхождения. Незнание этих особенностей не позволяет производить их селекцию на фоне других воздействий, а значит, и создавать системы своевременного предупреждения о грозящих стране или человечеству опасностях, возникающих при землетрясениях, извержениях вулканов, авариях на энергоемких производствах, военных объектах и т.п.

Поэтому актуальным и перспективным направлением исследований геокосмической среды и вариаций атмосферно-космической погоды является их изучение в рамках системной парадигмы.

Получение новых научных знаний тормозилось отсутствием ионосферных ИСЗ. Новый толчок в таких исследованиях должна дать реализация проектов «Ионосат-Микро» и «Ионосат».

Уровень исследований. Основы системной парадигмы, касающейся физики геокосмоса и процессов, протекающих в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ), были заложены в Украине еще в 1980-х гг. автором работ [6—10]. Им же организова-

ны и проведены обширные исследования в кооперации с другими научными подразделениями целого комплекса физико-химических процессов в геокосмосе, вызываемых геокосмическими бурями [11, 12], солнечными затмениями [13, 14], движением солнечного терминатора [15], воздействием на ионосферную плазму мощного радиоизлучения [16], стартов и полетов космических аппаратов [15, 17, 18], мощных взрывов [3, 19, 20], техногенных катастроф [19—21], военных действий [16, 21] и т.п., а также исследования состояния геокосмоса в спокойных условиях.

В ходе исследований было установлено или подтверждено, что нестационарные процессы на Солнце, мощное энерговыделение во внутренних и внешних геооболочках, техногенное воздействие приводят к целому комплексу физико-химических процессов во всех геооболочках и в геокосмосе, в частности, к активизации взаимодействий подсистем в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ), к перераспределению энергии, вещества между подсистемами и т.п.

Взаимодействие между подсистемами осуществляется при помощи волн [16, 18, 21—23], потоков частиц [24], тепла и т.д.

Цели и задачи исследований. Целью наземного сопровождения космического проекта «Ионосат-Микро» является изучение, моделирование и прогнозирование фундаментальных физико-химических процессов в геокосмосе естественного и техногенного происхождения, влияющих на функционирование средств телекоммуникаций, энергетических систем, производств, на самочувствие и здоровье человека и т.п.

Задачи исследований, опирающиеся на результаты измерений в ходе реализации наземно-космического проекта, сводятся к следующему.

1. Изучение вклада процессов на Солнце, в космосе и на Земле (естественного и техногенного происхождения) в процессы в геокосмосе в целом и в вариации атмосферно-космической погоды в частности.

2. Разработка эмпирических и теоретических моделей основных процессов в геокосмосе, влияющих на состояние геокосмической среды и атмосферно-космической погоды.

3. Прогнозирование состояния геокосмической среды и вариаций атмосферно-космической погоды.

4. Прогнозирование откликов в подсистемах на высокоэнергетичные процессы, протекающих в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ): землетрясения, вулканическую активность, ураганы, смерчи, цунами и т.п.

5. Прогнозирование экологических последствий запусков и полетов космических аппаратов, воздействия мощного радиоизлучения, мощных взрывов, аварий на энергоемких производствах, военных базах и т.п.

Целью настоящей работы является краткая характеристика РФО ХНУ имени В.Н. Каразина, как средства исследования физических процессов в геокосмосе при наличии естественных и антропогенных возмущений в целом и в рамках космического проекта «Ионосат-Микро» в частности.

1. Радар частичных отражений

Радар предназначен для исследования процессов и получения высотных профилей параметров нижней (60—100 км) ионосферы при помощи частично отраженных (ЧО) сигналов. Структурная схема системы приведена на рис. 1. Конструктивно она реализована на базе ПЭВМ с подключенным к ней комплектом аппаратуры «КАМАК», радиоприемного устройства синтезаторного типа Р-399А «Катран», радиопередающего устройства импульсного излучения, синтезатора частоты Ч6-31 и соответствующих блоков управления ими.

Радиопередающее устройство выполнено по двухканальной схеме, имеет мощность до 50 кВт в импульсе на один канал, рабочий диапазон частот 1.5—

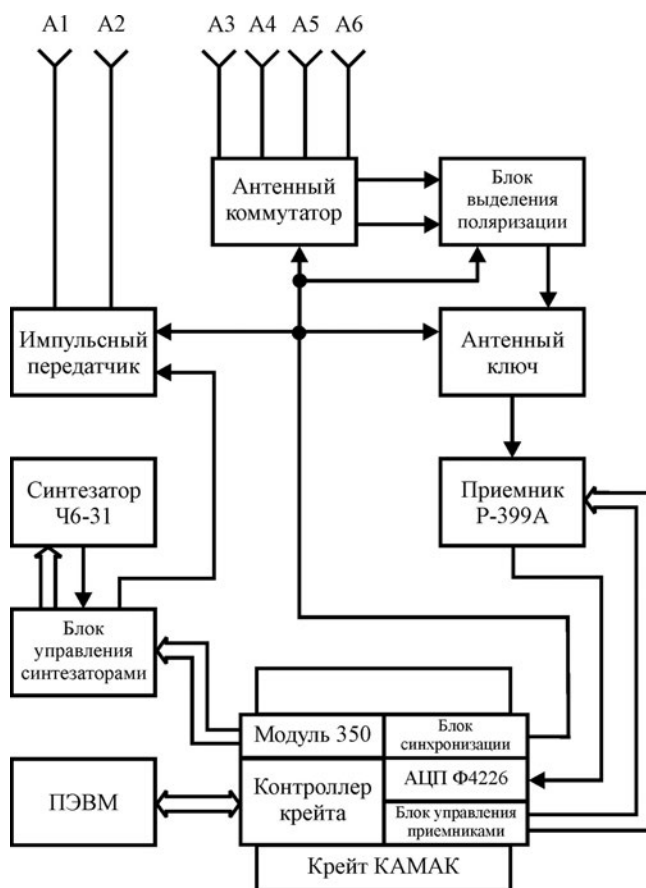


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратной системы радара частичных отражений. А1 — набор III элементов антенной решетки; А2 — набор VI элементов антенной решетки; А3 и А4 — наборы I и II элементов антенной решетки; А5 и А6 — наборы IV и V элементов антенной решетки; АЦП — аналого-цифровой преобразователь, ПЭВМ — персональная электронно-вычислительная машина



24 МГц (при неравномерности характеристики 3 дБ) и способно формировать импульсы длительностью от 25 до 100 мкс с частотой повторения до 40 Гц.

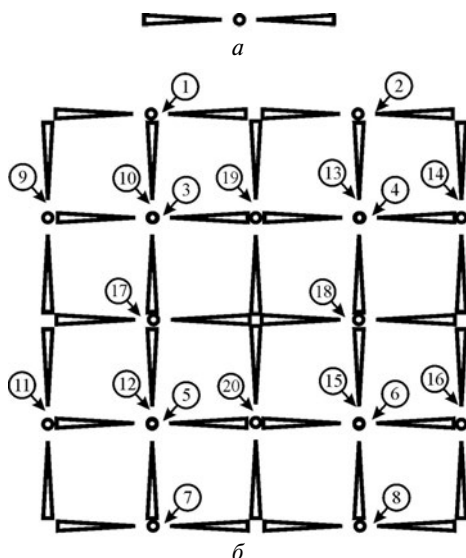
Блок управления синтезаторами частоты представляет собой двухканальное устройство, которое позволяет принимать от ЭВМ через стандартный модуль выводного регистра типа 350 аппаратуры «КАМАК» последовательность из 8 слов бинарного кода частоты настройки и формировать необходимый для синтезатора Ч6-31 восьмидекадный позиционный потенциальный код. Кроме того, для реализации импульсного режима модуляции, блок содержит два стробируемых усилителя мощности, на вход которых подается непрерывный сигнал синтезатора, а на выходе формируются радиоимпульсы, частота повторения и продолжительность которых задается либо от внешнего формирователя импульсов, либо формируется программно. Блок позволяет одновременно управлять работой двух синтезаторов частоты Ч6-31.

Блок управления радиоприемными устройствами типа Р-399А «Катран» также представляет собой двухканальное устройство, которое конструктивно выполнено в виде стандартного модуля крейта «КАМАК» двойной толщины. Приемники Р-399А работают в режиме полного дистанционного управления. На время излучения зондирующего импульса входы приемников отключаются от антенн с помощью специального антенного блока, в котором установлены аналоговые ключи. Блок управления позволяет одновременно контролировать состояние двух радиоприемных устройств типа Р-399А «Катран».

Радиоприемное устройство Р-399А «Катран», входящее в состав системы, имеет полосу пропускания усилителя 1-ой промежуточной частоты (ПЧ) шириной 40 кГц, а максимальная ширина полосы усилителя 2-ой ПЧ составляет лишь 10 кГц. Но для получения приемлемой разрешающей способности по высоте (≤ 3 км) следует использовать радиоимпульсы длительностью 20—25 мкс и шириной спектра свыше 40—50 кГц. Вдобавок к этому коммутационные помехи, которые возникают при срабатывании антенного ключа, имеют значительную амплитуду, что приводит к перегрузке штатного усилителя 2-ой ПЧ при работе с максимальной чувствительностью и длительному процессу его восстановления. По этим причинам был разработан и изготовлен новый стробируемый усилитель 2-ой ПЧ с такими параметрами: полоса пропускания 40 кГц по уровню -3 дБ, коэффициент усиления на частоте 215 кГц достигает 60 дБ.

Блок синхронизации радара предназначен для формирования основных импульсных последовательностей, необходимых для запуска передающего устройства, а также аналого-цифровых преобразователей (АЦП), которые выполняют оцифровку сигнала с выхода приемника в необходимом высотном диапазоне и с заданным шагом по высоте. Блок содержит пять трехканальных программируемых интервальных таймеров, скоммутированных с учетом специфики режима зондирования (поочередный прием необыкновенной и обыкновенной компонент ЧО сигналов), и конструктивно выполнен в виде стандартного модуля крейта «КАМАК» одинарной толщины. На его вход поступает опорный

Рис. 2. Схематическое изображение антенной системы радара: *а* — схематическое изображение антенного элемента типа двойной вертикальный ромб; *б* — антенная решетка диапазона частот 1,5–4,5 МГц



сигнал ТТЛ-уровня частотой 1 МГц, сформированный из стабильного опорного сигнала синтезатора частоты Ч6-31. Таким образом обеспечивается необходимая стабильность временных интервалов при фазовых измерениях.

Оцифровка принятого сигнала осуществляется парой модернизированных быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) типа Ф4226 из состава стандартных модулей комплекта аппаратуры «КАМАК». На их аналоговые входы поступает сигнал из усилителя 2-ой ПЧ $f = 215$ кГц приемника, а на цифровые входы — стробирующие и разметочные сигналы из блока синхронизации.

Антенная система радара представляет собой фазированную антенную решетку из 20 элементов, предназначенную для работы в диапазоне частот 1.5–4.5 МГц (рис. 2, б). Элементом решетки является двойная вертикальная ромбическая антенна Айзенберга (на рис. 2, а приведено условное графическое изображение элемента). Высота подвеса антенны — 20 м, а ее длина — 150 м.

Общий размер антенного поля составляет 300×300 м². Элементы антенной системы объединены в такие 6 наборов. Одну линейную поляризацию обеспечивают элементы: 1-2-3-4 (набор I), 5-6-7-8 (набор II) и 17-18 (набор III); другую — 9-10-11-12 (набор IV), 13-14-15-16 (набор V) и 19-20 (набор VI). Условная нумерация элементов приведена на рис. 2, б. Элементы каждого из наборов объединяются между собой фидерными линиями таким образом, что фазовый центр набора совпадает с его геометрическим центром. От фазового центра каждого набора к панели антенного коммутатора проведена отдельная фидерная линия. С помощью этих 6 наборов оперативно формируются разные комбинации антенных решеток для излучения и приема радиосигналов в режиме измерения сигналов частичных отражений (режим «ЧО»), или определения скорости ветрового движения мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации (режим «Ветры»).

Передающая антенная решетка в обоих режимах состоит из наборов III и VI, которые подключены к первому и второму каналам импульсного передающего устройства соответственно. Для приема сигналов в режиме «ЧО» наборы I и II одной линейной поляризации включаются параллельно, сигнал с них

подается на первый вход блока выделения обыкновенной и необыкновенной поляризаций. Наборы IV и V также соединяются параллельно между собой, сигнал подается на другой вход блока выделения поляризации. Расчетный коэффициент усиления по мощности для этой решетки $G \approx 200$.

В режиме определения скорости дрейфа ионосферных неоднородностей наборы I и II поочередно подключаются к первому входу блока выделения поляризаций, а IV и V — ко второму таким образом, что циклично реализуются все четыре комбинации одновременного подключения наборов ортогональных линейных поляризаций. В результате поочередно формируются четыре антенны круговой поляризации, фазовые центры которых размещены в углах квадрата со стороной около 112 м. С их помощью реализуется пространственно разнесенный прием ЧО радиосигналов, необходимый для последующего расчета пространственных корреляционных функций.

Для согласования импедансов приемно-передающего оборудования с антенными решетками и симметрирования используются широкополосные трансформаторы и делители мощности типа длинная линия, выполненные на ферритовых сердечниках. Соединение элементов антенн между собой и с согласующими трансформаторами выполнено с помощью двухпроводных воздушных и коаксиальных фидерных линий.

Внешний вид приемно-передающего оборудования радара ЧО приведен на рис. 3 (см. цветную вкладку).

2. Доплеровский радар вертикального зондирования

Радар вертикального зондирования используется для регистрации динамических процессов в ионосфере на высотах 100—400 км, вызванных различными источниками.

Основные параметры радара: диапазон частот $f = 1 - 24$ МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства — 1 кВт, длительность зондирующего импульса $\tau \approx 500$ мкс, частота повторения импульсов — 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства — 10 Гц.

Антенная система представляет собой вертикальный ромб с $G \approx 1-10$ в зависимости от частоты зондирующей волны. При таком потенциале радара отношение сигнал/помеха q в ночное время может достигать 10^5-10^6 . В дневное время q обычно на 1—2 порядка меньше.

Радар сопряжен с персональным компьютером, образуя программно-аппаратную систему, осуществляющую измерения и предварительную обработку отраженного от ионосферы сигнала в реальном масштабе времени.

Высотная протяженность отраженного сигнала существенно превышает величину $ct/2 \approx 75$ км (c — скорость света в вакууме). Поэтому используется стробирование по высоте с дискретностью $\Delta z = 75$ км в диапазоне действующих высот $z' = 75-450$ км. В основном канале амплитуда сигнала принимает максимальные значения, в других каналах она была заметно меньше.

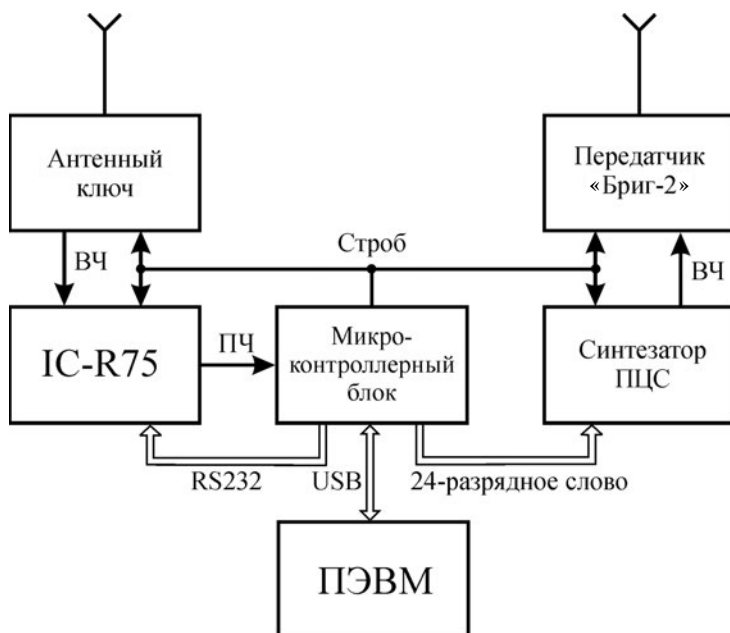


Рис. 5. Блок-схема цифрового ионозонда

Внешний вид приемно-передающего оборудования доплеровского радара вертикального зондирования приведен на рис. 4 (см. цветную вкладку).

3. Цифровой ионозонд

Блок-схема цифрового ионозонда приведена на рис. 5. Он включает в себя доработанное широкополосное радиопередающее устройство «Бриг-2», радиоприемное устройство IC-R75, синтезатор прямого цифрового синтеза (ПЦС) для формирования излучаемых радиоимпульсов нужной частоты и продолжительности, а также микроконтроллерный блок, который осуществляет общую синхронизацию работы ионозонда, оцифровку принятого радиосигнала и поддерживает связь с внешней персональной вычислительной машиной (ПЭВМ).

Радиопередающее устройство. Зондирующие радиоимпульсы длительностью 100 мкс с частотой следования 125 Гц, несущей частотой в диапазоне 1—16 МГц и мощностью до 1.5 кВт в импульсе излучаются широкополосным радиочастотным усилителем мощности передатчика «Бриг-2».

Радиоприемное устройство IC-R75 выполнено по супергетеродинной схеме с тройным преобразованием частоты. Самая широкая полоса пропускания равняется 15 кГц, что достаточно для работы с радиоимпульсами указанной длительности. Входные цепи приемника разработаны для условий функционирования рядом с передатчиками, т.е. имеют достаточный динамический диапазон и цепи

защиты от перегрузок. Для дистанционного управления приемником в нем предусмотрен последовательный интерфейс в стандарте RS232 и связной протокол с развитым набором команд. Доработка приемника заключается в установке дополнительных разъемов на корпусе. К одному из разъемов подключается выход усилителя 3-ей промежуточной частоты и дальше этот сигнал подается на амплитудный детектор в микроконтроллерном блоке. Через второй разъем на внутренние цепи подавления импульсных помех подается импульс запирающего на время излучения зондирующего радиоимпульса. На антенный вход приемника принятый высокочастотный сигнал подается через антенный ключ, который также запирается на время излучения зондирующего радиоимпульса.

Синтезатор ПЧ выполнен на современной интегральной микросхемной базе и позволяет синтезировать сигнал частотой до 25 МГц, имеет время перестройки с частоты на частоту меньше 1 мкс и способен формировать радиоимпульсы заданной продолжительности. Для установления частоты генерации и режима работы синтезатора используется 24-разрядная шина связи, по которой от микроконтроллерного блока передаются 24-разрядные слова управления. Для формирования ВЧ радиоимпульсов нужной продолжительности в блок синтезатора также поступает соответствующий строб.

Обмен информацией между микроконтроллерным блоком и внешней ПЭВМ происходит по стандартной шине USB.

Антенная система. Ионозонд использует для излучения и приема радиоволн вертикальные широкополосные ромбические антенны Айзенберга. Высота подвеса антенн равняется 18 м, а их горизонтальный размер достигает 50 м.

Внешний вид приемно-передающего оборудования цифрового ионозонда приведен на рис. 6 (см. цветную вкладку).

4. Программно-аппаратная система многочастотного зондирования

Для исследования характеристик радиоволн, отраженных от ионосферы, и нестационарных процессов в ионосферной плазме служит система пассивного наклонного радиозондирования ионосферы. Система может работать в режиме доплеровского радиозондирования с использованием радиосигналов, распространяющихся на наклонных трассах, или в режиме панорамных измерений радиопомеховой обстановки.

Источником сигналов для режима доплеровского зондирования являются станции радиовещания, радионавигации, службы точного времени или же радиоизлучение специализированного радиопередающего устройства.

Режим панорамных измерений основан на анализе в заданном диапазоне частот статистических характеристик мощности электромагнитного поля, которое является суперпозицией узкополосных излучений удаленных радиопередающих устройств различного назначения и шумоподобных радиопомех, генерируемых

естественными и искусственными источниками. При этом диапазон частот выбирается относительно широким, чтобы в него с большой вероятностью попадало достаточное количество узкополосных удаленных источников радиоизлучения.

Программное обеспечение системы пассивного радиозондирования ионосферы включает набор тестовых программ для проверки и ремонта отдельных узлов блока управления радиоприемными устройствами, измерительные программы для двух вышеупомянутых режимов работы, а также программы для обработки и анализа экспериментальных данных.

Конструктивно система реализована на базе персонального компьютера с подключенным к нему блоком управления радиоприемниками синтезаторного типа Р-399А (для приема радиосигналов в диапазоне 1—32 МГц) и Р-391В2 (для приема радиосигналов в диапазоне частот 50 кГц — 2 МГц), блока третьих смесителей частоты с фильтрами нижних частот и синтезатора частоты Ч6-31 в качестве общего 3-го гетеродина, а также распределителя антенного сигнала. Сигнал частотой 5 МГц от опорного генератора одного из приемников является общим для всех остальных приемников, а также для программируемого делителя частоты запуска аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Термостатированные опорные генераторы использованных радиоприемных устройств и синтезатора Ч6-31 по паспорту обеспечивают суммарную долговременную относительную нестабильность частотно-временных параметров приемной системы не хуже $5 \cdot 10^{-8}$. Реальное ее значение почти на порядок меньше.

Режим доплеровского радиозондирования является основным рабочим режимом. Структурная схема системы для этого режима приведена на рис. 7. Блок управления позволяет одновременно управлять состоянием пяти радиоприемных устройств. Этот блок принимает от компьютера через согласующие интерфейсные блоки (БИФ1 и БИФ2) и сохраняет во внутренних регистрах плат управления (ПУ1-ПУ5) бинарные коды информации, которые определяют частоту настройки соответствующего радиоприемного устройства, род его работы, ширину полосы пропускания усилителя промежуточной частоты (УПЧ), коэффициент усиления УПЧ и значение ослабления входного аттенюатора. Для управления коэффициентом усиления УПЧ на каждой плате предусмотрен десятипозиционный цифро-аналоговый преобразователь, каждая следующая позиция которого уменьшает амплитуду выходного сигнала в 2 раза по сравнению с предыдущей. Радиоприемные устройства работают в режиме полного дистанционного управления, что позволяет с помощью одного радиоприемного устройства циклически производить измерения на нескольких (до четырех) радиотрассах со своими уникальными установками усиления для каждой частоты. При этом удается сохранить заданную разрешающую способность как по частоте, так и по времени.

На антенные входы радиоприемных устройств сигнал поступает с распределителя антенного сигнала (АР). С выходов усилителей 2-ой промежуточной частоты приемников радиосигналы частотой 215 кГц и шириной полосы 300

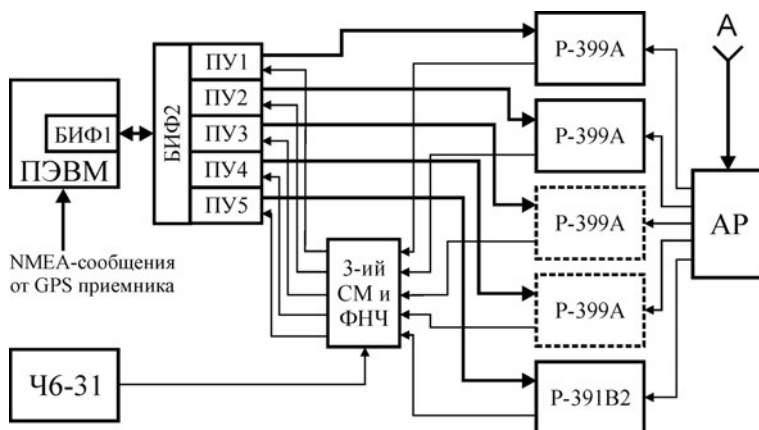


Рис. 7. Структурная схема программно-аппаратной системы пассивного зондирования ионосферы. ПЭВМ — персональная электронно-вычислительная машина, БИФ1 и БИФ2 — согласующие интерфейсные блоки, ПУ1-ПУ5 — платы управления приемниками, P-399A — приемник радиосигналов декаметрового диапазона (пунктирный контур приемника указывает на перспективную возможность его подключения), P-391B2 — приемник радиосигналов гектометрового диапазона, А — приемная антенна, АР — распределитель антенного сигнала, Ч6-31 — синтезатор сигнала 3-го гетеродина, 3-ий СМ и ФНЧ — блок 3-их смесителей частоты и фильтров нижних частот

Гц поступают в блок третьих смесителей частоты и фильтров нижних частот (3-ий СМ и ФНЧ). На выходе фильтров нижних частот присутствуют аналоговые сигналы в полосе частот 0—300 Гц. Они преобразуются с помощью 10-разрядных АЦП типа Ф7077М/1, установленных на соответствующих платах управления, в цифровой вид с частотой дискретизации 600 Гц. Поток цифровых данных из АЦП считывается компьютером, работающим под управлением измерительной программы, и производится его дальнейшая программная обработка в реальном масштабе времени. В процессе этой обработки последовательно производится фильтрация данных узкополосным цифровым фильтром и децимация с коэффициентом 15.

Для цифровой фильтрации синтезирован оптимальный полосовой фильтр с конечной импульсной характеристикой. Этому типу фильтров присуща абсолютная устойчивость к различного рода погрешностям данных, они имеют линейную фазовую характеристику и достаточно просто синтезируются по таким заданным параметрам, как длина фильтра, ширина полосы на уровнях пропускания и задержания, а также соотношение неравномерностей амплитудно-частотных характеристик в полосах пропускания и задержания. Здесь оптимальность полосового фильтра понимается в смысле максимального подавления в полосе задержания при заданных параметрах.

Синтезированный цифровой фильтр длиной 120 точек имеет ширину полосы пропускания $0.04 f_N$ на уровне 0.1 (здесь f_N — частота дискретизации),

центральная частота равняется $0,25 f_N$, а коэффициент подавления внеполосных составляющих превышает 40 дБ. В нашем случае $f_N = 600$ Гц, поэтому на выходе такого фильтра остается сигнал с центральной частотой 150 Гц и шириной полосы приблизительно 20 Гц.

Следующая затем децимация с коэффициентом 15 преобразует его в сигнал с полосой от 0 до 20 Гц при частоте дискретизации 40 Гц. Собственно эти данные, блоками по 512 точек (или по 12,8 с времени измерения) с описательным заголовком, сохраняются в едином суточном файле экспериментальных данных на компьютере. В заголовке каждого блока данных фиксируется время начала регистрации данного блока и частота принимаемого при этом радиосигнала. Временная привязка данных осуществляется по сигналу GPS приемника.

В перечень функций измерительной программы входит также слежение за уровнем принимаемого радиосигнала и автоматическая корректировка текущих значений коэффициентов усиления УПЧ и входных аттенюаторов приемников для исключения динамической перегрузки или пропадания сигнала. Эти текущие значения учитываются при расчете амплитуды цифровых сигналов, записываемых в файл регистрации.

Обработка данных доплеровского зондирования заключается в выделении из суточного файла блоков данных измерения на конкретной радиочастоте, получении по ним спектральных оценок с заданной точностью и частотным разрешением, выявлении на них основных мод радиосигнала (этими модами могут быть как различные магнитоионные компоненты, так и лучи, отражающиеся от различных ионосферных слоев), а также исследовании динамики этих мод.

Спектральный анализ основывается на параметрическом описании случайного процесса, который порождается суммой отраженных от ионосферы и принятых приемником радиосигналов, а конкретнее на модели авторегрессионного (АР) процесса. Эта модель хорошо описывает данные измерений при ограниченном числе сильных мод и отношении сигнал/помеха порядка или более 10 дБ. Для расчета коэффициентов АР модели реализован метод совместной минимизации квадратичных ошибок прямого и обратного линейного предсказания (модифицированный ковариационный метод). Вычисленные по этим коэффициентам АР спектры позволяют для наших данных определять частоту моды с точностью до 10—20 мГц, а разрешение по частоте достигает 60—80 мГц.

В случае обработки более низкочастотных (до 150—200 кГц) радиосигналов перед АР анализом необходима дополнительная цифровая обработка когерентной последовательности фрагментов с общей продолжительностью 192 с. Она включает узкополосную (с полосой $\sim 1,33$ Гц относительно центральной частоты 10 Гц) фильтрацию данных и перенесение выделенного фрагмента спектра в область 0—1,33 Гц. В результате удастся определять частоту моды радиосигнала с точностью до 0,6 мГц, а разрешение по частоте может достигать 3 мГц. Результаты численного моделирования свидетельствует, что вариации частот гармоник с учетом точности методики восстанавливаются практически без ошибок,

а вариации амплитуд могут приобрести паразитную интермодуляцию в пределах 5—10 %, синфазную с девиациями частоты гармоник. Однако соотношение между амплитудами восстановленных гармоник близко к истинному.

Режим панорамных измерений. В этом случае блок 3-их смесителей частоты и ФНЧ не используется — вместо него включаются обычные амплитудные детекторы, с выхода которых сигнал подается непосредственно на АЦП. Значение полосы пропускания УПЧ в этом режиме устанавливается 6 кГц, а частота запуска АЦП — 10 кГц. Диапазон сканируемых частот устанавливается равным полному рабочему диапазону приемника, либо его части. Шаг перестройки по частоте составляет 5 кГц. На каждой частоте производится выборка 100 значений амплитуды сигнала, которые затем корректируются в соответствии с текущими показаниями входного аттенюатора и позиции ЦАП регулятора усиления УПЧ, усредняются по амплитуде и мощности, а результаты сохраняются в суточном файле регистрации на компьютере. Максимальная длительность сканирования всех частот в диапазоне 1—31 МГц с учетом времен перестройки приемника и измерения не превышает 2 мин. Этот режим является вспомогательным. Он может использоваться как с целью поиска удобных для доплеровских измерений вещательных станций, так и в качестве независимого метода исследования состояния ионосферы по вариациям уровня шумового радиоизлучения.

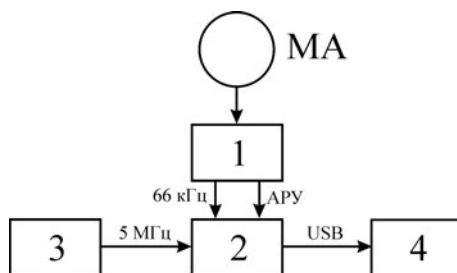
Мониторинг нижней ионосферы. С целью непрерывного мониторинга нижней ионосферы реализован пассивный метод измерения искажений параметров (амплитуды и фазы) радиосигнала, который распространяется в естественном волноводе, образованном земной поверхностью и нижней ионосферой. Поэтому изучение вариаций амплитудно-фазовых параметров радиосигналов этого диапазона позволяет получить сведения о процессах, которые протекают именно в нижней ионосфере. Для такого мониторинга пригодны сигналы неспециализированных для ионосферных исследований систем навигации и служб эталонных частот и времени, которые работают в низкочастотном (НЧ) и очень низкочастотном (ОНЧ) диапазонах (частоты 10—100 кГц). В частности, мы используем сигналы станции РБУ службы эталонных сигналов частоты и времени ($f = 66^2/3$ кГц), расположенной вблизи г. Москва (Россия).

Блок-схема системы, созданной для исследования ионосферных вариаций фазы и амплитуды сигнала станции РБУ, приведена на рис. 8, а ее внешний вид — на рис. 9 (см. цветную вкладку).

Система создана на базе доработанного приемника-компаратора ПК-66. Его выходные сигналы радиочастоты (66 кГц) и цепи автоматической регулировки усиления (АРУ) поступают на разработанный измерительно-регистрирующий блок, в котором осуществляется первичная обработка и регистрация фазо-амплитудных данных.

Для целей автоматизированного измерения искажений характеристик фазы сигналов при их распространении в природном волноводе «земля—ионосфе-

Рис. 8. Блок-схема системы для исследования ионосферных вариаций фазы и амплитуды сигнала станции РБУ. МА — рамочная магнитная антенна; 1 — доработанный приемник-компаратор ПК-66; 2 — измерительно-регистрирующий блок; 3 — рубидиевый стандарт частоты Ч1-69; 4 — USB флэш-накопитель



ра» выбран аппаратный метод синхронного детектирования усредненных на четвертьпериодных интервалах времени квадратурных компонент сигнала с микропрограммной реализацией определения по ним фазы и устранения неоднозначности обратных тригонометрических функций в интервале углов $0-360^\circ$. Этот метод удовлетворительно работает с зашумленными сигналами и имеет сравнительно простую аппаратную реализацию на современных микроэлектронных элементах. Отсчеты фазы, усредненные на секундных интервалах времени, раз в секунду сохраняются в файлах на внешнем USB флэш-накопителе.

Сигнал с выхода схемы АРУ приемника ПК-66, который несет информацию об амплитуде принимаемого сигнала, также преобразуется в цифровой вид и сохраняется на внешнем носителе вместе с отсчетами фазы.

Стабильность время-частотных параметров системы (значение долговременной относительной нестабильности частоты образцового сигнала порядка $(1-2) \cdot 10^{-11}$ и относительная погрешность установки его частоты не хуже 10^{-10}) обеспечивает внутренний (FE-5680A) для измерительно-регистрирующего блока, либо внешний (Ч1-69) рубидиевый стандарт частот.

Пример результатов мониторинга космической погоды представлен на рис. 10. Здесь приведены вариации средней фазы (I) и амплитуды (II) отраженного от ионосферы радиосигнала станции РБУ, зарегистрированные в г. Харьков (расстояние до пункта излучения около 720 км в северном направлении) в период 11—14 января 2013 г. в околополуденное время суток с 08:00LT по 16:00LT. Геомагнитное поле характеризовалось как спокойное со среднесуточным индексом $K_{p \max} = 1$ для 11—12 января и $K_{p \max} = 3$ для 13—14 января. В интервалы регистраций попали две солнечные рентгеновские вспышки класса M1, имевшие место в 09:11UT 11 января и 08:38UT 13 января 2013 г. На рис. 10 также приведены записи вариаций потока солнечного рентгеновского излучения (III) в полосах 0,05—0,4 нм (сплошные линии) и 0,1—0,8 нм (пунктир), зарегистрированные спутником GOES—15 в это же время. Данные получены со страницы интернет-ресурса www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/lists.html.

Из рисунка наряду с суточным ходом фазы и амплитуды радиоволны видна четкая реакция сигнальных параметров на вспышки: кратковременные уменьшения фазы на $100-150^\circ$ и увеличения амплитуды до двух раз. Высокая чувствительность данного средства мониторинга демонстрируется реакцией и

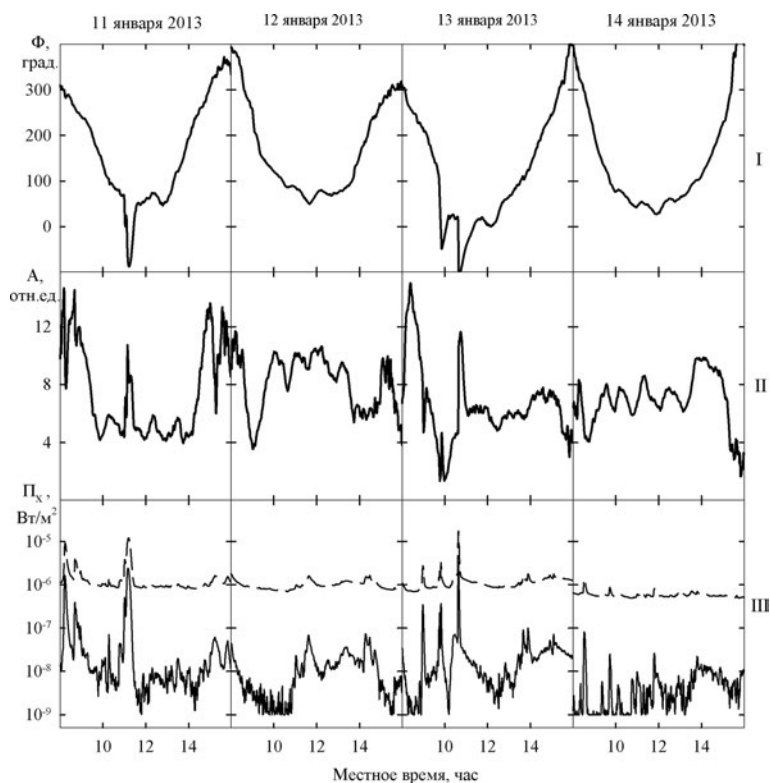


Рис. 10. Вариации средней фазы (I) и амплитуды (II) отраженного от ионосферы сигнала станции РБУ (г. Москва), зарегистрированные в г. Харьков в околополуденное время суток с 11 до 14 января 2013 г., а также регистрации потока солнечного рентгеновского излучения (III) в диапазонах 0,05—0,4 нм (сплошные линии) и 0,1—0,8 нм (пунктир) на спутнике GOES—15

на более слабую вспышку С класса, имевшую место 13 января 2013 г. перед основной. Такое поведение параметров радиоволны характерно при образовании слоя ионизации с резким градиентом электронной плотности ниже высоты отражения в невозмущенной ионосфере.

Другой пример результатов мониторинга космической погоды представлен на рис. 11. Одновременный прием сигналов радиостанций «Horizont» (вблизи г. София, Болгария, излучаемая мощность 75 кВт, расстояние около 1300 км) и «Радио России» (вблизи г. Москва, Россия, излучаемая мощность до 2500 кВт, обычно 100—150 кВт, расстояние около 790 км) на частоте 261 кГц производился непрерывно с 24 до 26 мая 2012 г.

Общая геофизическая обстановка в данный период характеризовалась процессами восстановления после магнитной бури средней интенсивности ($K_p \text{ max} = 5$), имевшей место в начале суток 23 мая 2012 г. Значение разноса между частотами сигналов несущей составляет $\sim 0,6$ Гц, т.е. линии обеих стан-

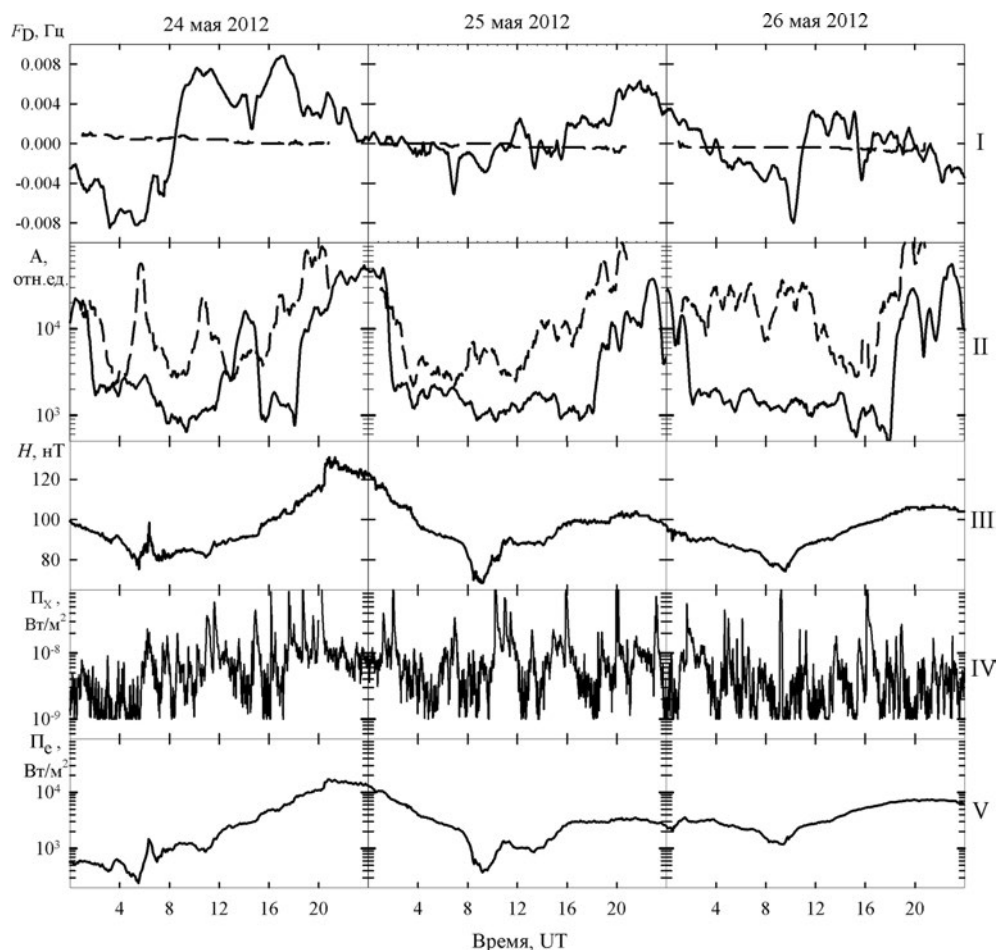


Рис. 11. Вариации доплеровского смещения частоты (I) и амплитуды (II) несущей сигнала станции «Horizont», г. София, (сплошная линия) и «Радио России», г. Москва, (пунктир), зарегистрированные вблизи г. Харьков, а также полной напряженности геомагнитного поля (III), потока солнечного рентгеновского излучения в полосе 0,05–0,4 нм (IV) и потока энергичных электронов с $E > 2$ МэВ (V) по данным спутника GOES–15 в эксперименте с 24 до 26 мая 2012 г.

ций одновременно присутствуют в анализируемом спектре и уверенно различаются при спектральной обработке. Первая и вторая сверху панели на рис. 11 иллюстрируют ход их доплеровского смещения частоты (ДСЧ) и амплитуды соответственно. Непрерывная линия приведена для сигнала станции «Horizont», пунктирная — «Радио России». Ионосферный сигнал российской станции теряется на фоне более мощной земной волны, имеющей практически нулевое ДСЧ: за трое суток оно практически линейно изменилось на величину ~ 3 мГц и, по-видимому, связано с долговременной неста-

бильностью опорной частоты приемно-измерительной системы (относительная суточная нестабильность $\sim 3 \cdot 10^{-9}$).

Временные вариации амплитуды не имеют ярко выраженного суточного хода, а их значительная величина может свидетельствовать об интерференции волн. Ионосферный сигнал более удаленной болгарской станции, наоборот, преобладает в месте приема, суточные вариации ДСЧ достигают значения 5 — 8 мГц, а изменение его амплитуды четко отслеживает моменты восхода и захода Солнца на высотах нижней ионосферы (60—90 км). Остальные панели рисунка представляют геофизические данные, зарегистрированные спутником GOES—15 в этот период: напряженность полного геомагнитного поля (третья панель сверху), поток солнечного рентгеновского излучения в полосе 0,05—0,4 нм (четвертая панель сверху) и поток электронов с энергией более 2 МэВ (пятая панель сверху). Данные также получены со страницы интернет-ресурса www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/lists.html.

Сопоставление приведенных данных свидетельствует о положительной корреляции между вариациями ДСЧ болгарской станции и потока солнечного рентгеновского излучения в светлое время суток. Определенное сходство вариаций последнего наблюдается и с длинно- и среднепериодными (4—5 часов и менее) изменениями амплитуды сигнала станции «Радио России». Возможно, это связано с возникновением в нижней ионосфере резких слоев повышенной ионизации, уменьшающих эффективную высоту отражения радиоволны и увеличивающих коэффициент отражения. Взаимосвязь вариаций сигнальных параметров с поведением магнитного поля и потока энергичных электронов не обнаружена.

5. Многоцелевой комплекс УВЧ-зондирования

Комплекс создан на базе радара ультравысокочастотного (УВЧ) диапазона (рис. 12, см. на цветной вкладке). Предназначен для исследования геокосмоса в следующих трех основных режимах.

1. Режим мезосферно-стратосферно-тропосферной радиолокации. Предназначен для исследования процессов в нейтральной атмосфере в диапазоне высот 5—100 км.

2. Режим некогерентного рассеяния. Этот режим предназначен для исследования процессов в ионосфере в диапазоне высот 80—1000 км.

3. Пассивный режим. В этом режиме в качестве информационного выступает радиоизлучение геокосмоса на длине волны $\lambda \approx 15$ см.

Основные параметры многоцелевого комплекса следующие: импульсная мощность радиопередающего устройства — около 100 МВт, диаметр полноповоротной антенны — 15 м, ее коэффициент усиления — около $5 \cdot 10^4$, несущая частота — около 2 ГГц, длительность импульса $\tau \geq 10$ мкс, шумовая температура радиоприемного устройства определяется системой охлаждения до температуры жидкого гелия.

6. Система приема сигналов навигационных ИСЗ

Исследование ионосферы при помощи сигналов навигационных ИСЗ традиционно проводилось на когерентных частотах 150 и 400 МГц. Для этой цели использовались как низкоорбитные (~1000 км), так и высокоорбитные ИСЗ.

В последние годы исследования ведутся при помощи навигационных ИСЗ систем GPS и «Глонасс».

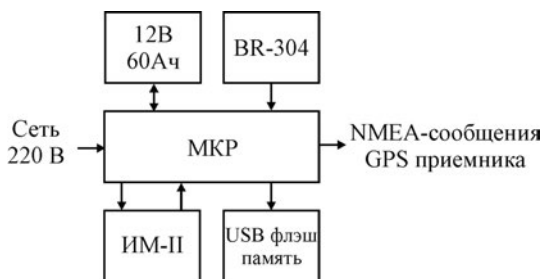
Приемные системы показаны на рис. 13 (см. цветную вкладку).

7. Магнитометр-флюксметр

С начала 2001 г. на измерительном пункте в пос. Граково проводятся непрерывные наблюдения вариаций H - и D -компонент геомагнитного поля при помощи созданной магнитометрической системы. Его основой является индуктивный магнитометр-флюксметр ИМ-II, который изготовлялся малой серией в ОКБ Института физики Земли (ИФЗ) РАН в конце 1980-х гг. Он обладает высокой чувствительностью (0,5—500 пТ в диапазоне периодов 1—1000 с соответственно) и достаточно широкой полосой исследуемых частот (от 0,001 до 1 Гц). Чувствительность ограничивается уровнем внутренних шумов усилителей активных индуктивных датчиков и динамическим диапазоном использованного аналого-цифрового преобразователя.

Структурная схема магнитометрической системы приведена на рис. 14. Магнитометр ИМ-II подключен к специализированному микроконтроллерному регистратору (МКР), который производит оцифровку и предварительную фильтрацию на интервалах 0,5 с магнитометрических сигналов, а также сохранение отфильтрованных отсчетов и времени их получения в энергонезависимой USB флэш-памяти. Дополнительно МКР выполняет функции блока бесперебойного питания — он осуществляет контроль заряда аккумуляторной батареи и наличия напряжения в электросети. В случае необходимости активизируется зарядная цепь резервного аккумулятора, переключается питание магнитометрической системы на аккумулятор при пропадании напряжения в электросети, а также производится отключение аккумулятора в случае его глубокого разряда. МКР также получает от приемника GPS сигналов BR-304 стандартные NMEA-сообщения с информацией о текущих дате и времени,

Рис. 14. Структурная схема магнитометрической системы. 12 В, 60 АТ ч — аккумуляторная батарея; BR-304 — приемник сигналов GPS; МКР — микроконтроллерный регистратор; ИМ-II — магнитометр-флюксметр; USB флэш-память — энергонезависимый накопитель информации емкостью 4 ГБ





транслирует их далее на систему пассивного многочастотного радиозондирования, а также ежесуточно корректирует по ним показания собственных энергонезависимых часов.

Мощность, потребляемая системой, составляет примерно 6 Вт, что обеспечивает около 120 часов его автономной работы от аккумулятора. Внешний вид регистратора приведен в левой части рис. 15 (см. цветную вкладку), а магнитометрической системы в целом — в правой части.

Достоверность данных, регистрируемых магнитометром, периодически контролировалась при помощи магнитометров ИФЗ РАН, Института геофизики НАН Украины и Радиоастрономического института НАН Украины. В частности, проводилось сравнение с результатами, полученными от неподалеку расположенного независимого прибора с аналогичными характеристиками. Использовались регистрации геомагнитного поля в пункте наблюдения в с. Мартовое Харьковской области, Украина (низкочастотная обсерватория Радиоастрономического института НАНУ), где установлена метеомагнитная станция LEMI-017 разработки Львовского Центра Института космических исследований НАНУ НАКАУ с разрешающей способностью по времени 1 с и чувствительностью до 10 пТ. Расстояние между пунктами Граково и Мартовое приблизительно равно 35 км в меридианальном направлении.

Применение методики взаимного корреляционного анализа зарегистрированных вариаций H - и D -компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов 10—100 с на интервалах времени длительностью 1 час показало, что коэффициент корреляции достигал значения 0,99 (особенно для записей H -компоненты геомагнитного поля), а величины среднеквадратического отклонения вариаций на разных магнитометрах были практически равными. Смещения максимумов корреляционных функций не превышали разрешающей способности магнитометров по времени, а именно $\pm 1,5$ с.

8. Перспективы исследований

Для продолжения регулярных исследований физико-химических процессов в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ), вариаций атмосферно-космической погоды, их моделирования и прогнозирования необходимо следующее.

1. Создать приборы бортового базирования, запустить специализированные спутники-кластеры (типа «Ионосат»), предназначенные для исследования физико-химических процессов в геокосмосе, определяющих состояние космической погоды, реакцию геокосмической среды на воздействие мощных источников энерговыделения на Солнце, под поверхностью Земли, на ее поверхности, в других геооболочках. Проект «Ионосат-Микро» может и должен послужить первым этапом более масштабного проекта.

2. Развить и модифицировать существующие средства наземного базирования подспутникового мониторинга, разработать новые средства дистанци-

онного радиозондирования геокосмоса. Разработать методологию согласованных наземно-космических исследований.

3. Провести теоретические исследования, направленные на изучение взаимодействия подсистем в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ), моделирование и прогнозирование физико-химических процессов в геокосмосе и вариаций атмосферно-космической погоды.

4. Создать пространственно-временные модели основных физико-химических процессов в геокосмосе, взаимодействия подсистем в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ), вариаций атмосферно-космической погоды.

5. Разработать методологию, способы и алгоритмы прогнозирования проявлений в геокосмосе мощных катастрофических процессов (землетрясений, ураганов, смерчей, цунами и т.п.) и антропогенных воздействий.

6. Получить исходные данные для проектирования оптимизированных средств предупреждения о природных катастрофах и последствиях техногенных воздействий. Разработать высокоэффективные программно-аппаратные средства прогнозирования.

7. Изучить влияние процессов в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ) на самочувствие и здоровье человека и способы минимизации их негативного влияния.

9. Применение результатов

Полученные в рамках проекта «Ионосат-Микро» новые сведения о физико-химических процессах в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ) будут иметь мировоззренческий аспект — они помогут по-новому взглянуть на процессы в геокосмосе, лучше понять взаимодействие подсистем, место и роль человека в указанной системе, влияние этих процессов на самочувствие и здоровье человека.

Полученные в ходе исследований новые результаты о процессах в геокосмосе будут иметь научно-познавательное значение — они позволят лучше понять взаимосвязь физико-химических процессов в подсистемах, взаимодействие самих подсистем, их устойчивость к воздействиям, возможность проявления триггерных механизмов высвобождения энергии и т.п.

Практическая значимость планируемых исследований заключается в разработке методологии, способов, алгоритмов и средств прогнозирования влияния высокоэнергетических процессов в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ) на функционирование космических аппаратов, наземных энергетических систем, энергоемких производств, средств телекоммуникаций, транспорта, человека, его самочувствие и здоровье и т.п.

Полученные в ходе исследований новые сведения позволят усовершенствовать систему образования в ведущих университетах Украины — поставить новые курсы, дополнить существующие, подготовить специалистов высшей квалификации.

Разработанные в ходе исследований эффективные средства предупреждения о грозящих природных катастрофах и экологических последствиях техно-



генных аварий будут иметь и экономическое значение — будут сэкономлены значительные средства, идущие на ликвидацию последствий катастроф природного и техногенного характера.

Разработанные в ходе исследований эффективные средства предупреждения о грозящих природных и техногенных катастрофах имеют большое социально-общественное значение. Они позволят сохранить жизнь и здоровье больших контингентов людей.

10. Выводы

1. Радиофизическая обсерватория — современное автоматизированное и компьютеризированное средство исследования физических процессов в гео-космосе в естественных и возмущенных условиях. В РФО ХНУ имени В.Н. Каразина функционирует комплекс дистанционного зондирования, содержащий ряд многоцелевых программно-аппаратных систем, обладающих высокой степенью автоматизации процесса измерений, высокими техническими характеристиками и оснащенных программными средствами, использующими современные методы цифровой обработки данных. Все системы непрерывно модернизируются и совершенствуются.

Обсерватория может функционировать как автономно, так и успешно использоваться для наземного сопровождения космических экспериментов в целом и космического проекта «Ионосат-Микро» в частности.

2. Выполнены исследования физических процессов в геокосмосе в течение четырёх циклов солнечной активности.

3. Изучены физические процессы, сопровождавшие свыше 300 геокосмических бурь различной интенсивности.

4. Изучены физические процессы, сопровождавшие около 5000 стартов ракет полетов и посадок космических аппаратов. Старты ракет производились с космодромов России, США, Китая и других стран.

5. Изучены физические процессы, сопровождавшие свыше 5000 землетрясений, имевших место с конца 1960-х гг. по 2012 г.

6. Изучены физические процессы, сопровождавшие свыше 300 подземных ядерных взрывов, имевших место на полигонах бывшего СССР, США, Китая, Северной Кореи и других стран.

7. Изучены физические процессы, сопровождавшие работу нагревных стендов.

8. По результатам исследований опубликовано более 2000 научных работ и 30 книг (см., например, [16, 18, 21, 23, 25—30]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лизунов Г.В., Федоров О.П., Корепанов В.Е. Космический проект «Ионосат-Микро»: задачи и комплекс научной аппаратуры // Космічні дослідження в Україні 2010—2012. — 2012. — С. 12—15.

2. *Korepanov V., Lizunov G., Fedorov O., Yampolsky Yu., Ivchenko V.* Ionosat — ionospheric satellite cluster // *Adv. Space Res.*, — 2008. — V. 42. — P. 1515—1522.
3. *Garmash K.P., Gokov A.M., Kostrov L.S., Rozumenko V.T., Tyrnov O.F., Fedorenko Y.P., Tsybal A.M., and Chernogor L.F.* Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities // *Telecommunications and Radio Engineering*. — 1999. — V. 53, No. 4—5. — P. 6—20. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation // *Telecommunications and Radio Engineering*. — 1999. — V. 53, No. 6. — P. 1—22.
4. *Гармаш К.П., Гритчин А.И., Мартыненко С.И., Поднос В.А., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф., Федоренко В.Н., Федоренко Ю.П., Цымбал А.М., Черногор Л.Ф.* Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина: Исследование околоземной космической среды // 19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: Материалы конференции 14—18 сентября 2009 г. — Севастополь, Крым, Украина, 2009. — С. 943—944.
5. *Гармаш К.П., Леус С.Г., Поднос В.А., Похилько С.Н., Тырнов О.Ф., Цымбал А.М., Черногор Л.Ф.* Модернизированный измерительный пункт Радиофизической обсерватории ХНУ имени В.Н. Каразина // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка*. — 2010. — Вып. 17, № 942. — С. 101—108.
6. *Черногор Л.Ф.* Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // *Радиофизика и радиоастрономия*. — 2003. — Т. 8, № 1. — С. 59—106.
7. *Черногор Л.Ф.* Земля — атмосфера — геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // *Космічна наука і технологія*. — 2003. — Т. 9, № 5/6. — С. 96—105.
8. *Черногор Л.Ф.* «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // *Нелинейный мир*. — 2006. — Т. 4, № 12. — С. 655—697. 2 // *Нелинейный мир*. — 2007. — Т. 5, № 4. — С. 198—231.
9. *Zalyubovsky I., Chernogor L., Rozumenko V.* The Earth — Atmosphere — Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena // *Space Research in Ukraine*. 2006 — 2008. Kyiv. — 2008. — P. 19—9.
10. *Chernogor L.F., Rozumenko V.T.* Earth — Atmosphere — Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // *Radio Physics and Radio Astronomy*. — 2008. — V. 13, № 2. — P. 120—137.
11. *Panasenko S.V., Chernogor L.F.* Event of the November 7 — 10, 2004 Magnetic Storm in the Lower Ionosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2007. — V. 47, No 5. — P. 608—620.
12. *Chernogor, L.F., Grigorenko Ye.I., Lysenko V.N., and Taran V.I.* Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // *Int. J. Geomagn. Aeron.* — 2007. — V. 7, G13001 — doi:10.1029/2005G1000125.
13. *Chernogor L.F.* Effects of Solar Eclipses in the Surface Atmosphere // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2008. — V. 44, No 4. — P. 432—447.
14. *Chernogor L.F.* Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008 // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2010. — V. 50, № 3. — P. 346—361.
15. *Burmaka V.P., Kostrov L.S., Chernogor L.F.* Statistics of Signals of the HF Doppler Radar Sensing the Bottomside Ionosphere Disturbed by Rocket Launches and Solar Terminator // *Telecommunications and Radio Engineering*. — 2004. — V. 61, No 2—6. — P. 150—177.
16. *Черногор Л.Ф.* О нелинейности в природе и науке. — Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. — 528 с.
17. *Chernogor L.F.* Geomagnetic Field Fluctuations near Kharkov, which Accompanied Rocket Launches from the Baikonur Site // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2009. — V. 49, № 3. — P. 384—396.
18. *Черногор Л.Ф.* Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. — 386 с.



19. Черногор Л.Ф. Взрывы боеприпасов на военных базах — источник экологических катастроф в Украине // *Екологія і ресурси*. — 2004. — № 10. — С. 55—67.
20. Черногор Л.Ф. Взрывы на газопроводах и аварии на газовых хранилищах — источник экологических катастроф в Украине // *Екологія і ресурси*. — 2008. — № 3. — С. 56—72.
21. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф. — Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. — 556 с.
22. Burmaka V.P., Taran V.I., Chernogor L.F. Wave-Like Processes in the Ionosphere under Quiet and Disturbed Conditions. 1. Kharkov Incoherent Scatter Radar Observations // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2006. — V. 46, No. 2. — P. 183—198.
23. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. — 576 с.
24. Chernogor L.F., Garmash K.P., Rozumenko V.T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // *Radio Physics and Radio Astronomy*. — 1998. — V. 3, No 2. — P. 191—197.
25. Черногор Л.Ф. Современная наука о природе: Интегрирующий курс естествознания. Издание второе, дополненное. — Х.: ХГУ им. А.М. Горького, 1999. — 362 с.
26. Черногор Л.Ф. Нелинейная радиофизика. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2004. — 200 с.
27. Черногор Л.Ф. Нелінійна радіофізика. — Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2006. — 200 с.
28. Черногор Л.Ф. Естествознание: Интегрирующий курс. Издание второе, дополненное и исправленное. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2007. — 536 с.
29. Черногор Л.Ф. Дистанционное радиозондирование атмосферы и космоса. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. — 500 с.
30. Черногор Л.Ф. Космос, Земля, человек: актуальные проблемы. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2010. — 192 с.

СЛУЖБА СОЛНЦА УКРАИНЫ КАК НАЗЕМНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТА «ИОНОСАТ-МИКРО»

А.Е. ВОЛЬВАЧ, Н.Н. СТЕПАНЯН, Ю.Ф. ЮРОВСКИЙ

Введение

С двухленточной белой вспышки, которую зарисовал Кэррингтон 1 сентября 1859 г., начинается современная солнечно-земная физика. Последствия этой вспышки — полярные сияния на Кубе, выход из строя телеграфных аппаратов и пр. Это была впервые документально зафиксированная техногенная катастрофа, вызванная вспышкой на Солнце. С тех пор получено много подтверждений огромного влияния Солнца на состояние межпланетной среды, околоземного космического пространства, атмосферы, биосферы и техносферы Земли. «Квебекское событие», обесточившее в марте 1987 г. Канаду на 9 часов, и оплавившее обмотки силового трансформатора атомной электростанции также было вызвано мощной вспышкой. Отсюда вытекает необходимость изучения физики Солнца и многообразных аспектов солнечно-земных связей, в том числе предусматриваемых проектом «Ионосат-Микро».

Наблюдения Солнца

Известно, что во время солнечных вспышек, корональных выбросов масс и высокоскоростных потоков солнечного ветра существенно возрастает поток коротковолнового и радиоизлучения, растет поток, скорость и энергия заряженных частиц, испускаемых Солнцем (см. рис. 1 на цветной вкладке). Заряженные частицы достигают орбиты Земли через 2–5 суток, и это запаздывание позволяет предпринять меры для уменьшения нежелательных последствий влияния корпускулярного потока. При этом наиболее геоэффективными являются события, происходящие в западной полусфере Солнца. Следовательно, необходимо знать их координаты для оценки возможных последствий.

Важную информацию о солнечной активности содержит радиоизлучение Солнца. В отличие от видимого спектра, поток радиоизлучения Солнца с изменением активности меняется в десятки и тысячи раз, поэтому его свойства являются весьма чувствительным индикатором солнечных событий. Сантиметровые радиоволны содержат сведения о физических условиях зоны энерговыведения вспышки. Излучение метрового диапазона волн генерируется в



Рис. 2. Высоты выхода радиоизлучения разных диапазонов длин волн из атмосферы Солнца

короне, где формируются корпускулярные потоки. Схематически это показано на рис. 2. Вспышечное возмущение распространяется во внешние слои короны и генерирует при этом радиоизлучение понижающейся частоты, что дает динамический спектр, описывающий изменение интенсивности и частоты излучения со временем (см. рис. 3 на цветной вкладке). По характеру спектра можно определить скорость распространения возмущения, генерируемую полосу частот, интенсивность энерговыделения и другие сведения о физических условиях в солнечной короне.

По запаздыванию излучения на разных частотах определяется момент прихода корпускулярного потока на Землю (рис. 4). Интенсивность всплесков позволяет оценить ожидаемый масштаб геофизических возмущений. Поэтому наблюдения радиоизлучения в широком диапазоне частот являются очень информативными и отображают текущую активность Солнца.

Реакция Земли на излучение и потоки частиц от Солнца

Земля обладает мощными средствами защиты от потоков коротковолнового излучения и заряженных частиц. Магнитосфера Земли направляет заряженные частицы к полюсам. Озоновый слой не пропускает ультрафиолетовое излучение. Тем не менее, солнечные вспышки сопровождаются увеличением ионизации атмосферы Земли, изменением озонового слоя, усилением интенсивности космических лучей, ростом электрического поля Земли и т.д. Корпускулярные потоки вызывают магнитные бури и полярные сияния.

Верхняя ионизованная часть атмосферы Земли — ионосфера. Основным источник ее ионизации — ультрафиолетовое излучение Солнца, а также мягкое рентгеновское излучение. Влияют на ионизацию верхней атмосферы и корпускулярные потоки.

Заслуживает внимания также влияние на состояние ионосферы запусков мощных ракет и вывод на орбиту ИСЗ, которые сопровождаются выбросом большого количества продуктов сгорания топлива реактивных двигательных устройств. Каждый такой пролет образует местные провалы в электронной концентрации. Возникающие возмущения распространяются в ионосфере и регистрируются на соответствующих станциях. Но отличить их от вариаций состояния ионосферы,

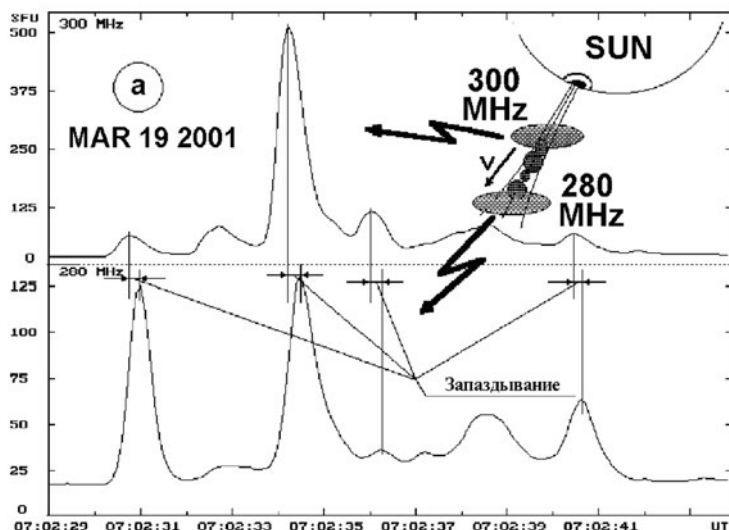


Рис. 4. Запаздывание радиосигналов разной частоты

обусловленных изменениями солнечной активности, можно только располагая сведениями о ее текущем состоянии и качественном прогнозе.

От распределения электронной концентрации в ионосфере зависит распространение радиоволн, которое существенно определяет работу ряда радиосистем, таких как дистанционные системы контроля и управления, навигация (GPS и ГЛОНАСС), системы посадки самолетов, радиосвязь и т.п. Следовательно, многие виды технической деятельности человечества подвержены влиянию солнечной активности. Изменение при вспышках приземного электрического поля отрицательно воздействует на человека, его здоровье и психику. При вспышках растет число обострений сердечно-сосудистых заболеваний, наблюдается замедление реакции у летчиков и водителей автомобилей.

Прогнозы солнечной активности

Для успешного использования данных, планируемых в проекте «Ионосат-Микро», необходимы прогнозы солнечной активности, так как данные проекта относятся к уже совершившимся событиям. Прогнозы солнечной активности разделяются по срокам, на которые дается прогноз. Обычно рассматриваются 4 типа прогнозов разной заблаговременности:

1) *Диагностика*. Основа диагностики — наблюдение происхождения события и прогнозирование его последствий. Из наблюдений в линии Н-альфа определяется балл вспышки по яркости и площади, структура, координаты, длительность, сопутствующие изменения вблизи вспышки. По космическим наблюдениям вспышки в рентгене определяется рентгеновский балл вспыш-

ки, наличие корональных выбросов масс. Наблюдения потока радиоизлучения на нескольких длинах волн также являются основой диагностики вспышек. По всем этим данным определяется, дойдет ли поток заряженных частиц до Земли, когда это произойдет и какие события на Земле можно ожидать.

2) *Краткосрочный прогноз.* Для краткосрочного прогноза вспышек с заблаговременностью от нескольких часов до 3 дней необходимы наблюдения магнитных полей солнечных пятен и их изменения со временем, определение яркости и площадей флоккулов в активных областях, динамических процессов на уровне фотосферы, хромосферы и короны. Для этого используются наземные наблюдения в линии Н-альфа, Н и К кальция, в инфракрасной линии HeI 1083 нм и потоки радиоизлучения на нескольких длинах волн.

3) *Среднесрочный прогноз.* Объекты среднесрочного прогноза — возникновение и эволюция активных областей. При среднесрочном прогнозе рассматривается время, соизмеримое с оборотом Солнца (27 дней) Прогноз эволюции активных областей строится на наблюдениях Солнца в белом свете и в отдельных спектральных линиях (Н-альфа, Н и К кальция, HeI 1083 нм). Используются также измерения магнитных полей солнечных пятен, определения площадей пятен и их числа в группах. изменение этих параметров со временем.

4) *Долгосрочный прогноз.* Долгосрочные прогнозы определяют характеристики 11-летнего солнечного цикла. Прогнозируемыми параметрами обычно являются даты начала, максимума и конца цикла, максимальные и минимальные значения среднемесячных чисел Вольфа. Существует много методов прогноза солнечного цикла, основанных, как правило, на знании чисел Вольфа за прошлые циклы.

Все типы прогнозов создаются на основе статистических исследований исходных параметров — отдельных характеристик солнечной активности, получаемых из регулярных наблюдений Солнца в разных спектральных диапазонах, от жесткого рентгена до длинноволнового радиоизлучения. Обычно для прогноза определяются по многим наблюдениям, предшествующим реальным событиям (например, вспышкам), значения исходных параметров, за которыми последовала вспышка, и затем по величине текущих наблюдаемых параметров оценивается вероятность наступления прогнозируемого события. Следовательно, для составления прогноза необходимо иметь архив данных прошлых наблюдений и располагать текущими измерениями данных.

Исследования в КраО, поддерживающие ионосферные и космические эксперименты

Участие КраО в космических экспериментах и в их наземной поддержке имеет долгую историю. Начиная с третьего полета космонавтов, КраО выдавала ежедневные прогнозы солнечных вспышек во время нахождения человека в космосе на основе наблюдений, проводимых солнечными обсерватория-

ми Советского Союза. Оправдываемость прогнозов составляла более 80%. Тогда же были опубликованы серии работ по созданию методов прогноза на основе наземных оптических и радионаблюдений.

С тех пор в КрАО проведены многие исследования, касающиеся физической природы вспышек. Изучены предвспышечные изменения, происходящие в активных областях. Найдена связь характеристик корональных дыр с высокоскоростными потоками солнечного ветра. Изучены причинно-следственные связи вспышек и корональных выбросов масс. Установка, позволяющая в режиме мониторинга записывать темновые токи регистрирующих систем, выявила связь этих измерений с уровнем солнечной активности и геофизическими индексами.

В планах КрАО на 2013–2015 гг. предусмотрено выполнение проектов «Структура и динамика магнитного поля и нестационарных процессов в атмосфере Солнца» в лаборатории физики Солнца и «Исследование объектов Солнечной системы, Солнца и Земли по данным гелиофизических и геодинимических измерений телескопами КрАО» в лаборатории радиоастрономии. В частности, предполагается получить следующие результаты.

Четыре оптических телескопа и четыре радиотелескопа КрАО ведут наблюдения Солнца в режиме мониторинга и алертов. Данные о них приведены ниже.

Интеграция радиоастрономического диагностического комплекса, созданного на базе радиотелескопа РТ-22 и трех малых радиотелескопов, к Всемирной Службе мониторинга солнечной активности, которая включает 14 наземных станций в кооперации с орбитальными обсерваториями, что дает доступ к 24-часовому ежедневному объему информации в широком диапазоне длин волн о событиях, которые происходят на Солнце и влияют на земные процессы.

Будет определена связь движения вещества в активной области с другими физическими параметрами, обуславливающая выход магнитного поля в атмосферу Солнца. Это позволит повысить надежность прогноза солнечной активности.

Знание характеристик крупномасштабных комплексов солнечных образований в широком диапазоне высот в атмосфере Солнца внесет поправки в теорию эволюции солнечной активности и изменения в методы ее прогноза.

Найденные особенности эруптивного вспышечного процесса, приводящего к выбросу вещества и магнитного поля в межпланетное пространство, позволят построить эмпирические модели температурного режима во вспышечной атмосфере. Параметры линейной поляризации Н-альфа эмиссии вспышек, определенные в ходе проекта, дадут сведения о соотношении протонов и электронов, ускоренных во вспышке. Найденная роль магнитного поля во вспышечном процессе и знание критериев готовности активной области к вспышке уточнят теории вспышек и их прогноз.

Выяснение роли ударных волн и токовых слоев в ускорении солнечных космических лучей улучшит прогноз геоэффективности космических лучей.



Выявление механизмов влияния Солнца на физико-химические процессы на Земле и в околоземном пространстве улучшит знания о природе воздействия Солнца на техносферу и биосферу Земли.

Служба Солнца

Ввиду явной необходимости отслеживать состояние солнечной активности, прогнозировать и, по возможности, предотвращать ее отрицательное воздействие на многие стороны жизни человека, на съезде Украинской астрономической Ассоциации в 2012 г. было принято решение о создании Службы Солнца Украины. Шесть учреждений, ведущих наблюдения Солнца, подписали договор о сотрудничестве с целью создания единой Службы Солнца Украины и введения ее во всемирную сеть центров, аккумулирующих наблюдения Солнца телескопами наземных и космических обсерваторий. Несомненно, что участие Украины в международном сотрудничестве будет очень плодотворным и взаимовыгодным.

Список проводимых в 2012 г. этими обсерваториями наблюдений и их скважность приведен в таблице 1. Алерт предполагает наблюдения отдельных событий, представляющих интерес для совместных программ.

В работе Службы Солнца Украины будут задействованы следующие телескопы обсерваторий Украины.

Таблица 1

Наблюдения Солнца в 2012 г. в Украине

Организация вид наблюдений	КРАО	ГАО	КНУ	ХНУ	ЛНУ
Изображения Солнца в белом свете			Алерт		Алерт
Изображения Солнца в Н-альфа	Ежедневно				Алерт
Изображения Солнца в линии HeI 1083 нм	Ежедневно			Алерт	
Допплерограммы АО в HeI 1083 нм	Ежедневно			Алерт	
Спектрограммы участков Солнца	Алерт	Алерт	Алерт		
Изображения Солнца в K CaII 393.4 нм	Алерт			Алерт	
Магнитные поля пятен	Ежедневно		Ежедневно		
Числа Вольфа	Ежедневно				
ОМП	Ежедневно				
Лучевая скорость фотосферы	Ежедневно				
Поток радиоизлучения на 4 частотах	Ежедневно				

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины (ГАО)

Горизонтальный телескоп АЦУ-5, фокус главного зеркала — 17,5 м, диаметр — 45 см, изображение Солнца 162 мм. Телескоп снабжен спектрографом АСП-20, работающим в режиме однократного прохождения (фокусное расстояние 7 м, разрешение в 4 порядке ~ 350000). Регистрация спектра проводится с камерой SBIG-8300M.

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко (КНУ)

Горизонтальный солнечный телескоп (ГСТ). Диаметр главного зеркала телескопа 30 см, фокус 12,5 м. Телескоп снабжен эшелъным спектрографом, фотогидом, спектрогелиоскопом и магнитографом и позволяет получать за одну экспозицию спектр почти всей видимой области (от 3800 до 6600 Å) на одну фотопластинку размером 18×24 или 24×24 см. Спектральное разрешение спектрографа — около 30 мÅ в зеленой области спектра.

160-мм солнечный телескоп системы Кассегрена. Телескоп создан в 2010-2011 гг. и имеет пространственное разрешение 1", а гелиограммы получаются с помощью CCD матрицы. Телескоп дает изображения, приближающиеся по качеству к зарубежным аналогам.

НИИ «Крымская астрономическая обсерватория» (КрАО)

Башенный телескоп БСТ-1, главное зеркало 90 см, фокус 70 м. Телескоп снабжен спектрографом и двулучевым магнитографом (рис. 5).

Башенный телескоп БСТ-2, два главных зеркала 45 см и 20 см, Система кассегренов, позволяющая получить фокус от 8 до 30 м. Спектрограф оснащен двумя решетками и тремя камерами (рис. 6).

Внезатменный коронограф КГ-2, оснащенный спектрографом и фильтром Н-альфа (рис. 7).

Внезатменный коронограф КГ-1, позволяющий получить изображение Солнца в центре и крыльях линии Н-альфа с интерференционно-поляризационным фильтром (рис. 7).

Радиотелескопы РТ-22, РТ-2, РТ-3 и РТ-М, измеряющие поток радиоизлучения Солнца на волнах от сантиметров до метров и хромосферный телескоп с фотогелиографом АФР-2, оснащенный интерференционно-поляризационным фильтром Н-альфа (см. рис. 8 на цветной вкладке).

Львовский национальный университет имени Ивана Франко (ЛНУ)

100 мм фотогелиограф, $F 1 : 100$, $F = 1000$ мм, полно апертурный нейтральный фильтр, приемник — фотоаппарат SONY ALFA850, разрешающая способность 3—4".



Рис. 5. Башня (слева) и целостатная группа (справа) телескопа БСТ-1

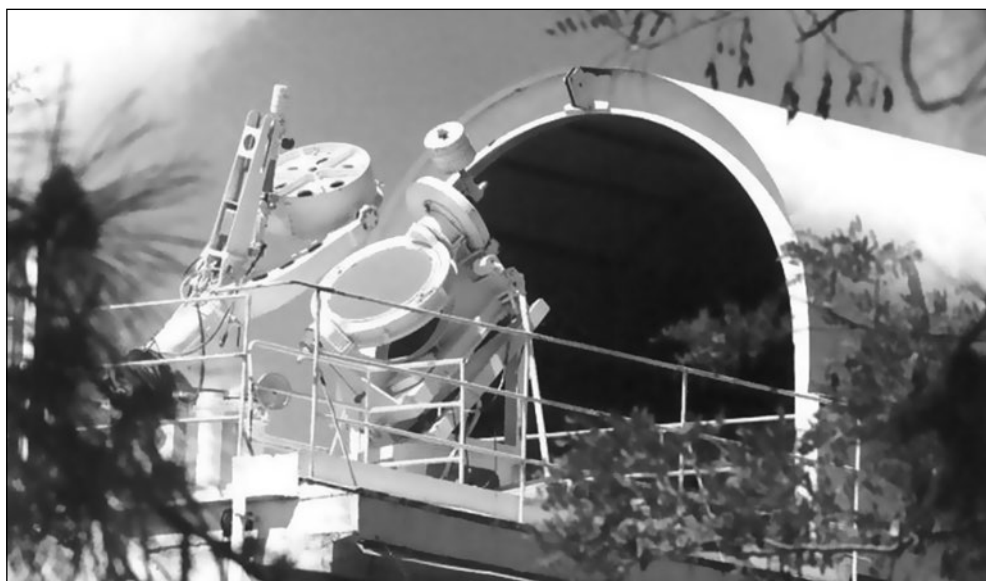


Рис. 6. Целостатная группа телескопа БСТ-2

АФР-2 с оптикой согласования с фотоприемником, фильтр ИПФ-4 (старый), приемник изображения Sony ALFA850 (в перспективе ПЗЗ-камера). Ведутся работы по установке фотосферной трубы АФР-2 с оптикой согласования

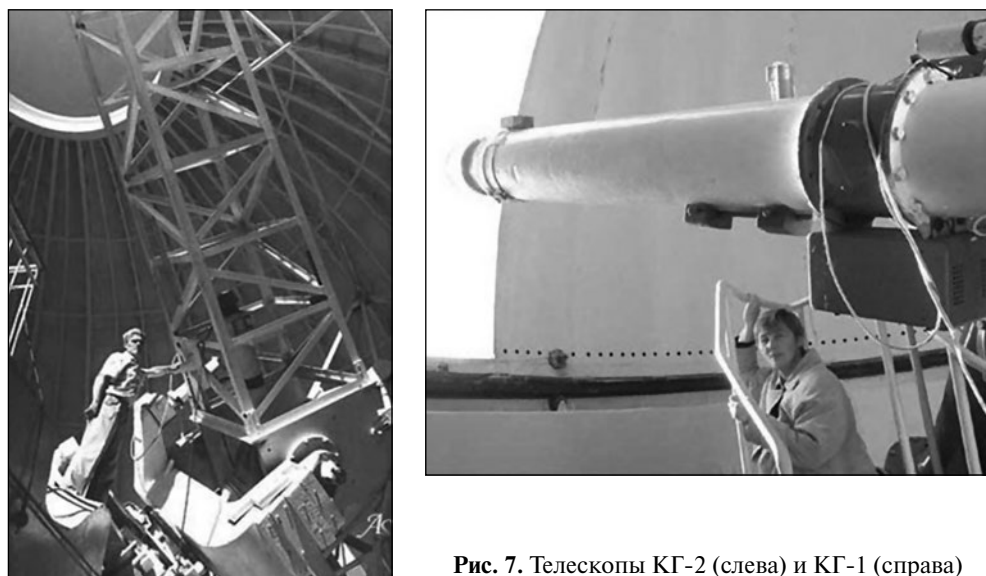


Рис. 7. Телескопы КГ-2 (слева) и КГ-1 (справа)

с приемником. Приемник 1.3 Мпикс, быстродействующая черно-белая CMOS-камера с возможностью работы в режиме online.

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина (ХНУ)

Спектрогелиограф ХНУ. Апертура прибора — 100 мм, используется 1-й порядок дифракционной решетки 1200 штр/мм. Спектрогелиограф оснащен ПЗС матрицей 718×575 пикселей.

Новый двулучевой спектрогелиограф (апертура 200 мм) для автоматизированных наблюдений одновременно в линиях Н-альфа водорода и HeI 1083 нм. Согласно проекту оптика прибора должна обеспечивать угловое разрешение $\leq 1''$ и спектральное разрешение 0.01 нм в диапазоне 390—1083 нм.

Ниже приведен список сайтов участников Службы Солнца Украины. Жирным подчеркнутым шрифтом выделены сайты, на которых уже выставляются данные солнечных наблюдений.

Обсерватория		Сайт
ГАО		http://www.mao.kiev.ua
КНУ		http://www.observ.univ.kiev.ua
КрАО	Общий сайт	http://www.crao.crimea.ua
	Лаборатория физики Солнца	http://solar.crao.crimea.ua
	Лаборатория радиоастрономии	http://crao.crimea.ua/lra/Solar_Radio.htm
	Служба Солнца CRIM	http://swc.crao.crimea.ua
ЛНУ		http://www.astro.franko.lviv.ua
ХНУ		http://www.astron.kharkov.ua/ssm



В число первоочередных задач входит создание единого сайта «Служба Солнца Украины», выставление получаемых данных на нем и хранение баз данных этих наблюдений. Создание Службы Солнца на первом этапе предусматривает перевод обсерваториями уже имеющихся видов наблюдений на ежедневные.

Заключение

Крымская астрофизическая обсерватория располагает комплексом действующих инструментов для наземного обеспечения исследований проекта «Ионосат-Микро» с целью полноценного использования его данных и для этого может осуществлять:

- Мониторинг в оптическом и радио-диапазонах солнечных образований, излучение которых создает земную ионосферу и определяет ее свойства.
- Благодаря участию в Международных проектах КрАО имеет доступ к круглосуточным данным о состоянии солнечной активности, сведения о которой необходимы для оценки текущего уровня ионизирующего излучения, определяющего состояния ионосферы, измеряемой спутником «Микросат» с комплексом научной аппаратуры «Ионосат-Микро».
- Руководство проектом «Служба Солнца Украины» позволит КрАО создать банк данных разных видов наблюдений, используемых для диагностики и прогноза солнечных событий, влияющих в том числе и на ионосферу.

Квалификация и опыт сотрудников КрАО (научный потенциал) обеспечивает усовершенствование методов прогнозирования солнечной активности и связанных с ней геоэффективных событий.

Имеющееся в КрАО современное оборудование (цифровые приемники данных и устройства их обработки) позволяет проводить наземное обеспечение ионосферных и космических экспериментов в масштабе реального времени, что необходимо для успешного использования данных проекта «Ионосат-Микро» в целях улучшения работы ряда радиосистем, таких как дистанционные системы контроля и управления, навигация (GPS и ГЛОНАСС), системы посадки самолетов, радиосвязь и другие виды технической деятельности человечества.

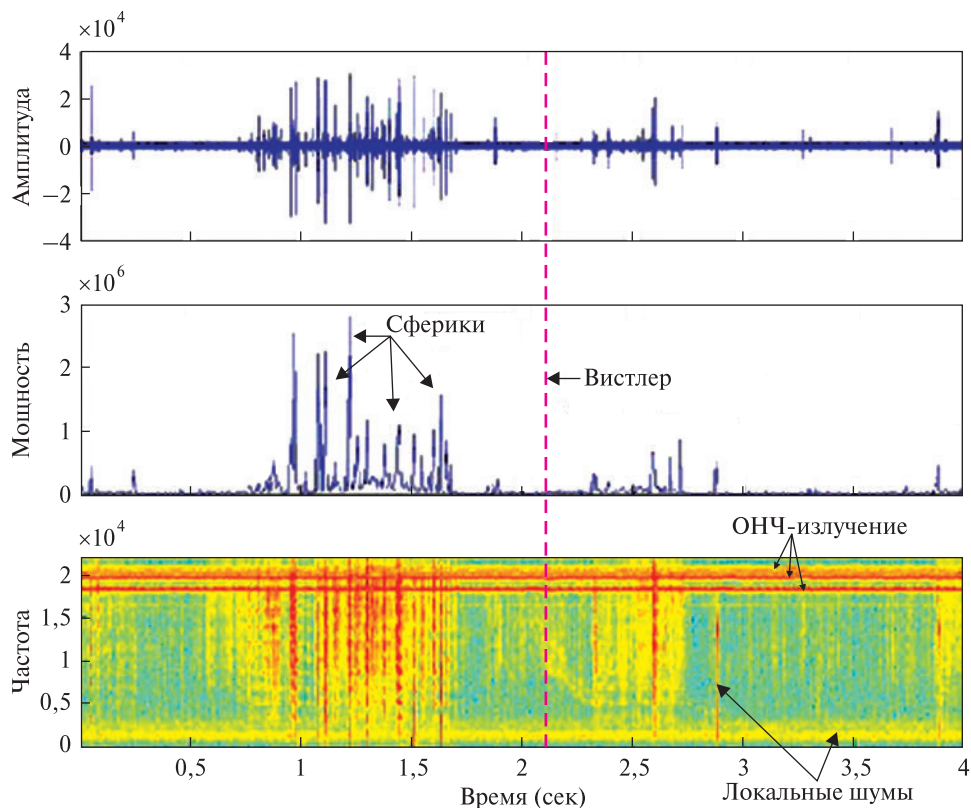


Рис. 1. Характерный вид ОНЧ электромагнитного сигнала, зарегистрированного на наземной станции «Тихань» (Венгрия). Верхняя панель — амплитуда сигнала, средняя — мощность (обе величины представлены в некалиброванных телеметрических единицах), нижняя панель — динамический спектр (частота представлена в Гц, цветовая шкала — в относительных логарифмических единицах). Вистлерный сигнал не заметен на верхних двух рисунках, но различим на нижнем. Вертикальная пунктирная линия идентифицирует момент прихода вистлера, имеющего в этот момент частоту около 10 ГГц

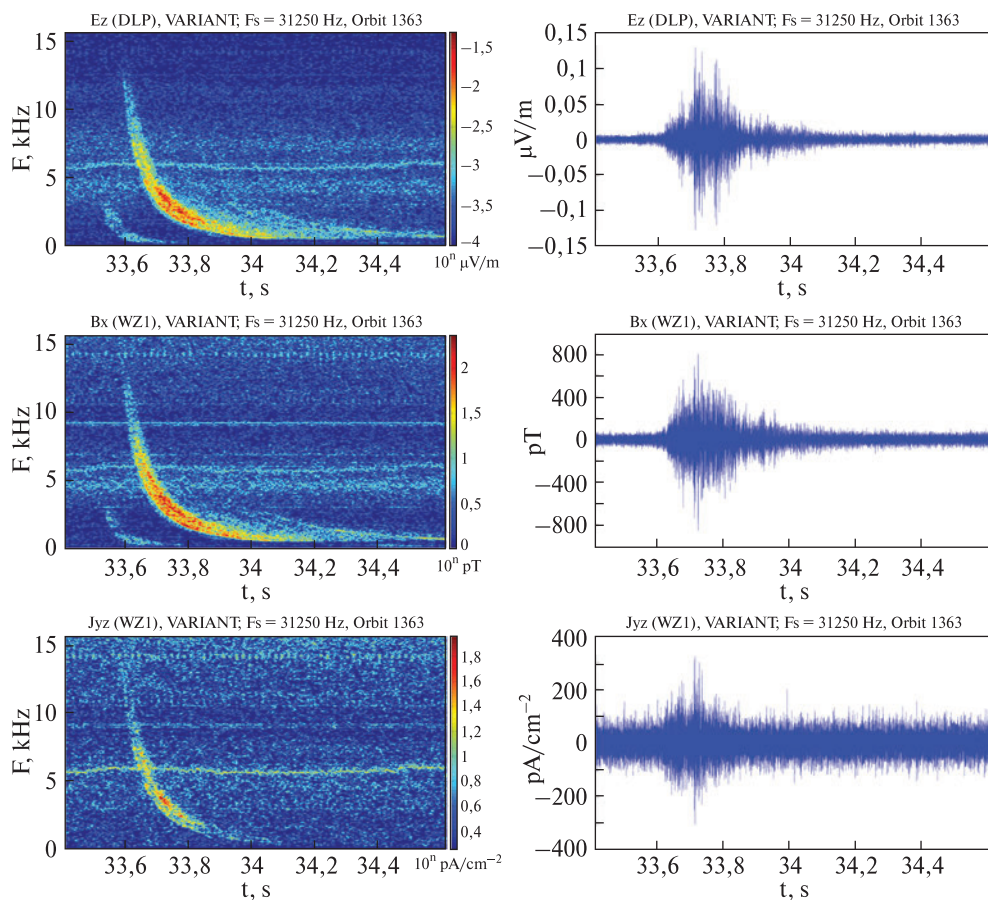


Рис. 2. Характерные спектрограммы и волновые формы вистлерных сигналов, зарегистрированные аппаратурой «Вариант» спутника «Сич-1М» от датчиков электрического (E) и магнитного полей (B), а также плотности электрического тока (J)

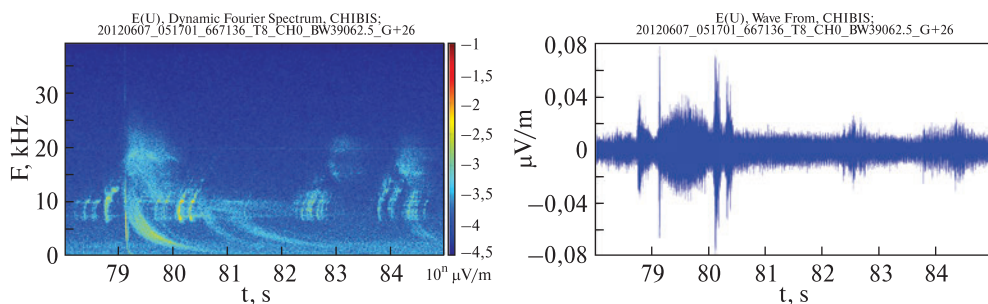


Рис. 3. Динамический спектр и соответствующие волновые формы, зарегистрированные датчиком электрического поля на микроспутнике «Чибис-М»

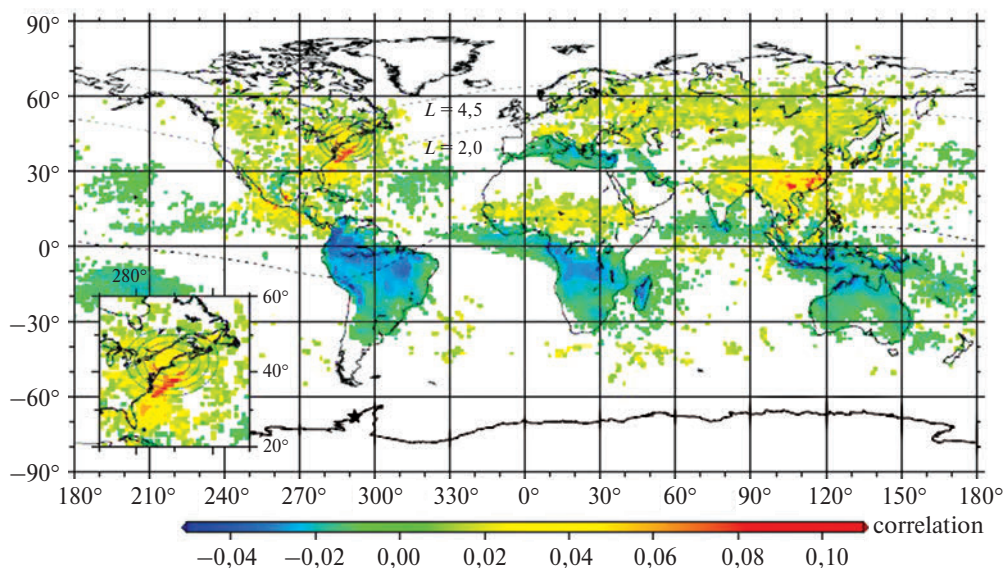


Рис. 4. Корреляция частоты регистрации вистлеров на AWDANet станции «Розера» (Великобритания), Антарктика, с глобальным распределением молниевой активности за период с 13 мая 2008 г. по 30 декабря 2009 г., рассчитанная с интервалом времени 1 мин. Местоположение станции «Розера» показано звёздочкой. Магнитосопряжённая точка указана окружностями с шагом 200 км. Рисунок взят из работы [4]

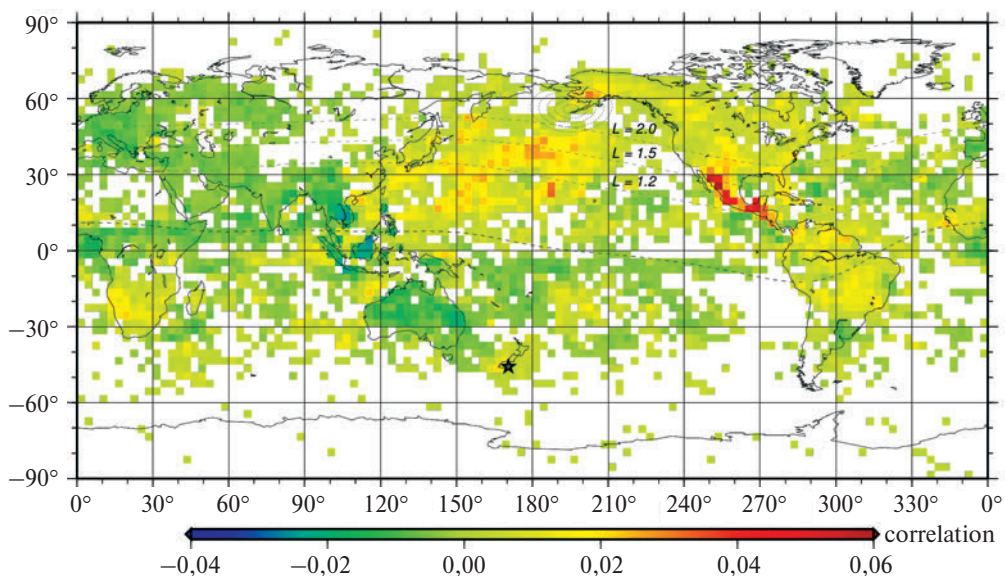


Рис. 5. Корреляция частоты регистрации вистлеров на AWDANet на станции «Дунедин» (Новая Зеландия) с глобальным распределением молниевой активности. Местоположение станции показано звёздочкой. Магнитосопряжённая точка обозначена концентрическими окружностями с шагом 200 км. Рисунок взят из работы [4]

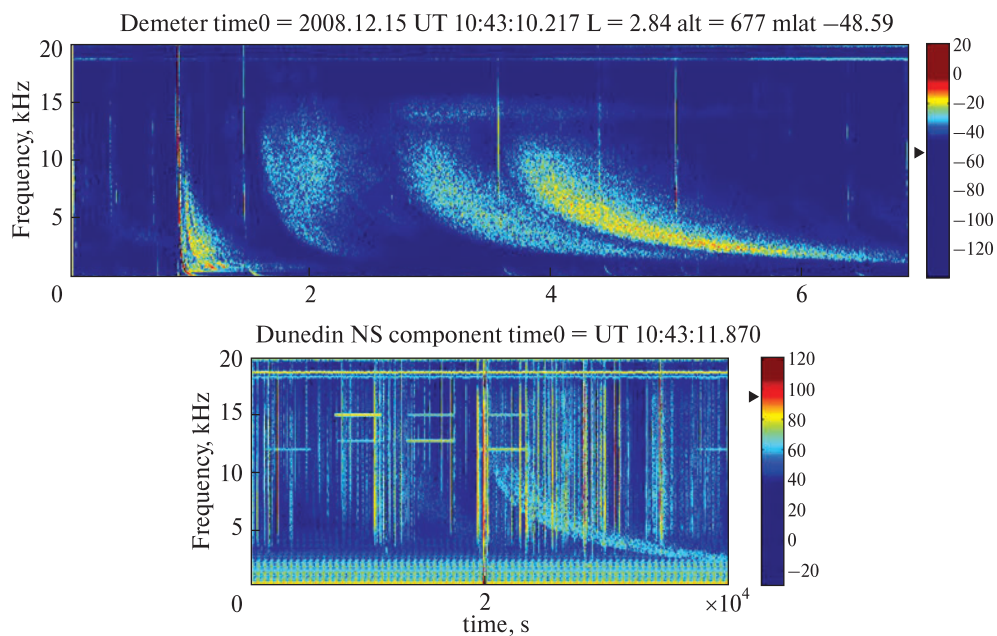


Рис. 6. ОНЧ сигналы, зарегистрированные на спутнике DEMETER (верхняя панель) и наземной станции «Дунедин», Новая Зеландия (нижняя панель). Только незначительная часть вистлеров, наблюдаемых на спутнике, достигает поверхности Земли

ВКЛЕЙКА к ст. Ф.Л. ДУДКИН, Д.Ф. ДУДКИН

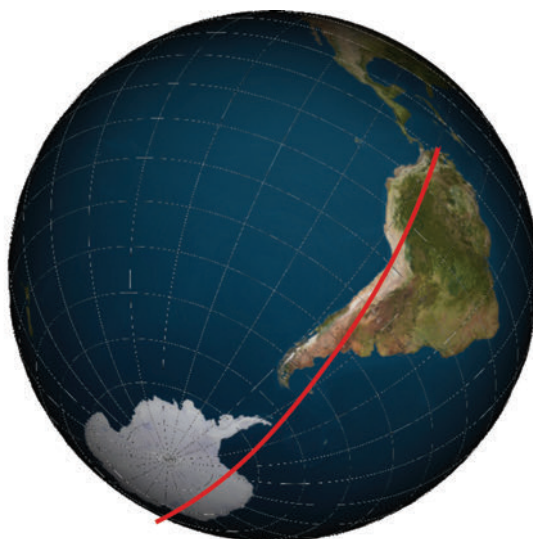


Рис. 1. Участок орбиты 23.10.07



Рис. 2. Участок орбиты 16.11.07

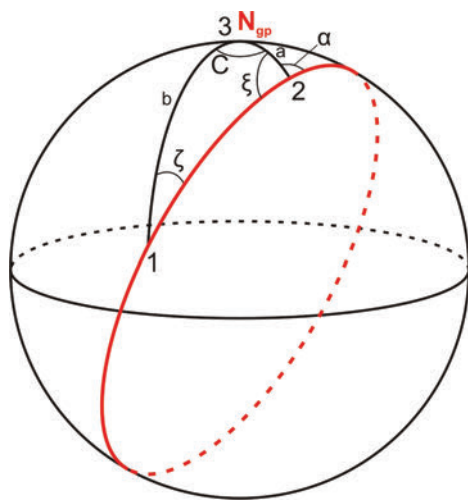


Рис. 3. Преобразование данных магнитометра из собственной системы координат спутника в геофизическую систему координат

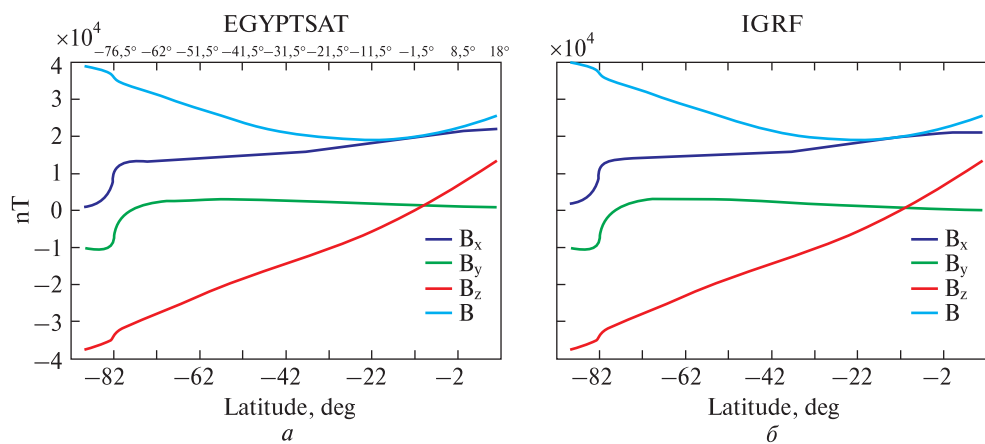


Рис. 4. Компоненты магнитного поля для первого участка орбиты: a — измеренные магнитометром спутника «Egyptsat»; b — вычисленные с помощью модели IGRF-10

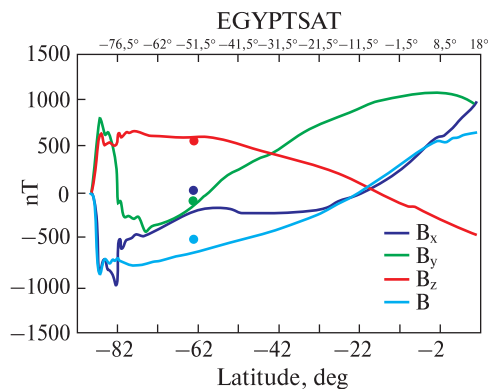


Рис. 5. Разность составляющих поля измеренных магнитометром и модельных значений IGRF-10

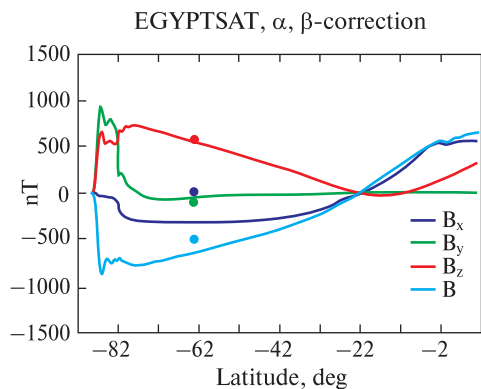


Рис. 6. Результат суммарного доворота для разности составляющих поля измеренных магнитометром и модельных значений IGRF-10

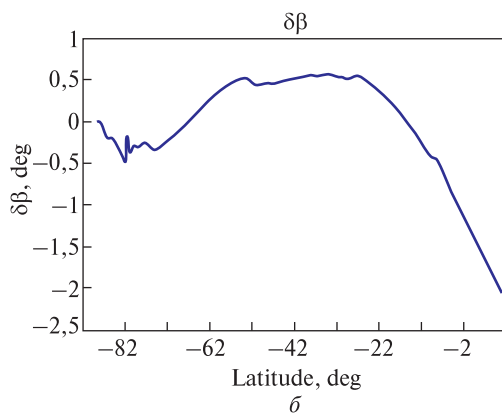
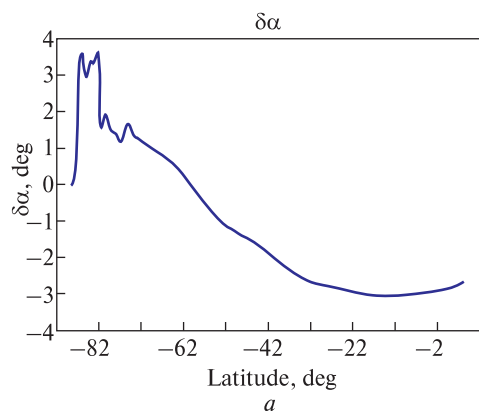


Рис. 7. Значение углов доворота: a — $\delta\alpha$ и b — $\delta\beta$

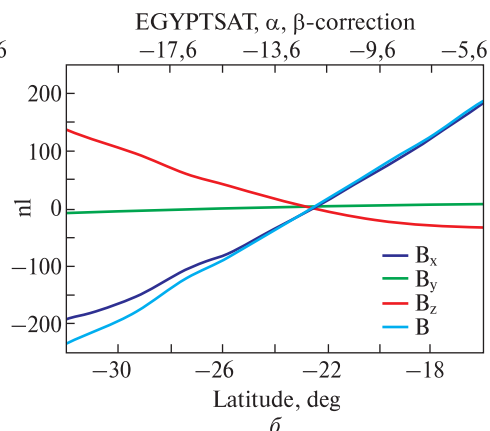
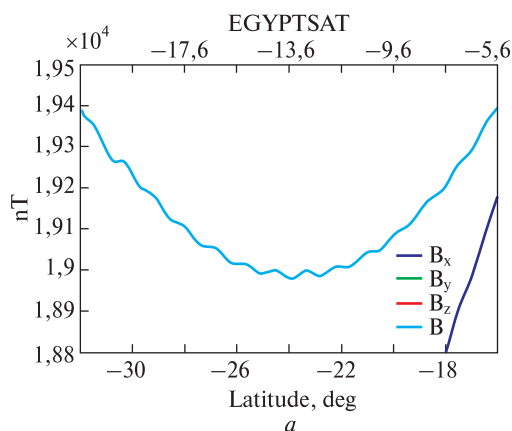


Рис. 8. Область нулевых значений: a — производной от модуля геомагнитного поля; b — отклонений поля спутникового магнитометра (в диапазоне широт $-23...-22$ градуса) от модели IGRF

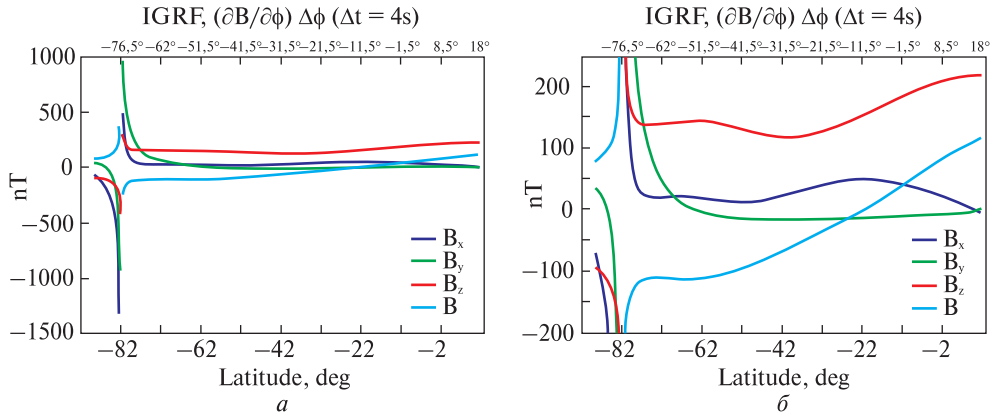


Рис. 9. Приращения составляющих поля IGRF между 4-х секундными отсчетами магнитного поля: *a* — в полном диапазоне изменения величин; *б* — детализация в области значений ± 200 нТл

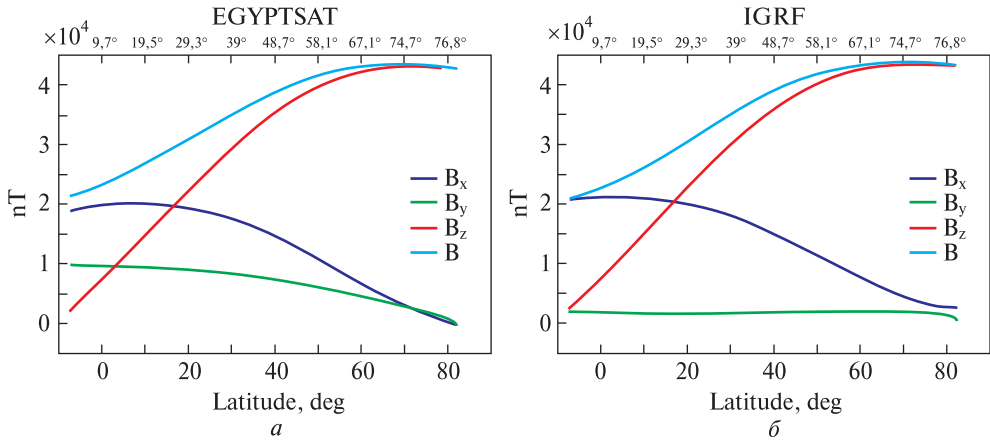


Рис. 10. Компоненты магнитного поля для второго участка орбиты: *a* — измеренные магнитометром спутника «Egyptsat»; *б* — вычисленные с помощью модели IGRF-10

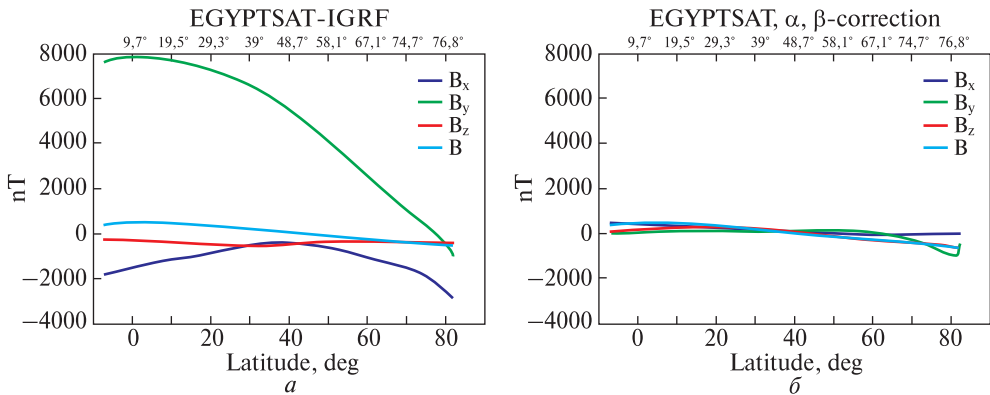


Рис. 11. Разность составляющих поля измеренных магнитометром и модельными значениями IGRF-10: *a* — до доворота системы координат; *б* — после доворота

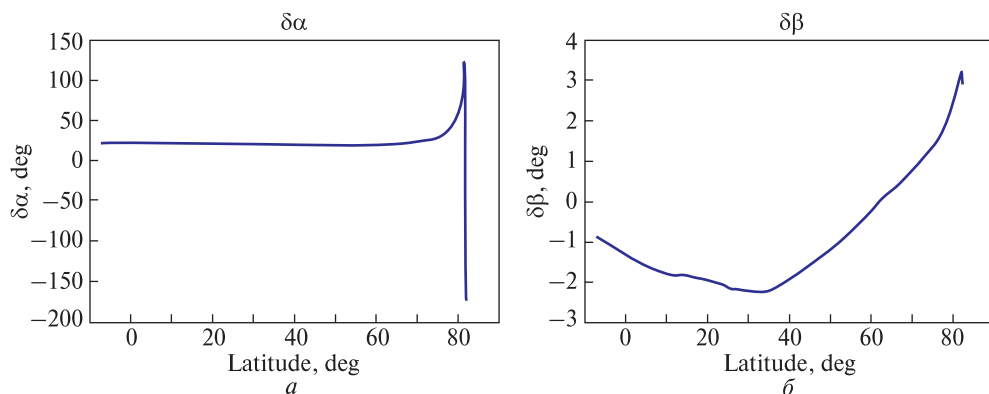


Рис. 12. Значение углов доворота: a — $\delta\alpha$ и $б$ — $\delta\beta$

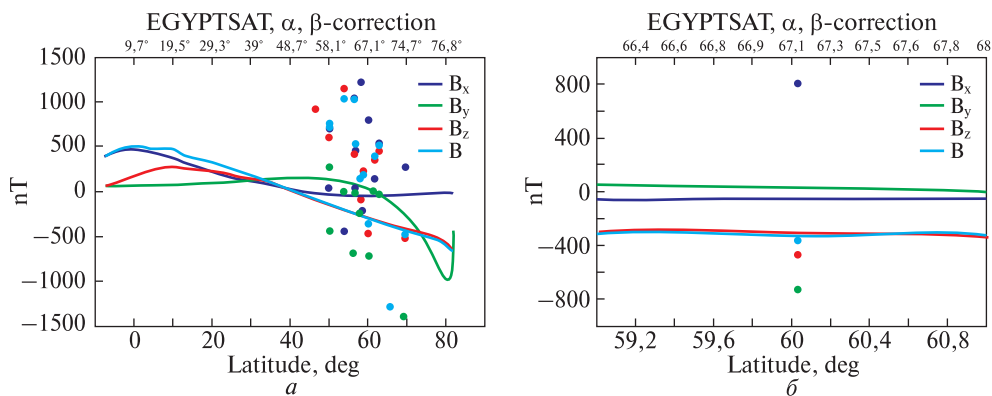


Рис. 13. Сравнение отклонений составляющих поля, измеренных магнитометром спутника над системой магнитометрических станций «CARISMA» и отклонений показаний наземных магнитометров этой системы от значений модели IGRF: a — для всех станций; $б$ — для станции FSMI

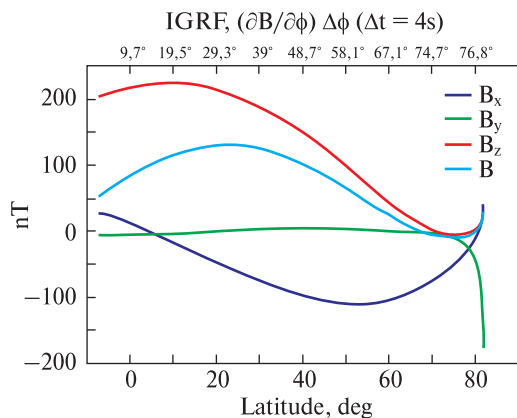


Рис. 14. Приращение составляющих поля IGRF между 4-х секундными отсчетами магнитного поля

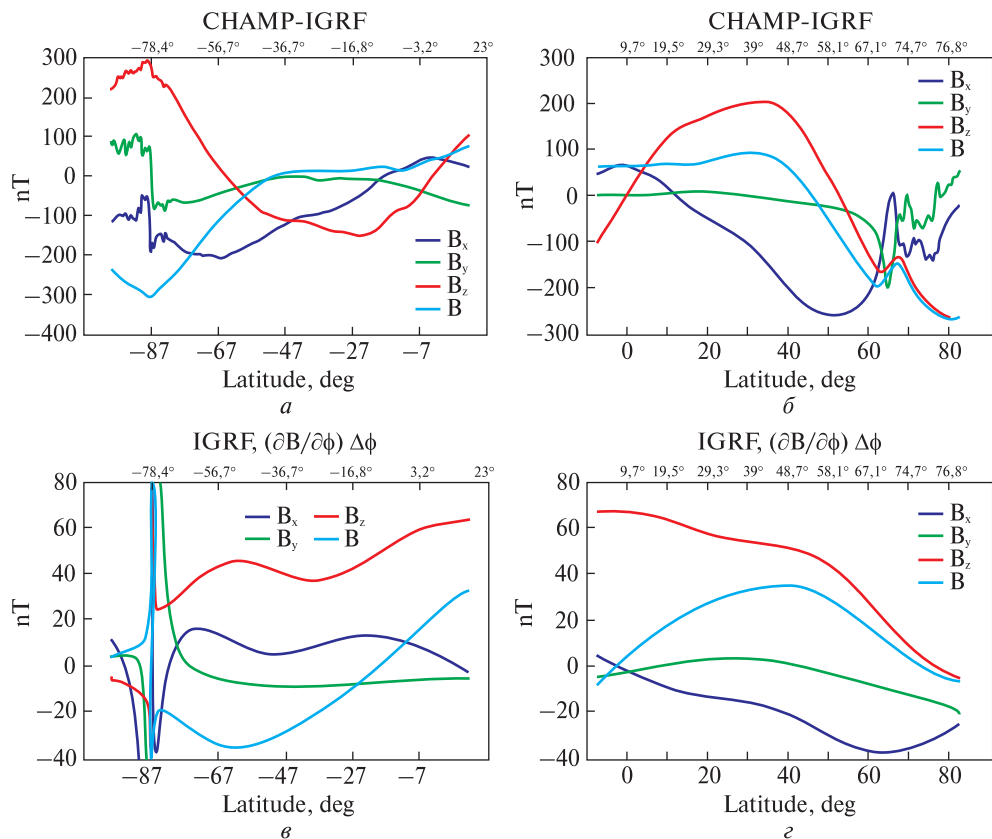


Рис. 15. Результаты для спутника CHAMP, относящиеся к первому (а, в) и второму (б, г) участкам орбиты: а, б — разность между составляющими поля, измеренными магнитометром спутника CHAMP и модельными значениями IGRF-10; в, г — приращения составляющих поля IGRF между односекундными отсчетами магнитного поля (детализация в области значений $-40 \dots +80$ нТл)

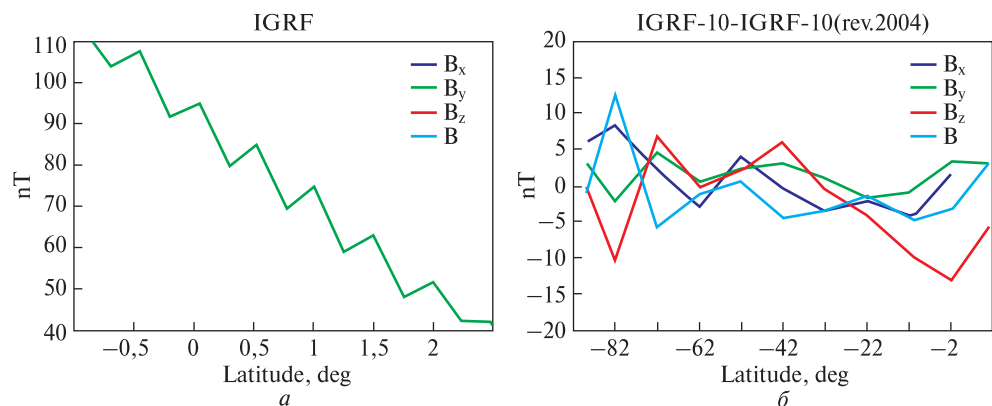


Рис. 16. Особенности референс-моделей: а — иллюстрация дискретности референс-модели IGRF-10; б — разности между значениями поля моделей IGRF 1945-2010 (10th Generation) и IGRF 1900-2015 (10th Generation, revised 2004)

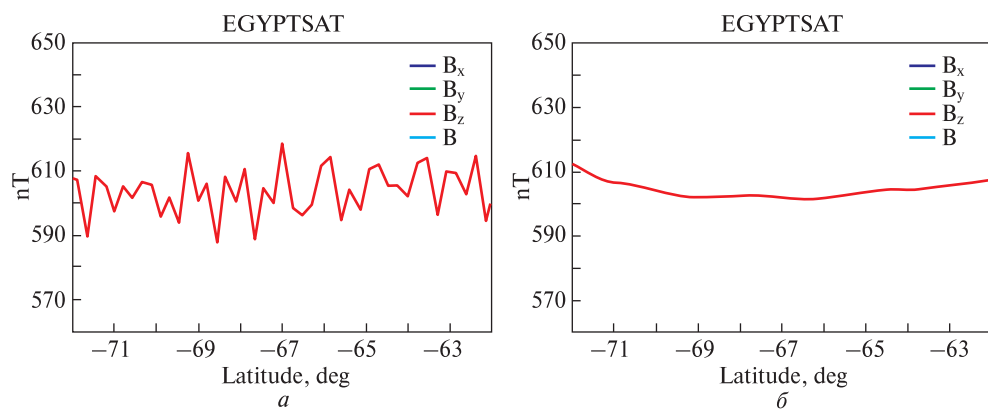


Рис. 17. Пульсации амплитуды отсчетов магнитометра спутника EGYPTSAT: *a* — до коррекции; *б* — после коррекции

ВКЛЕЙКА к ст. С.Е. АНДРЕЕВСКИЙ, В.Д. КУЗНЕЦОВ, В.М. СИНЕЛЬНИКОВ



Рис. 5. Приемная аппаратура ПЭС

Рис. 6. Внешний вид волнового зонда LEMI-602



Рис. 9. Электрический зонд LEMI-502

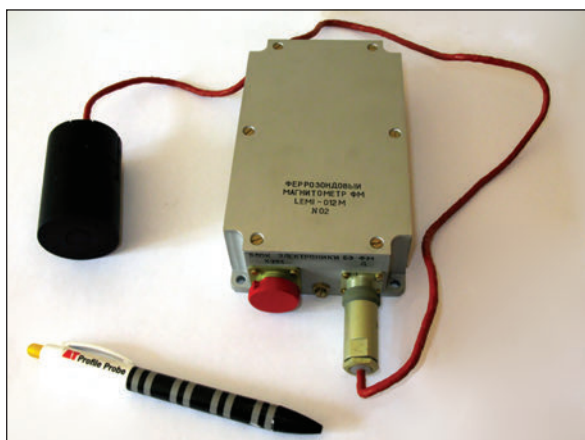


Рис. 10. Магнитометр постоянного поля LEMI-012

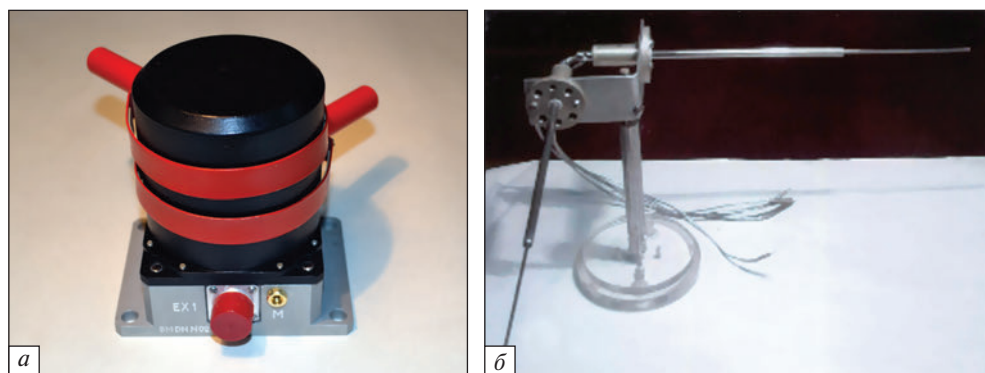


Рис. 1. Детектор DN (а) и детектор DE (б) для проекта «Ионосат-Микро»

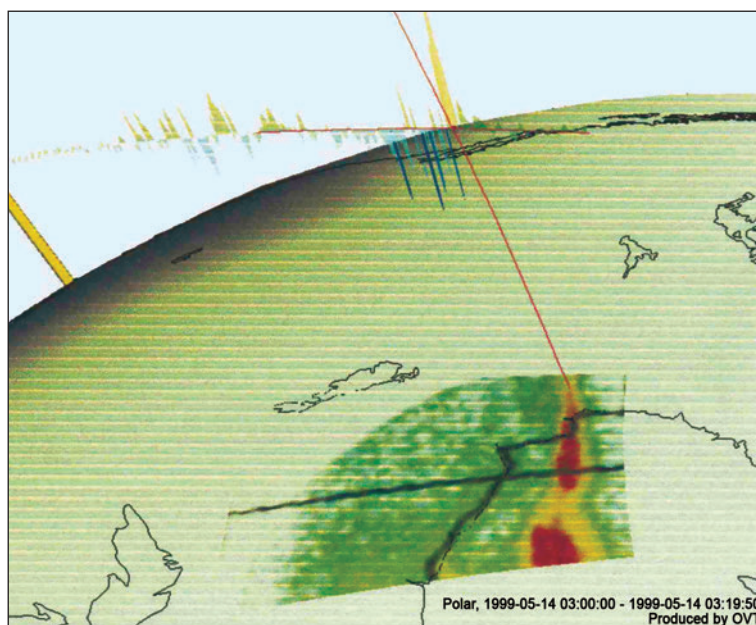


Рис. 1. Регистрация авроральных процессов в космическом эксперименте. На географическую карту нанесена фотография полярного сияния, полученная на спутнике NOAA. Показана силовая линия магнитного поля Земли, вдоль которой в атмосферу происходит вторжение энергичных частиц, и график распределения продольного электрического тока, зарегистрированного на спутнике «Polar». (Рисунок Н.В. Хотяинцева)

6.04.1992

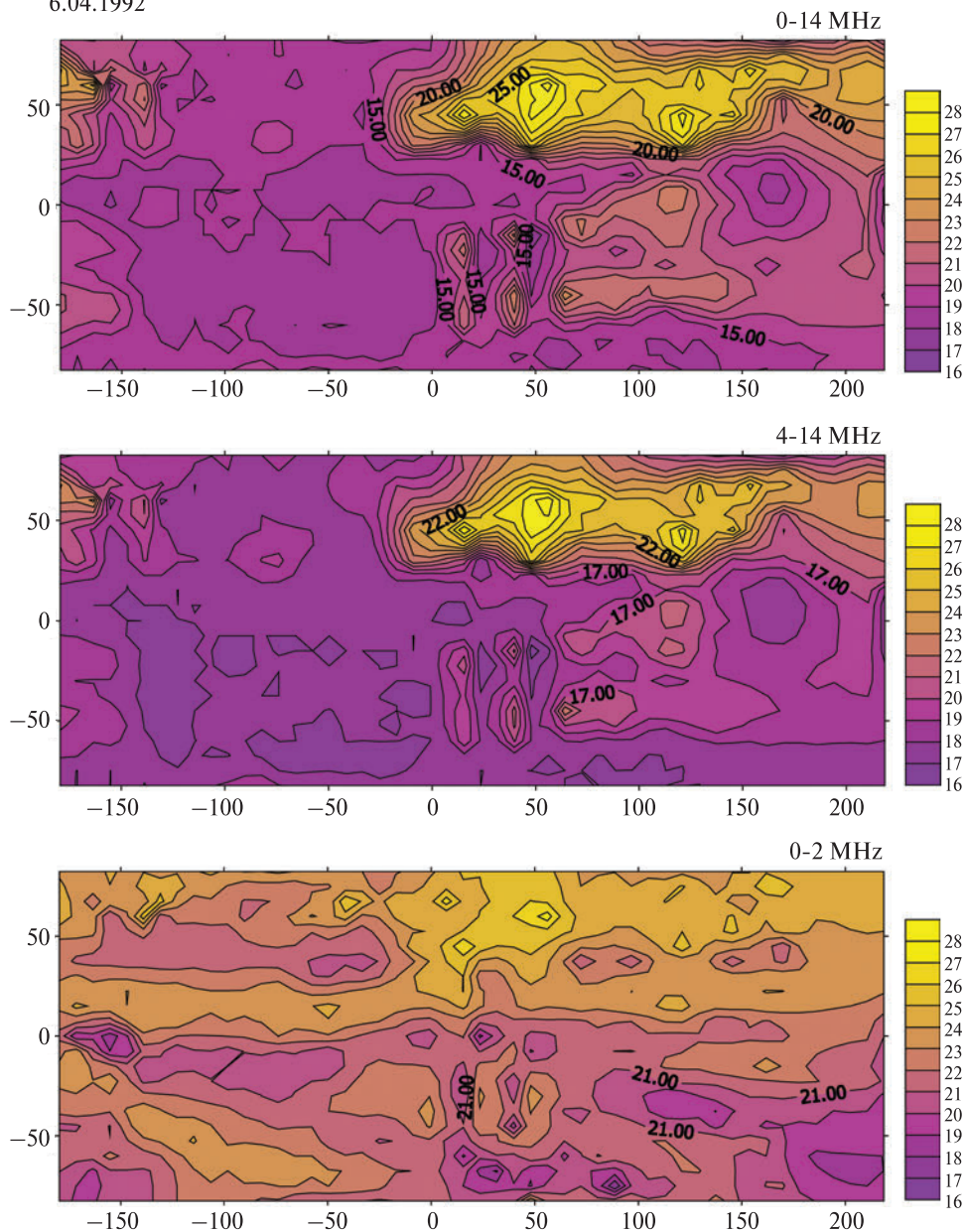


Рис. 2. Планетарное распределение интенсивности электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,1–2 МГц (нижняя панель), 4–14 МГц (средняя панель), и интегральное по всем частотам распределение (верхняя панель), полученные по данным измерений в эксперименте SORS-1 на спутнике КОРОНАС-И (31 марта 1994 г., высота 500 км, ночь, спокойные магнитные условия)



Рис. 4. Внешний вид блока RFA-E

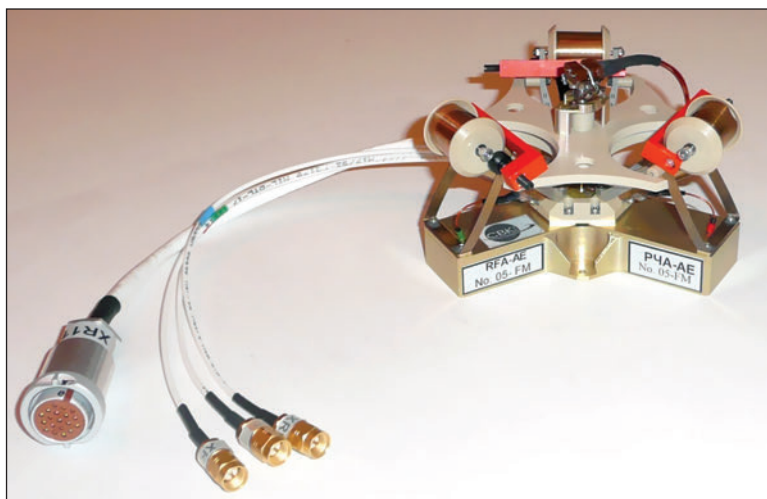


Рис. 5. Антенный блок RFA-AE

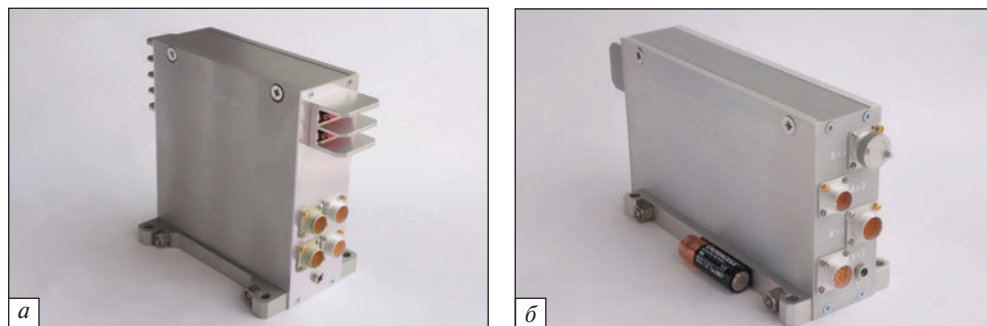


Рис. 2. Внешний вид центрального блока ССНИ (а) и блока электроники АПЧ (б)

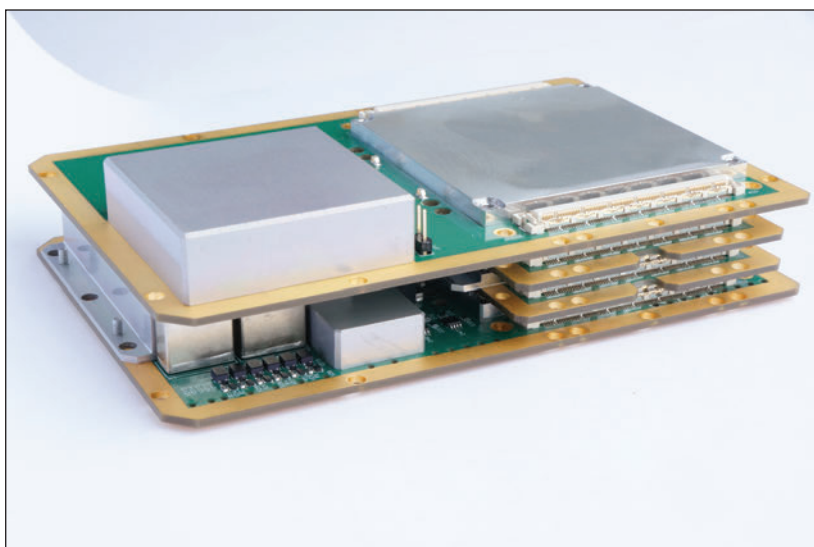


Рис. 3. Электронные платы центрального блока ССНИ

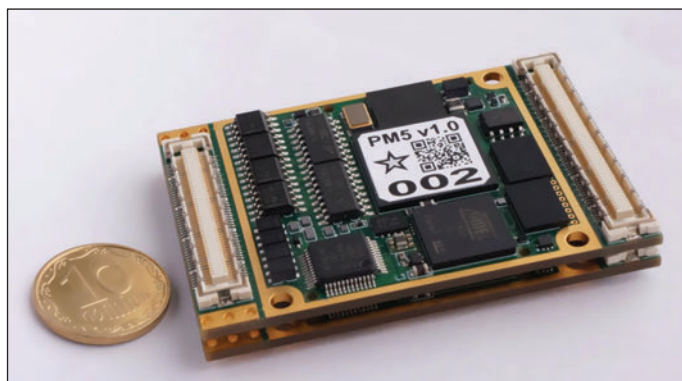


Рис. 8. Внешний вид резервированного процессорного микромодуля Рm 5

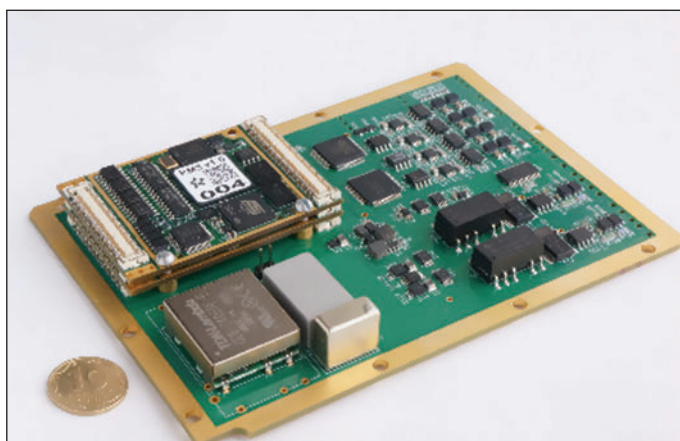


Рис. 1. Внешний вид электронной платы со встроенным резервированным ПМ



Рис. 3. Внешний вид приемного (а) и передающего (б) оборудования радара частичных отражений



Рис. 4. Внешний вид приемного (а) и передающего (б) оборудования доплеровского радара вертикального зондирования

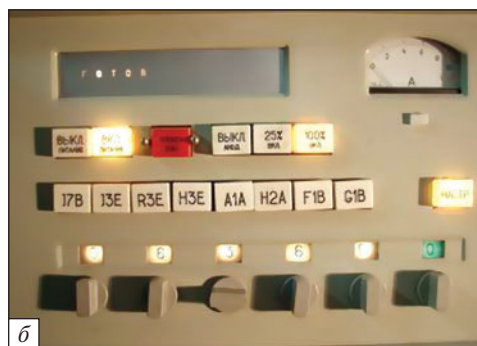


Рис. 6. Внешний вид приемного (а) и передающего (б) оборудования цифрового ионозонда



Рис. 9. Внешний вид системы для исследования ионосферных вариаций фазы и амплитуды сигнала станции РБУ службы эталонных сигналов частоты и времени. Верхний прибор — приемник ПК-66 с магнитной антенной (слева) и микроконтроллерным измерителем фазы; нижний — рубидиевый стандарт частоты Ч1-69



Рис. 12. Внешний вид многоцелевого комплекса УВЧ-зондирования

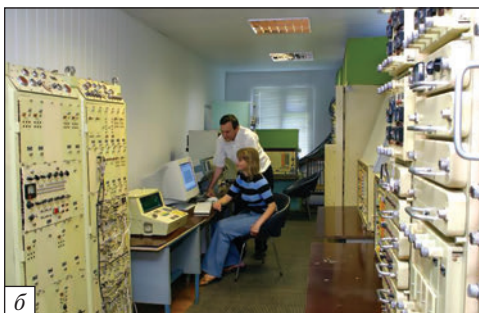


Рис. 13. Приемные системы сигналов ИСЗ служб GPS и «Глонасс» (а), а также сигналов низкоорбитальных навигационных ИСЗ (б)



Рис. 15. Внешний вид специализированного регистратора с аккумуляторной батареей и приемником GPS сигналов (а) и магнитометрической системы в пункте наблюдения Граково (б)

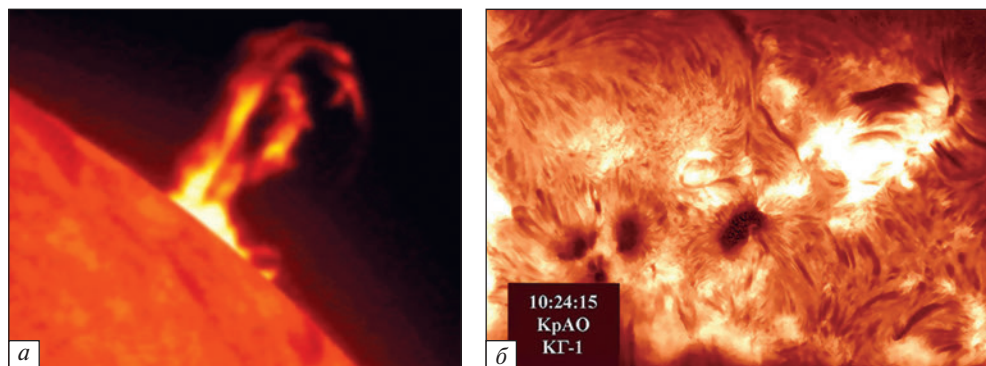


Рис. 1. Вспышка на лимбе Солнца (а) и на диске Солнца в линии Н-альфа (б). НИИ «КрАО», телескоп КГ-1

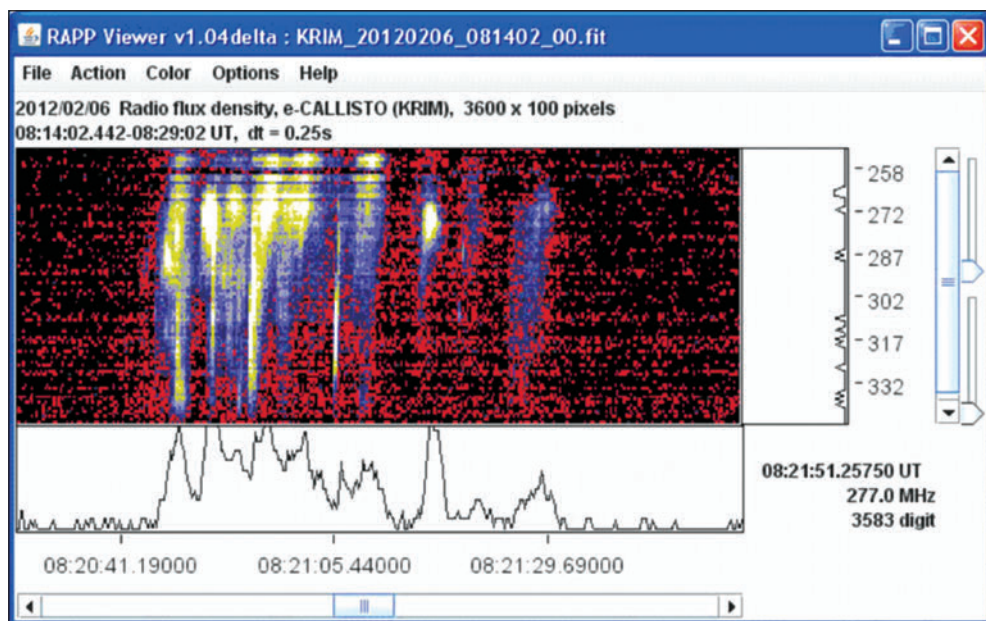


Рис. 3. Динамический спектр солнечного радиовсплеска. Наблюдения Робот-Телескоп РТ-М НИИ «КрАО»

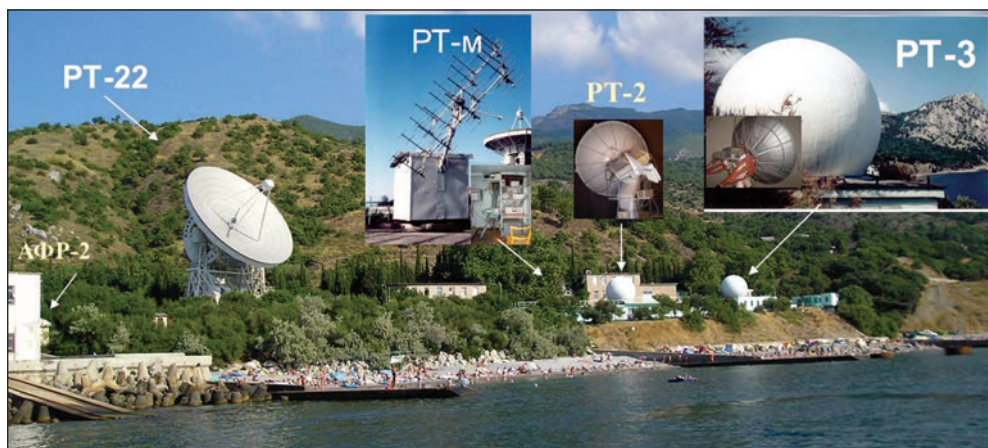


Рис. 8. Размещение телескопов Лаборатории радиоастрономии НИИ «КраО» на берегу Голубого залива в Кацивели

ВКЛЕЙКА к ст. Б.И. КАЛИТА, Л.М. КАРАТАЕВА, В.П. МЕЗЕНЦЕВ, Р.Т. НОГАЧ

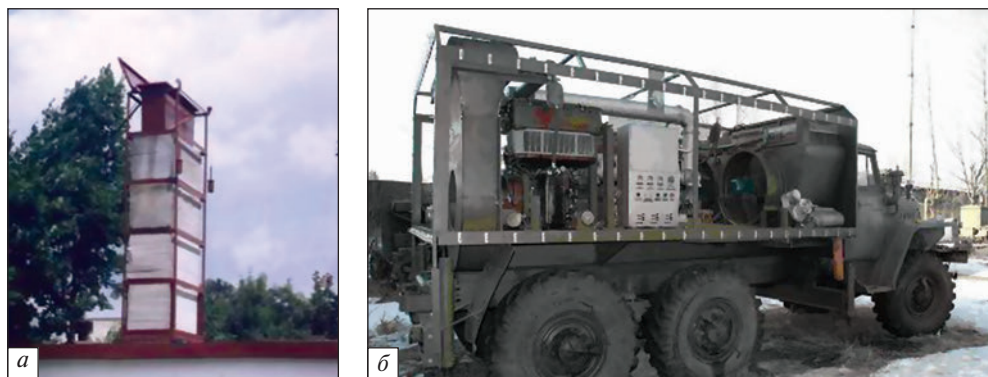


Рис. 1. Рупор стационарного (а) и мобильного (б) акустических излучателей

АКТИВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ СО СПУТНИКОМ DEMETER

Б.И. КАЛИТА, Л.М. КАРАТАЕВА, В.П. МЕЗЕНЦЕВ, Р.Т. НОГАЧ

Активные акустические эксперименты являются важным направлением исследования связи земных процессов с процессами в ионосфере. В практическом плане это связано с разработкой методов обнаружения аномальных явлений на Земле по данным измерений на спутнике.

В Львовском центре Института космических исследований НАНУ и ГКАУ (ЛЦ ИКИ), совместно с французским центром LPCE/CNRS в 2005—2007 гг., был проведен ряд наземно-космических экспериментов по выявлению влияния искусственного акустического излучения на ионосферу. Данные наблюдений регистрировались параллельно в лаборатории ЛЦ ИКИ и на спутнике DEMETER.

Целью экспериментов было выявление изменений прозрачности нижней ионосферы после акустического возмущения с помощью акустического генератора, разработанного в ЛЦ ИКИ.

Нижняя граница ионосферы является экраном для прохождения электромагнитных волн очень низкой частоты (ОНЧ) в диапазоне 3—30 кГц. Наиболее характерными представителями этого диапазона являются свистящие атмосферики (вистлеры) [1]. Они образуются в результате импульсного электромагнитного излучения (молнии, коммутационные процессы линий электропередач и т.д.), которое попадает в магнитосферу, канализируется, проходит вдоль магнитной силовой трубки, где, в результате дисперсионных превращений, приобретает свою характерную форму.

В ранних проведенных экспериментах после акустического возмущения было обнаружено резкое увеличение числа зарегистрированных вистлеров. Опираясь на работу [2], этот факт позволил допустить, что акустическая волна достигает высот ионосферы и способствует повышению ее прозрачности. Для подтверждения этого предположения были проведены эксперименты при участии спутника DEMETER, а в качестве реперных сигналов ОНЧ диапазона использовалось излучение навигационных станций РСДН-20 на частоте 12648,809 Гц.

Постановка эксперимента

В экспериментах использовались стационарный и мобильный акустические излучатели, показанные на рис. 1 (см. на цветной вкладке). Стационарный излучатель состоит из двух секций, которые излучали на частотах $f_1 = 600$ Гц и $f_2 = 624$ Гц. При нелинейном взаимодействии волн на частотах f_1 и f_2 образовы-

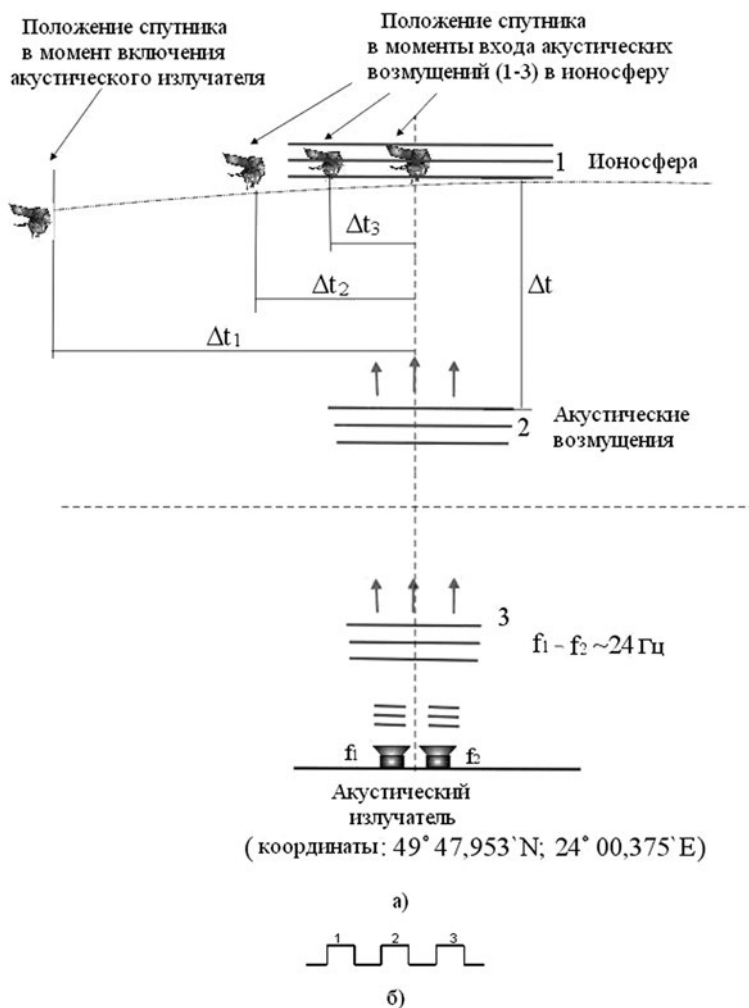


Рис. 2. Схема активного акустического эксперимента со спутником DEMETER

валась разностная частота 24 Гц. В мобильном акустическом излучателе использовался модуляционный принцип генерации низких частот.

Момент включения акустического излучателя определялся по формуле:

$$t_{\text{вкл}} = t_{\text{min}} - \Delta t_3,$$

где t_{min} — момент, когда точка проекции спутника на поверхность Земли находится на расстоянии ≤ 100 км от точки установки излучателя ($49^\circ 47,953' \text{N}$, $24^\circ 00,35' \text{E}$), Δt_3 — время на распространение акустического возмущения и развитие процессов в ионосфере выбиралось экспериментально.

Схема, объясняющая выбор времени включения акустического возмущения показана на рис. 2. Момент времени t_{min} выбирался из таблицы значений координат

Рис. 3. Схема действия наземных акустических возмущений на ионосферу

нат траектории спутника, которая предоставлялась из центра управления полетом. На протяжении времени $\Delta t_{\text{зан}}$ на спутнике включался режим более детальной записи (burst mode) всех параметров, которые регистрировались, время $\Delta t_{\text{зан}}$ не превышало 2—5 мин. Момент включения записи выбирался так, чтобы интервал $\Delta t_{\text{зан}}$ был симметричным относительно t_{min} . Акустическое возбуждение проводилось в виде трех посылок по 60 с и паузами 60 с (рис. 2, б).

С целью подтверждения влияния акустического возмущения на процессы в ионосфере были проведены эксперименты как с акустическим возмущением, так и без него.

На основе предыдущих экспериментальных исследований была выдвинутая гипотеза, что наземные акустические возмущения приводят к изменению прозрачности ионосферы в разных диапазонах частот [3, 4]. Схема воздействия акустических возмущений на ионосферу показана на рис. 3. Согласно этой схеме интенсивность сигнала наземной реперной радиостанции должна изменяться при прохождении через область возмущенной ионосферы.

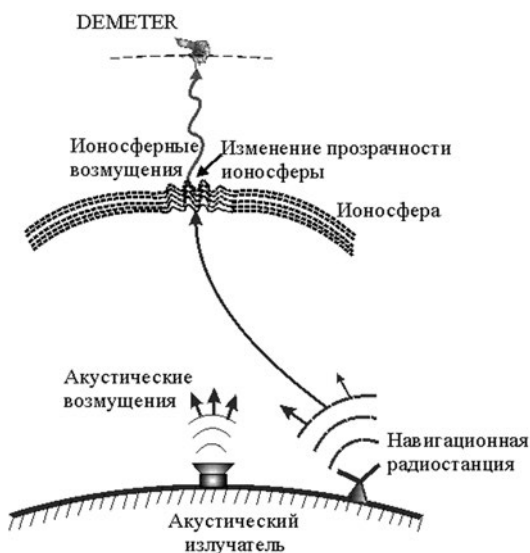
Эти изменения должны быть зарегистрированы бортовыми приборами спутника при его пролете над зоной возмущения.

Результаты экспериментов

Бортовые записи данных ОНЧ сигналов на спутнике были профильтрованы на частоте 12648 Гц в полосе 100 Гц. Полученные последовательности оценивались по интенсивности (усредненная сумма квадратов значений последовательностей за определенный период времени). На рис. 4 показаны результаты обработки бортовых данных экспериментов с акустическим излучением и без него.

Как видно из рисунков, интенсивность сигналов ОНЧ без акустического возмущения намного меньше. Факт значительного роста интенсивности сигналов, представленных на верхних панелях рис. 4, можно объяснить только увеличением прозрачности нижней ионосферы для сигналов ОНЧ диапазона под действием акустического возмущения.

Обращает на себя внимание и форма распределения интенсивности сигналов ОНЧ после акустического возмущения. После сглаживания значений



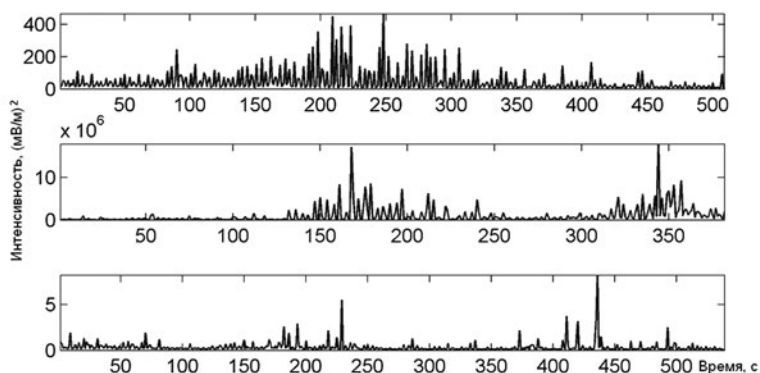


Рис. 4. Распределение интенсивности ОНЧ сигналов для экспериментов с акустическим излучением (верхняя и средняя панель) и без него (нижняя панель) по бортовым данным спутника DEMETER

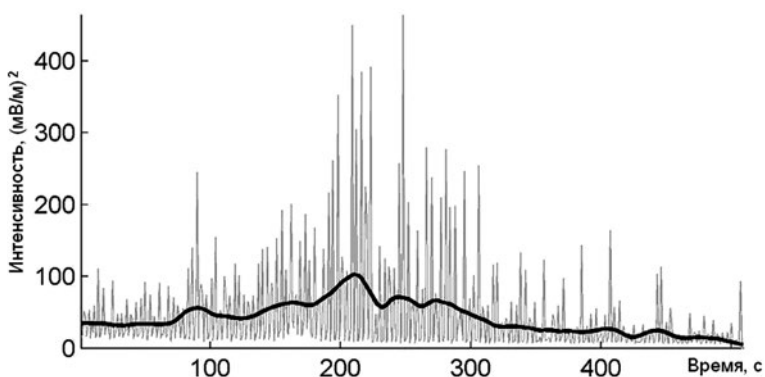


Рис. 5. Графики распределения интенсивности сигнала ОНЧ до (серый цвет) и после (черный цвет) сглаживания

интенсивности сигнала, показанного на верхней панели рис. 4, получаем график изменения сигнала, характерный для дифракции электромагнитной волны на круглом отверстии (рис. 5). На этом рисунке можно заметить четкий центральный и боковые лепестки, характерные для дифракционной картины на круглом отверстии в модели Фраунгофера [5].

Допустим, что акустическая волна направлена вертикально вверх и область прозрачности ионосферы круговой формы образуется над местом расположения излучателя (рис. 6). В зависимости от положения спутника над областью прозрачности (ОП), будет меняться высота воображаемого экрана, на котором должна отображаться интенсивность электромагнитной волны после прохождения ОП. Начиная с высоты экрана Е1, главный лепесток интенсивности будет расширяться вплоть до точки зенита над ОП.

Рис. 6. Схема пролета спутника над зоной акустического возмущения. АИ — акустический излучатель; ОП — область прозрачности ионосферы; С1-С3 — положения спутника относительно области прозрачности; Е1-Е3 — воображаемые экраны в соответствии с положением спутника

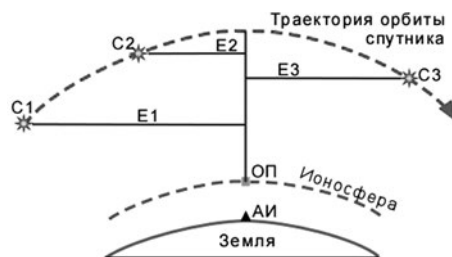


Рис. 7. Траектория полета спутника: *а* — во время записи сигнала, представленного на верхней панели рис. 4 (26.02.2005); *б* — во время записи сигнала, представленного на средней панели рис. 4 (10.02.2005). Стрелки указывают направление полета. Крупные точки соответствуют моментам максимумов сигнала на рис. 4. Звездочки — расположение акустического излучателя ($49^{\circ}47,953'N$; $24^{\circ}00,375'E$)

Дальнейшее движение спутника приведет к уменьшению высоты до уровня Е1 и, соответственно, главный лепесток интенсивности будет сужаться. За счет движения спутника интенсивность электромагнитной волны, прошедшей через ОП, будет состоять из значений мгновенных интенсивностей для каждой отдельной высоты экрана в зависимости от положения спутника. Примем высоту ионосферы, равную 90 км от поверхности Земли, длину волны реперного сигнала навигационной станции 23,72 км, траекторию пролета спутника на высоте 800 км от поверхности Земли и его скорость 8 км/с. Эти данные позволяют оценить диаметр области прозрачности нижней границы ионосферы, который для случая рис. 5 составляет ~ 35 км.

Интенсивность ОНЧ сигнала, представленная на средней панели рис. 4, имеет два четких максимума. При этом кривая на верхней панели отображает бортовые данные, записанные при пролете спутника над точкой расположения акустического излучателя с севера на юг (см. рис. 7, *а*). А на средней панели — при пролете спутника с юга на север (рис. 7, *б*). Сглаженные интенсивности сигнала ОНЧ показаны на рис. 8.

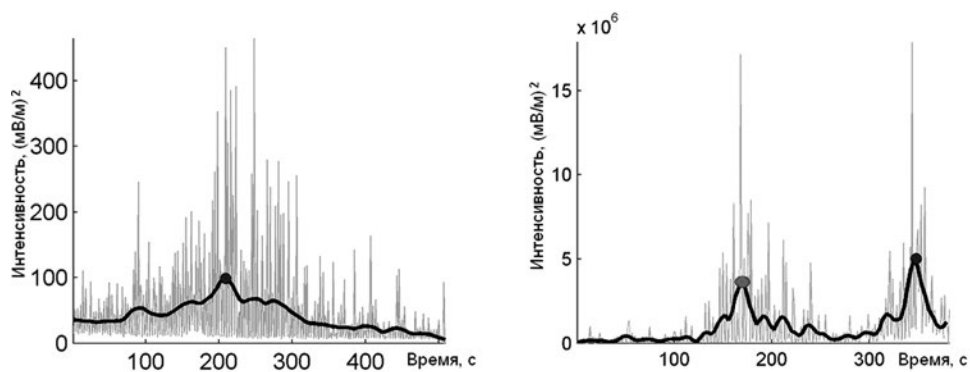


Рис. 8. Распределение интенсивности сигнала ОНЧ при пролете спутника с севера на юг *а* и с юга на север *б*. Точки соответствуют точкам на рис. 7, *а* и *б*

На рис. 8, *б* четко заметны два дифракционных максимума. Левый максимум относится к моменту пролета спутника над сейсмоактивными районами Турции (красная точка), второй относится к моменту пролета над акустическим излучателем (синяя точка). 8.02.2005 г. на западном побережье Турции (39°70N; 26°00E) в 15:06 UTC были зарегистрированы толчки с магнитудой ML4. 9.02.2005 г. Там же (38°55N; 31°55E) в 9:05 UTC были зарегистрированы толчки с магнитудой MD3.3 [6]. Из этого можно сделать вывод, что акустические возмущения от сейсмических явлений также приводят к изменению прозрачности нижней ионосферы.

Наряду с другими сейсмо-ионосферными эффектами изменение прозрачности ионосферы при искусственных акустических возмущениях является дополнительным фактором для создания космической системы прогноза землетрясений. Учитывая, что большинство аномальных процессов на Земле сопровождаются акустическими возмущениями, исследование этого эффекта может иметь значение для других практических задач.

Для надежного обнаружения воздействия акустических возмущений на ионосферу необходимо проведение дальнейших экспериментов, которые могут быть осуществлены в рамках проекта «Ионосат-Микро».

Выводы

1. Акустическое возмущение атмосферы приводит к увеличению прозрачности ионосферы.
2. Искусственные акустические возмущения вызывают такую же реакцию ионосферы, как и естественные.
3. Полученные результаты позволяют создать методику выявления природных аномальных явлений, которые сопровождаются интенсивными акустическими возмущениями атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Helliwell R.A.* Whistlers and related ionospheric phenomena. — Stanford: Stanford University Press, 1965.
2. *Беспалов П.А., Мизонова В.Г.* Коэффициент отражения свистовых волн от ионосферы при нормальном падении // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2004. — Т. 44, № 1. — С. 55—59.
3. *Кошовий В.В., Сорока С.О.* Акустичне збурення іоносферної плазми наземним випромінювачем // Космічна наука і технологія. — 1998. — Т. 4, № 5—6. — С. 3—17.
4. *Soroka S.O.* To Galperin-Hayakawa model of influence of Ground acoustic disturbance on ionosphere // International Symposium in memory of Professor Yuri Galperin/Auroral Phenomena and Solar-Terrestrial Relations. Russia, Moscow. — P. 100.
5. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1973. — 719 с.
6. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.emsc-csem.org/>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СЕТИ НАЗЕМНЫХ ПЕРМАНЕНТНЫХ РЕФЕРЕНЦНЫХ ГНСС СТАНЦИЙ УКРАИНЫ

А.А. ЖАЛИЛО, А.А. ЖЕЛАНОВ, Е.А. БЕССОНОВ, И.В. ДИЦКИЙ

Введение

В рамках научно-исследовательских работ по исследованию ионосферы выполняется международный проект «Ионосат» и его первый этап «Ионосат-Микро» [1]. Центральной задачей проекта является изучение динамических процессов в ионосфере в контексте солнечно-земных связей, и в частности:

осуществление систематического контроля вариаций полного электронного содержания ионосферы (ПЭС; в зарубежной литературе TEC – Total Electron Content) и его возмущений;

проведение согласованных измерений на борту исследовательского космического аппарата (КА) «Микросат» и на Земле с использованием средств дистанционного зондирования ионосферы, регистрация в ионосфере пространственно-временной структуры неоднородностей ПЭС.

Для моделирования профиля распределения электронной концентрации в ионосфере, помимо бортового комплекса КА «Микросат», было предложено использовать функционирующую на Украине наземную инфраструктуру станций приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и разработать соответствующее математическое и программное обеспечение для обработки наземных и совместно наземных и бортовых ГНСС наблюдений.

Реализация данной составной части проекта «Ионосат-Микро» возможна благодаря нескольким факторам. Во-первых, на Украине функционирует международная сеть IGS/EPN постоянно действующих (перманентных) референцных (опорных, чьи координаты точно известны) ГНСС станций. Кроме того, функционируют ГНСС станции системы космического навигационного обеспечения Украины (ГКАУ) и станции нескольких коммерческих ГНСС сетей. А во-вторых, по данному направлению имеется существенный задел отечественных исследований и разработок, в частности, разработки специалистов Главной астрономической об-

серватории НАН Украины (ГАО) и Харьковского национального университета радиоэлектроники (ХНУРЭ) [2], позволяющие решить поставленную задачу.

С февраля 2013 г. со стороны НАН Украины осуществляется финансирование *научного проекта*, целью которого является создание системы (аппаратно-программных средств) сбора, обработки и анализа наблюдений наземных ГНСС-станций Украины для обеспечения поддержки проекта «Ионосат-Микро», в частности, создания региональной модели ПЭС и его вариаций с высокой пространственно-временной разрешающей способностью. В 2013 г. запланировано выполнить экспериментальную отработку и верификацию программно-математического обеспечения обработки и анализа наблюдений сети наземных перманентных референцных ГНСС-станций с последующим моделированием тренда и вариационной составляющей ионосферной задержки принимаемых сигналов (построение локальной ионосферной модели ПЭС) по результатам фазовых наблюдений двухчастотных ГНСС-станций. Моделирование позволит улучшить понимание региональной и глобальной динамики поведения ионосферы путем сравнения с данными других исследовательских групп в рамках международной кооперации. Кроме того, это даст возможность детального исследования, в частности, визуализации пространственно-временной картины параметров ионосферы как среды, чувствительной к внешним воздействиям. Эта задача отвечает таким направлениям проекта «Ионосат-Микро», как мониторинг динамики ионосферы на различных временных и пространственных масштабах, создание и пополнение базы данных возмущённой ионосферы, интеграция данных в геоинформационные системы и др. Предполагается также, что в результате проекта будут получены и исследованы региональные 2D-модели ПЭС с высоким разрешением по пространству и времени, которые позволят повысить точность компенсации ионосферных погрешностей (по сравнению с ионосферными моделями Klobuchar, grid-моделями GIM IONEX, SBAS и др.) навигационных определений и точного позиционирования по сигналам ГНСС (GPS, ГЛОНАСС и других систем) на всей территории Украины.

В настоящей работе кратко описаны запланированные и решаемые задачи научно-исследовательских работ в 2013 г. по экспериментальной отработке программно-математического обеспечения обработки наблюдений сети наземных перманентных референцных ГНСС-станций Украины для оценки и моделирования пространственно-временного распределения ПЭС ионосферы.

Запланированные и решаемые в 2013 г. задачи научного проекта

Для достижения цели научного проекта в 2013 г. ГАО совместно с ХНУРЭ запланировали решить ряд конкретных задач. В первую очередь, предполагалось спланировать и осуществить сбор и послесансную обработку наблюдений (с темпом 1 Гц) сети выбранных станций Украины (~60 станций), накопленных на двух смежных сутках января 2013 г. (10-е и 11-е GPS-сутки) и на

двух смежных сутках июня 2013 г. для сопоставления зимней и летней ионосферной активности в рассматриваемом регионе. Обработка накопленных данных должна выполняться с использованием имеющихся собственных разработок программно-математического обеспечения ОСТАВА, а также известных зарубежных программных продуктов – BERNES (Швейцария), GrafNav/GrafNet (Канада) для сопоставления и верификации результатов обработки.

В ходе посуточной обработки наблюдений должны быть решены следующие *главные задачи*:

1. Предварительной обработки наблюдений («пре-процессинг») всех задействованных в эксперименте станций, включающей обнаружение и устранение фазовых скачков, синхронизацию наблюдений, оценку уровней многолучевости и шумов кодовых и фазовых наблюдений, устранение аномальных наблюдений, оценку уровня ионосферных вариаций, контроль качества и редактирования наблюдений;

2. Побазового разрешения фазовой неоднозначности (РФН) наблюдений обеих частот и верификации его результатов с использованием точных продуктов международных сервисных центров IGS/EPN;

3. Получения координатных решений совместно с оценками текущих зенитных задержек (ZTD) с использованием точных продуктов сервисных центров IGS/EPN;

4. Формирования линейных комбинаций (нулевых, одинарных и двойных разностей), т.е., так называемых безгеометрических («geometry-free», далее – GF) комбинаций, на избранных базовых линиях и их фильтрации/сглаживания;

5. Использования полученных оценок GF комбинаций для построения трендовых 2D-моделей (планируется использовать несколько известных, апробированных моделей «тонкого слоя») ПЭС с отображением пространственно-временного изменения ПЭС;

6. Определения и отображения текущих ионосферных вариаций (включая перемещающиеся ионосферные возмущения – ПИВ-ы, в зарубежной литературе – MSTIDs) [3–5].

Решение задачи (результаты моделирования ПЭС) должно быть апробировано путем использования полученных реализаций моделей при позиционировании на длинных базах (500–1200 км) и методом Precise Point Positioning.

Для проведения исследований, как сказано выше, планировалось использовать наблюдения сети выбранных станций Украины, а также нескольких примыкающих к границе зарубежных станций. Перечень станций, которые, по мнению исполнителей проекта, целесообразно включить в «кооперативную» сеть для проведения экспериментальных исследований, а также их местоположение представлены на рис. 1.

В результате обращения к государственным и коммерческим организациям Украины, которые управляют (являются операторами) локальными/региональными сетями ГНСС станций, на середину мая 2013 г. были собраны и

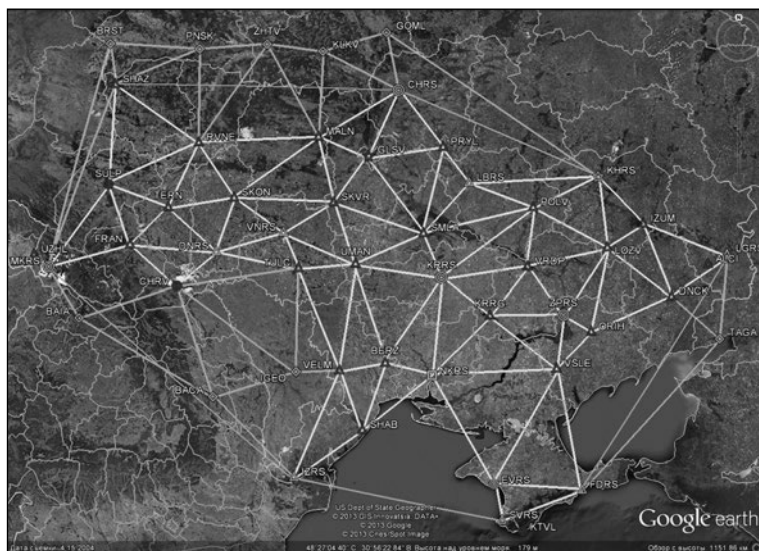


Рис. 1. Сеть ГНСС станций Украины, наблюдения которых предполагалось использовать в научном проекте

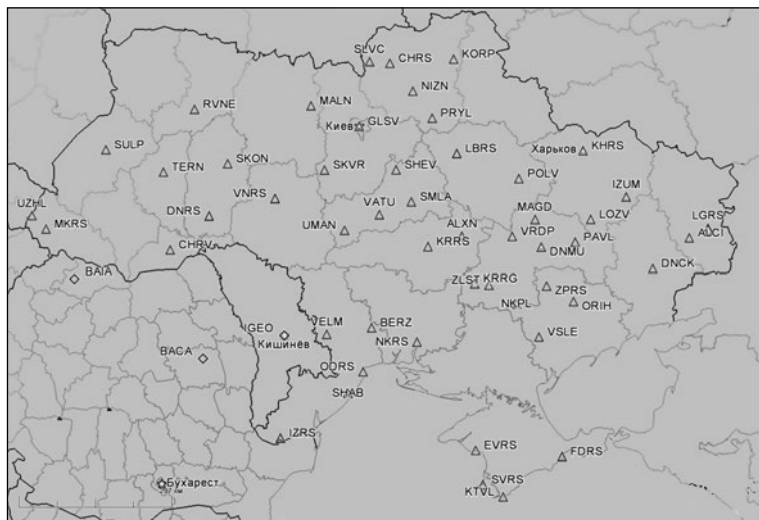


Рис. 2. Сеть ГНСС станций Украины (59 станций), наблюдения которых были собраны и включены в обработку

включены в обработку наблюдения 59-и станций Украины (межбазовые расстояния ~200 км) на двух смежных сутках января 2013 г. Эта «кооперативная» сеть представлена на рис. 2.

Наблюдения были представлены следующими организациями: ГАО НАН Украины (Киев), АО «НИИРИ»/ГКАУ (Харьков, сеть станций «Системы космиче-

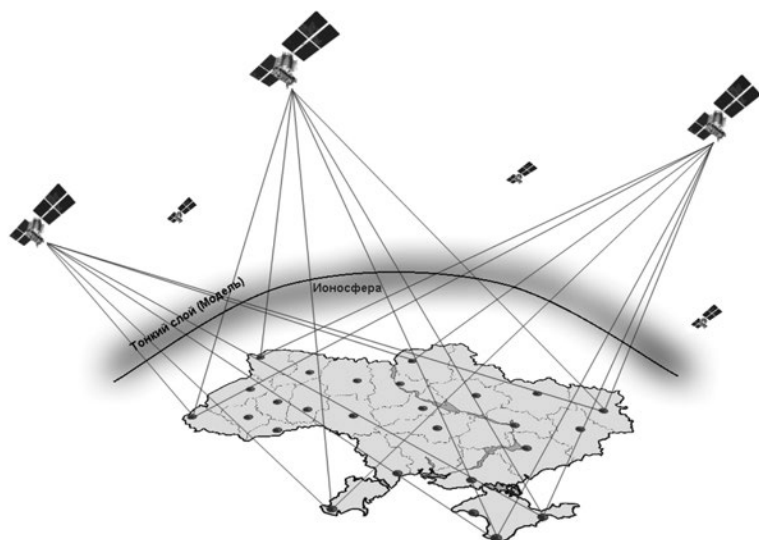


Рис. 3. Трассы «просвечивания» ионосферного слоя и представление ионосферной 2D-модели «тонкого слоя» [6—9, 13, 14]

ского навигационно-временного обеспечения Украины»), НИИ геодезии и картографии (Киев), ХНУРЭ (Харьков), коммерческими компаниями «System Solutions» (Киев), «ТНТ-ТПИ» (Днепропетровск), «Навигационно-геодезический центр» (Харьков), «ZAKPOS/UA-EUPOS» (Мукачеве), НАВГЕОКОМ (Москва, РФ).

На текущий момент выполнен анализ качества ГНСС наблюдений и начата их обработка в соответствии с планом работ. Запланировано выполнить сбор и начать обработку наблюдений такой же (или расширенной) сети станций на двух смежных сутках в июне 2013 г.

Подход к решению целевой задачи научного проекта

Для достижения поставленной цели научного проекта 2013 г. — построению региональной модели ПЭС по ГНСС наблюдениям — предлагается к реализации следующий подход, включающий три этапа.

На первом этапе выполняется полный цикл обработки наблюдений сети станций на текущих сутках в соответствии с представленным выше перечнем задач 1—4. Главным результатом выполнения этого этапа с точки зрения моделирования ПЭС являются сглаженные «нулевые», одинарные и двойные разности фазовых GF линейных комбинаций на всех независимых базовых линиях сети. Ниже, в следующем подразделе, кратко описаны указанные GF комбинации.

При условии выполнения разрешения неоднозначности двойных разностей фазовых наблюдений GF комбинации зависят только от ионосферных задержек на трассах «станции — спутники», см. рис. 3.

Одинарные разности ионосферных задержек (разности на трассах «станции — спутник»), также как и «нулевые» разности (отдельные трассы «станция — спутник»), в этом случае будут известны с точностью до неизвестных, но постоянных на интервале наблюдений, констант, которые, вместе с информационными параметрами аппроксимирующей ПЭС модели, должны быть включены в вектор оцениваемых параметров.

На втором этапе (задачи 5 и 6 — см. выше) выполняется выбор аппроксимирующей ПЭС модели, ее порядка, и осуществляется функциональная связь оценок указанных GF комбинаций (полученных из результатов обработки фазовых ГНСС наблюдений на первом этапе) с выбранной моделью ПЭС в единую систему избыточных уравнений.

С использованием метода наименьших квадратов (или метода максимума апостериорной вероятности, если имеется надежная априорная информация) решается задача совместной оценки информационных параметров (в данном случае, параметров региональной 2D модели ПЭС) и «мешающих» параметров обстановки, т.е. решается обратная задача восстановления распределения электронной концентрации ионосферы по пространству и во времени с использованием высокоточных разностных фазовых наблюдений.

Остаточные погрешности GF комбинаций не превышают нескольких миллиметров, что, с учетом также и фактора существенной избыточности наблюдений, дает возможность ожидать восстановления ПЭС с высокой точностью. Полученные оценки параметров «трендовой» модели заданного порядка (определяется экспериментальным путем) дают возможность рассчитать, проанализировать и отобразить остаточные ионосферные вариации [3—5].

На третьем этапе необходимо выполнить верификацию полученной реализации модели с использованием фазовых наблюдений при позиционировании на длинных базах (500—1200 км) и/или методом PPP. В процессе верификации должна быть оценена реальная точность восстановления пространственно-временного распределения ПЭС.

Такой подход, когда для решения задачи восстановления распределения абсолютных значений ПЭС по однозначным разностным фазовым высокоточным ГНСС наблюдениям (GF комбинациям) без использования кодовых ГНСС наблюдений, представляется новым и более точным по сравнению с известными методами решения поставленной задачи. Правомочность этого оптимистического утверждения должна быть доказана экспериментальными результатами.

На текущий момент выполнения проекта выполнен сравнительный анализ зарубежных и отечественных источников по моделированию и мониторингу ПЭС ионосферы [6—15] и отобраны варианты региональных математических моделей, которые планируется использовать в ходе обработки и исследований. Так, для моделирования ПЭС, в первую очередь, предполагается использовать и исследовать свойства апробированной [13—15] модели «Spherical Cap Harmonic Model», которая относительно проста и эффективна в реали-

зации и, как представляется авторам, наилучшим образом подходит для решения поставленной задачи. Впоследствии планируется провести аналогичное тестирование и других региональных моделей с целью сравнительного анализа характеристик полученных решений.

Уравнения фазовых ГНСС наблюдений и линейные GF комбинации

В данном подразделе для пояснения вышеизложенного в упрощенном виде приведены уравнения фазовых GPS наблюдений двух частот и их линейные GF комбинации [16–18]:

$$\begin{cases} \hat{L}_{1,i}^j(t_k) = F_i^j(t_k) - I_i^j(t_k) + (b_{\phi 1,i} - B_{\phi 1}^j) - [N_{1,i}^j + (\phi_{0,i} - \phi_0^j)] \cdot \lambda_1 + [\Phi_{wup}^j(t_k) + \Phi_{wupi}(t_k)] \cdot \lambda_1 + \delta \tilde{L}_{1,i}^j(t_k) \\ \hat{L}_{2,i}^j(t_k) = F_i^j(t_k) - \gamma^2 \cdot I_i^j(t_k) + (b_{\phi 2,i} - B_{\phi 2}^j) - [N_{2,i}^j + (\phi_{0,i} - \phi_0^j)] \cdot \lambda_2 + [\Phi_{wup}^j(t_k) + \Phi_{wupi}(t_k)] \cdot \lambda_2 + \delta \tilde{L}_{2,i}^j(t_k) \end{cases}$$

где i – индекс приемника, j – индекс спутника, $F_i^j(t_k)$ – частотно независимые составляющие, $F_i^j(t_k) = R_i^j(t_k) + [\Delta_i^{GPS}(t_k) - \Delta^{j,GPS}(t_k)] + Tr_i^j(t_k)$; $R_i^j(t_k) = \sqrt{[x_i(t_k) -$

$-\hat{X}_{j(i)}(t_k(t_i^T))]^2 + [y_i(t_k) - \hat{Y}_{j(i)}(t_k(t_i^T))]^2 + [z_i(t_k) - \hat{Z}_{j(i)}(t_k(t_i^T))]^2}$ – геометрическое расстояние, $(x_i(t_k), y_i(t_k), z_i(t_k))$ – координаты приемной антенны наземной станции, $(\hat{X}_{i(j)}(t_k(t_i^T)), \hat{Y}_{i(j)}(t_k(t_i^T)), \hat{Z}_{i(j)}(t_k(t_i^T)))$ – координаты (эфемериды) j -го спутника, рассчитанные на момент излучения спутника (t_i^T) , $Tr_i^j(t_k)$ – задержка навигационного сигнала в тропосфере, $I_i^j(t_k)$ – задержка навигационного сигнала в ионосфере на частоте L1, γ – коэффициент, $\gamma^2 = f_{L1}^2 / f_{L2}^2 = \lambda_2^2 / \lambda_1^2$; $\Delta_i^{GPS}(t_k)$ – расхождение шкал времени приемника и системного времени GPS, $\Delta^{j,GPS}(t_k)$ – расхождение шкалы времени спутника и системного времени GPS, $b_{\phi 1,i}, B_{\phi 1}^j, b_{\phi 2,i}, B_{\phi 2}^j$ – фазовые инструментальные задержки в трактах приемников (b) и спутников (B), $N_{1,2i}^j$ – циклическая фазовая неоднозначность; $\phi_{0,i}$ – случайная начальная фаза (в циклах) опорного генератора i -го приемника, ϕ_0^j – случайная начальная фаза (в циклах) опорного генератора j -го спутника, $\Phi_{wup}^j(t_k)$ – «wind-up» эффект (дополнительный фазовый набег) из-за технологических вращений спутников вокруг продольной оси, $\Phi_{wupi}(t_k)$ – «wind-up» эффект, обусловленный возможным вращением антенны приемника, $\delta \tilde{L}_{(1,2)i}^j(t_k)$ – многолучевость и шумы фазовых наблюдений.

Поскольку наземные станции неподвижны, погрешность, обусловленная «wind-up» эффектом приемной антенны, может быть опущена. Погрешности же из-за «wind-up» эффекта, вызванного вращением спутников вокруг своей продольной оси, могут быть с высокой точностью скомпенсированы с использованием известных моделей.

В практике обработки фазовых ГНСС наблюдений применяется их линейное комбинирование с целью уменьшения (либо полной компенсации) пог-

решностей (дифференциальный метод), выделения ионосферных задержек («безгеометрические» GF комбинации), формирования комбинаций уравнений с компенсацией тех или иных неизвестных (т.н. одинарные и двойные разности наблюдений) и др. Все перечисленные линейные комбинации и их свойства детально описаны в многочисленных источниках, в частности, в фундаментальных монографиях [16—18].

Ниже приведены необходимые для решения целевой задачи линейные «безгеометрические» комбинации без вывода и детального их описания.

«Нулевые» GF разности

$$\hat{L}_{GF,i}^j(t_k) = (\gamma^2 - 1) \cdot I_i^j(t_k) + [b_{\phi GF,i} - B_{\phi GF}^j] - [N_{1,i}^j \cdot \lambda_1 - N_{2,i}^j \cdot \lambda_2] + \delta L_{GF,i}^j(t_k),$$

где i – индекс приемника, j – индекс спутника, $\delta L_{GF,i}^j(t_k)$ – многолучевость и шум фазовых наблюдений в GF ЛК.

Одинарные GF разности

$$\Delta \hat{L}_{GF,i-m}^j(t_k) = (\gamma^2 - 1) \cdot \Delta I_{i-m}^j(t_k) + \Delta b_{\phi GF,i-m} - [\Delta N_{1,i-m}^j \cdot \lambda_1 - \Delta N_{2,i-m}^j \cdot \lambda_2] + \delta L_{GF,i-m}^j(t_k),$$

где i, m – индексы приемника, j – индекс спутника,

$\Delta I_{i-m}^j(t_k)$ – разностная ионосферная задержка навигационного сигнала на частоте L1, $\Delta b_{\phi GF,i-m}$ – разностные фазовые инструментальные задержки в трактах приемников, $\Delta N_{1,i-m}^j, \Delta N_{2,i-m}^j$ – разностные фазовые неоднозначности частот L1 и L2, $\delta L_{GF,i-m}^j(t_k)$ – разностные многолучевость и шумы фазовых наблюдений.

Двойные GF разности

$$\nabla \Delta \hat{L}_{GF,i-m}^{j-s}(t_k) = (\gamma^2 - 1) \cdot \nabla \Delta I_{i-m}^{j-s}(t_k) - [\nabla \Delta N_{1,i-m}^{j-s}(t_k) \cdot \lambda_1 - \nabla \Delta N_{2,i-m}^{j-s}(t_k) \cdot \lambda_2] + \delta L_{GF,i-m}^{j-s}(t_k),$$

где i, m – индексы приемников, j, s – индексы спутника, $\nabla \Delta I_{i-m}^{j-s}(t_k)$ – двойная разность ионосферных задержек навигационных сигналов на частоте L1, $\nabla \Delta N_{1,i-m}^{j-s}(t_k), \nabla \Delta N_{2,i-m}^{j-s}(t_k)$ – двойные разности фазовых неоднозначностей на частотах L1 и L2, $\delta L_{GF,i-m}^{j-s}(t_k)$ – двойные разности погрешностей из-за многолучевости и шумов фазовых наблюдений.

Приведенные «безгеометрические» комбинации двухчастотных фазовых наблюдений позволяют оценить ионосферные задержки с высокой точностью и использовать их для решения задач оценки и моделирования ПЭС. Если в ходе обработки фазовых наблюдений разрешены фазовые неоднозначности $\nabla \Delta N_{1,i-m}^{j-s}(t_k), \nabla \Delta N_{2,i-m}^{j-s}(t_k)$, то двойные GF разности содержат только информацию

об ионосферных задержках. Используя наблюдения одинарных и двойных GF разностей на всех измерительных базах сети референчных станций, возможно восстановить модель ПЭС и разделить медленно меняющиеся (трендовые) и вариационные составляющие ионосферных задержек.

Заключение

В настоящей работе описаны цель, запланированные и выполняемые задачи научно-исследовательских работ 2013 г. по экспериментальной отработке программно-математического обеспечения обработки наблюдений сети наземных перманентных референчных ГНСС-станций Украины для оценки и моделирования пространственно-временного распределения ПЭС ионосферы по фазовым ГНСС наблюдениям.

Описаны главные задачи обработки ГНСС наблюдений для достижения поставленной цели моделирования ПЭС, текущее состояние выполнения научного проекта в 2013 г. Представлен трехэтапный подход к решению целевой задачи, включающий:

- обработку ГНСС наблюдений сети референчных станций и формирование «безгеометрических фазовых линейных комбинаций»,
- выбор аппроксимирующей ПЭС модели и решение обратной задачи восстановления распределения электронной концентрации ионосферы по пространству и во времени,
- верификацию и оценку точности полученной реализации модели.

Кратко описаны уравнения фазовых GPS наблюдений двух частот и их линейные «безгеометрические» комбинации, которые планируется оценивать и использовать в задаче моделирования ПЭС.

Для моделирования ПЭС предполагается использовать и исследовать свойства относительно простой и эффективной модели «Spherical Cap Harmonic Model». Впоследствии планируется провести моделирование с использованием и других моделей с целью сравнительного анализа характеристик полученных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лизунов Г.В., Лукенюк А.А., Макаров А.Л., Фёдоров О.П. Космический проект Ионосат-Микро: цели и методы // Космический проект «Ионосат-Микро». — К. : Академперіодика, 2013. — С. 11—25.
2. Жалило А.А., Желанов А.А., Шелковенков Д.А., Дицкий И.В., Бессонов Е.А. Основные результаты разработок исследовательской группы ХНУРЭ/ГАО НАНУ в области высокоточного ГНСС-позиционирования в период с 2002—2011 гг. // Научно-технический и производственный журнал «Геодезия и картография». — 2012. — № 12, Москва, Россия. — С. 38—50.
3. Hernandez-Pajares M., Juan J.M. and Sanz J. «Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis». — Mode of access: http://gage14.upc.es/WARTKpapers/2005JA011474_final.pdf.
4. Hernández-Pajares M., Juan M.J., Sanz J., Aragon-Angel A., Ramos-Bosch P., Odiik D., Teunissen P.J.G., Samson J., Tossaint M., Albertazzi M., de Bakker P., Verhagen S., van der Marel H.

- Wide-Area RTK. High Precision Positioning on a Continental Scale // Inside GNSS. — March/April 2010. — P. 35—46.
5. Жалило А.А., Бессонов Е.А. Повышение точности дифференциального одночастотного ГНСС—позиционирования путём сетевой коррекции ионосферных погрешностей // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». — 2012. — № 169, Харьков. — С. 302—314.
6. Schaer Stefan. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System / Stefan Schaer // Ph.D. dissertation, Astronomisches Institut der Universitat Bern. — 1999. — 228 p.
7. Хода О.А Программное обеспечение «Клио» для определения параметров ионосферы / О.А. Хода // ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. — 1999. — Т. 5, № 5/6. — С. 25—32.
8. Fedrizzi Mariangel. The Low-latitude Ionosphere: Monitoring its Behaviour with GPS / Mariangel Fedrizzi, Richard B. Langley, Attila Komjathy, Marcelo C. Santos, Eurico Rodrigues de Paula, Ivan Jelinek Kantor // Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001). — September 11—14, 2001. — Salt Lake City, UT. — P. 2468—2475.
9. Komjathy A. *Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System* / Komjathy A. // Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 188. — University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada. — 248 p.
10. Sparks L. Estimating SBAS Ionospheric Delays Without Grids: The Conical Domain Approach / L. Sparks, A. Komjathy, A.J. Mannucci // Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of The Institute of Navigation ION NTM 2004. — San Diego, CA. — 26—28 January 2004. — P. 530—541.
11. Oscar L. Colombo Resolving Carrier-Phase Ambiguities On The Fly, At More Than 100 km From Nearest Reference Site, With The Help Of Ionospheric Tomography / Colombo Oscar L. // Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999). — 14—17 September 1999, Nashville, TN. — P. 1635—1642.
12. Hernandez-Pajares M. Application of ionospheric tomography to real-time GPS carrier-phase ambiguities resolution, at scales of 400—1000 km and with high geomagnetic activity / Hernandez-Pajares, Juan J. M., Sanz J., Colombo O. L. // Geophysical Research Letters. — July 1, 2000. — Volume 27, Issue 13. — P. 2009—2012.
13. Liu J. Mapping the regional ionospheric TEC using a spherical cap harmonic model and IGS products in high latitudes and the arctic region / J. Liu, R. Chen, H. Kuusniemi, Z. Wang, H. Zhang, J. Yang // Proceedings of IAIN 2009 World Congress, Stockholm, Sweden. — Oct. 27-30, 2009. — Mode of access.
14. http://www.academia.edu/2885188/Mapping_the_regional_ionospheric_TEC_using_a_spherical_cap_harmonic_model_and_IGS_products_in_high_latitudes_and_the_arctic_region
15. Liu J., Chen R., Kuusniemi H., Wang Z., Zhang H., and Yang J. A Preliminary Study on Mapping the Regional Ionospheric TEC Using a Spherical Cap Harmonic Model in High Latitudes and the Arctic Region // Journal of Global Positioning System. — 2010. — Vol.9(1). — P. 22—32.
16. Гофманн-Веллінгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія та практика: пер. з англ. / Б. Гофманн-Веллінгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; пер. з англ під ред. Я. С. Яцківа. — Київ: Наукова думка, 1996. — 380 с.
17. Rizos Chris. Principles and practice of GPS surveying // School of engineering, The University of New South Wales, Australia, 1999. — 555 p.
18. Leick A. GPS Satellite Surveying, 3-rd ed. / John Wiley — New York, 2003. — 464 p.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К моменту публикации настоящей монографии подготовка проекта «Ионосат-Микро» вступила в завершающую фазу. Изготавливаются лётные образцы приборов и узлы спутниковой платформы и можно ожидать, что в 2014 году космический аппарат «Микросат» будет готов к запуску.

На нынешнем этапе на первый план выходит подготовка практических шагов по реализации проекта в космосе, что включает создание и отработку системы управления ходом космических измерений. С этой целью уже сейчас создаются механизмы принятия решений и обмена информацией между участниками проекта, и механизм взаимодействия с координационной группой в ГП «КБ «Южное». Отметим, что весь информационный обмен, составление и подача заявок на включение научной аппаратуры будут вестись автоматизировано, через веб-портал проекта.

Следующий блок заданий связан с циклом обработки данных, поступающих со спутника на Землю. Сюда относится декодирование потока информации, принимаемого наземными станциями, тарировка и очистка данных от сбоев, ряд других операций и, в конечном итоге, формирование каталога экспериментальных данных. При этом кроме собственно результатов космических измерений в каталог будет вноситься дополнительная информация о текущем времени, местоположении и ориентации КА, геофизических и гелиофизических условиях измерений и т.д. Общее число таких параметров составляет несколько десятков наименований.

Результаты реализации проекта «Ионосат-Микро», как и любого научного эксперимента, очевидно, будут иметь ценность лишь в той мере, в которой они будут востребованными для научных исследований. История космонавтики знает немало примеров, когда значимые научные данные не были обработаны, были закрытыми или слабо доступными, в результате чего усилия целых команд учёных и конструкторов оказались сведенными к нулю. Поэтому важнейшей составляющей проекта «Ионосат-Микро» является создание веб-портала его результатов с открытым режимом доступа и удобным в пользовании интерфейсом. Данные проекта адресуются широкому кругу специали-

стов, преподавателей, студентов, просто интересующихся лиц, которые могли бы использовать их в собственных научных и образовательных целях.

Достижение научных и технических целей проекта «Ионосат-Микро» требует активных и согласованных усилий всех его участников — учёных, конструкторов, инженеров, программистов, служащих. Поэтому именно на этапе предварительной подготовки важно выработать механизмы командных действий, достичь взаимопонимания партнёров, осознать возможности и риски проекта. С этой целью проводятся рабочие совещания (в том числе в рамках ежегодной Украинской конференции по космическим исследованиям) на которые приглашаются как непосредственные исполнители проекта, так и широкая научная общественность. Этой же цели служит и издание данной монографии. Редколлегия надеется посвятить очередные издания анализу результатов реализации проекта «Ионосат-Микро» и подготовке программы следующего космического проекта — «Ионосат».

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Андреевский Станислав Евгеньевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Москва, Россия, andr@izmiran.ru
2. Беляев Сергей Михайлович, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Львов, Украина
3. Бессонов Евгений Андреевич, Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ), г. Харьков, Украина, bessonov.evgeniy@gmail.com
4. Вольвач Александр Евгеньевич, Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория», пгт. Научный, Крым, Украина, volvach@meta.ua
5. Галабурда Дмитрий Анатольевич, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск, Украина
6. Гармаш Константин Петрович, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина, Konstantin.P.Garmash@univer.kharkov.ua
7. Глухов Валерий Сергеевич, Национальный университет «Львівська Політехніка», г. Львов, Украина, glukhov@polynet.lviv.ua
8. Дицкий Игорь Владимирович, Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ), г. Харьков, Украина, ditskiy@mail.ru
9. Дудкин Денис Федорович, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Львов, Украина, dd@isr.lviv.ua
10. Дудкин Федор Львович, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Львов, Украина, fd@isr.lviv.ua
11. Жалило Алексей Александрович, Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ), г. Харьков, Украина, a_zhalilo@ukr.net
12. Желанов Алексей Александрович, Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ), г. Харьков, Украина, datum@ukr.net
13. Засуха Сергей Александрович, Государственное космическое агентство Украины, г. Киев, Украина
14. Калита Богдан Иванович, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Львов, Украина
15. Каратаева Лариса Михайловна, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Львов, Украина, karat@isr.lviv.ua
16. Коваль Анатолий Владимирович, Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев, Украина, weralwolf@gmail.com
17. Корепанов Валерий Евгеньевич, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Львов, Украина, vakor@isr.lviv.ua

18. Кузнецов Владимир Дмитриевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Москва, Россия, kvd@izmiran.ru
19. Кузьмич Андрей Андреевич, Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев, Украина, andkuzmich@gmail.com
20. Кулагин Сергей Николаевич, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, г. Харьков, Украина
21. Кшевски Марцин (Krzewski Marcin), Centrum Badań Kosmicznych, г. Варшава, Польша, mkrzewski@cbk.waw.pl
22. Леонтьев Антон Юрьевич, Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев, Украина, antonio.leontiev@gmail.com
23. Лизунов Георгий Вячеславович, Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев, Украина, georgii.lizunov@gmail.com
24. Лихтенбергер Янош (Lichtenberger János), Eötvös Loránd University, г. Будапешт, Венгрия
25. Лукенюк Адольф Антонович, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Львов, Украина, luk@isr.lviv.ua
26. Макаров Александр Леонидович, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск, Украина, info@yuzhnoye.com
27. Мезенцев Валентин Петрович, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Львов, Украина
28. Меланченко Александр Геннадиевич, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск, Украина
29. Моравски Марек (Morawski Marek), Centrum Badań Kosmicznych, г. Варшава, Польша, morawski@cbk.waw.pl
30. Москалев Сергей Игоревич, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск, Украина
31. Ногач Роман Тадеевич, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Львов, Украина, r.t.nogach@ukrpost.net
32. Скороход Татьяна Владиславовна, Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев, Украина, tauna_83@ukr.net
33. Поднос Валентин Аронович, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина, Valentin.A.Podnos@univer.kharkov.ua
34. Письменный Николай Иванович, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, г. Харьков, Украина
35. Пятак Игорь Авдеевич, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск, Украина
36. Пьянкова Елена Владимировна, Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев, Украина, el.piankova@gmail.com
37. Решетник Владимир Николаевич, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, г. Киев, Украина, reshetnykv@gmail.com
38. Роткель Ханна (Rothkaehl Hanna), Centrum Badań Kosmicznych, г. Варшава, Польша, hrot@cbk.waw.pl
39. Синельников Вячеслав Михайлович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Москва, Россия, sinel@izmiran.ru
40. Токмак Николай Анатольевич, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, г. Харьков, Украина
41. Тырнов Олег Федорович, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина, Oleg.F.Tyrnov@univer.kharkov.ua



КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ

«ИОНОСАТ-МИКРО»

42. Ференц Чаба (Ferencz Csaba), Eötvös Loránd University, г. Будапешт, Венгрия
43. Хорошилов Виктор Сергеевич, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск, Украина
44. Цокур Анатолий Григорьевич, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, г. Харьков, Украина
45. Черногор Леонид Феокистович, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина, leonid.f.chernogor@univer.kharkov.ua
46. Шовкопляс Юрий Анатольевич, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепропетровск, Украина
47. Шендерук Сергей Григорьевич, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, г. Львов, Украина, shs@isr.lviv.ua

СОДЕРЖАНИЕ

Засуха С.А., Фёдоров О.П.

Спутниковая диагностика ионосферы: перспективы украинской космической программы исследований	3
--	---

Раздел 1. Научные задачи

Лизунов Г.В., Лукенюк А.А., Макаров А.Л., Фёдоров О.П.

Космический проект «Ионосат-Микро»: цели и методы	11
---	----

Лизунов Г.В., Леонтьев А.Ю., Скороход Т.В.

Изучение динамики ионосферы в проекте «Ионосат-Микро»	26
---	----

Ференц Ч., Дудкин Ф.Л., Корепанов В.Е., Лизунов Г.В., Лихтенбергер Я.

Исследование распространения вистлерных волн в проекте «Ионосат-Микро»	46
--	----

Дудкин Ф.Л., Дудкин Д.Ф.

Оценка требований к платформам микро- и наноспутников в контексте длительных измерений магнитного поля Земли	53
--	----

Раздел 2. Приборный комплекс

Андреевский С.Е., Кузнецов В.Д., Синельников В.М.

Радиозатменные измерения электронной концентрации ионосферы с помощью спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС/GALILEO	69
---	----

Корепанов В.Е., Беляев С.М.

Электромагнитные волновые измерения в проекте «Ионосат-Микро»	81
---	----

Кулагин С.Н., Письменный Н.И., Токмак Н.А., Цокур А.Г.

Аппаратура для диагностики нейтрального и заряженных компонентов ионосферной плазмы в проекте «Ионосат-Микро»	96
---	----

Роткель Х., Моравски М., Киевски М., Лизунов Г.В.

Диагностика спектра плазменных волн с использованием радиочастотного анализатора RFA	101
--	-----

Макаров А.Л., Шовкопяс Ю.А., Москалев С.И., Галабурда Д.А.

Космический аппарат «Микросат»	109
--------------------------------------	-----

Лукенюк А.А., Корепанов В.Е., Шувалов В.А., Шендерук С.Г.

Комплекс научной аппаратуры «Ионосат-Микро»	118
---	-----

<i>Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г.</i> Унифицированный интерфейс бортовых систем КА.....	126
<i>Глухов В.С., Лукенюк А.А., Шендерук С.Г.</i> Комплект ПЛИС системы сбора научной информации космического аппарата.....	134
<i>Макаров А.Л., Меланченко А.Г., Пятак И.А., Хорошилов В.С.</i> Обеспечение угловой привязки измерений комплекса научной аппаратуры спутника «Микросат»	140

Раздел 3. Наземный сегмент

<i>Решетник В.Н., Кузьмич А.А., Коваль А.В., Пьянкова Е.В.</i> Центр хранения, обработки и распространения данных спутниковых измерений PROMIS	149
<i>Черногор Л.Ф., Гармаш К.П., Поднос В.А., Тырнов О.Ф.</i> Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина — средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах	160
<i>Вольвач А.Е., Степанян Н.Н., Юровский Ю.Ф.</i> Служба Солнца Украины как наземное обеспечение проекта «Ионосат-Микро»	183
<i>Калита Б.И., Каратаева Л.М., Мезенцев В.П., Ногач Р.Т.</i> Активные акустические эксперименты со спутником DEMETER	193
<i>Жалило А.А., Желанов А.А., Бессонов Е.А., Дицкий И.В.</i> Экспериментальная отработка программно-математического инструментария для оценки и моделирования полного электронного содержания ионосферы по данным сети наземных перманентных референчных ГНСС станций Украины	200
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	210
Сведения об авторах.....	212

«Іоносат-Мікро» — це космічний проект, передбачений Загальнодержавною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2013—2017 роки. Загальна мета проекту полягає у вивченні динамічних процесів в іоносфері в широкому діапазоні просторових і часових масштабів за допомогою узгоджених космічних і наземних вимірювань; пошуку взаємозв'язку іоносферних збурень з процесами на Сонці, в магнітосфері, атмосфері та внутрішніх оболонках Землі. У монографію включені статті учасників проекту, що містять детальний опис завдань космічних вимірів, бортового приладового комплексу та наземних засобів.

Для широкого кола фахівців у галузі космічних досліджень, викладачів і студентів.

Наукове видання

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

КОСМІЧНИЙ ПРОЕКТ «ІОНОСАТ- МІКРО»

Під загальною редакцією:
С.О. Засухи, О.П. Федорова

Російською мовою

Видається в авторській редакції

Художнє оформлення *Є.О. Ільницького*
Технічні редактори *Т.М. Шендерович,*
О.А. Лук'янчук
Комп'ютерна верстка *О.А. Лук'янчук*

Підписано до друку 14.08.2013. Формат 70 × 100/16.
Папір офсетний. Гарн. Ньютон.
Ум. друк. арк. 17,71 + 1,62 вкл. на крейд. папері.
Обл.-вид. арк. 18,59. Тираж 200 прим. Зам. № 3659.

Видавець і виготовлювач
Видавничий дім «Академперіодика» НАН України
01004, Київ, вул. Терещенківська, 4
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001