

УДК 550.385

В. Д. Кузнецов, Ю. Я. Ружин, В. М. Синельников

Институт земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль ім. М. В. Пушкова
Російської академії наук, Троїцьк, Росія

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА МКС

Приводяться результати низки геофізичних експериментів з нагрівання іоносфери стендом «Сура», під час яких проводились координовані спостереження з використанням наукової апаратури «Фіалка» на борту РС МКС. Коротко описано експерименти, що готуються до реалізації на РС МКС.

ВВЕДЕНИЕ

Геофизические эксперименты на Российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) проводятся в рамках «Долгосрочной программы научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на Российском сегменте МКС». Целью этих экспериментов и исследований является изучение геофизических процессов из космоса, включая процессы, протекающие в верхней атмосфере Земли и околоземном космическом пространстве.

Международная космическая станция осуществляет свой полет на высотах около 350 км в ионосфере Земли, которая является чувствительным индикатором гелиогеофизических явлений в системе «Солнце — Земля» и в системе «литосфера — атмосфера». Воздействие солнечных активных явлений — вспышек и выбросов — сильно влияет на состояние ионосферы, вызывая нарушение радиосвязи, флуктуации сигналов навигационных систем типа ГЛОНАСС и GPS, разбухание атмосферы и аномальное торможение МКС и спутников в периоды магнитных бурь. Активные литосферные процессы — процессы подготовки землетрясений, извержения вулканов и др. также имеют свои проявления в ионосфере, которые в последнее время активно изучаются для поиска предвестников землетрясений и их диагностирования. Кроме этого, в ионосфере регистрируются результаты антропо-

генной деятельности — электромагнитная загрязненность промышленных регионов, сигналы от многочисленных вещательных станций, исследовательских нагревных установок (типа российская «Сура» и американская HAARP). Таким образом, ионосфера является важнейшим элементом геофизических исследований и многочисленных приложений, она же является естественной средой обитания МКС. Все это говорит о важности и актуальности той части программы исследований на МКС, которая связана с геофизическими исследованиями.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НАГРЕВНЫМ СТЕНДОМ «СУРА» («МКС-СУРА»)

С использованием научной аппаратуры «Фиалка-МВ-Космос» (далее «Фиалка») (высокочувствительная радиометрическая УФ-камера с усилителем изображения, рабочая область 200—350 нм) (эксперимент «Релаксация») в период 2007—2009 гг. выполнена серия наблюдений при проведении комплексных экспериментов с нагревным стендом «Сура». В этих экспериментах осуществлялся нагрев ионосферы мощными радиоволнами над областью стенда (г. Васильсурск, Нижегородская область, 56.12° с. ш., 46° в. д.). Аппаратурой «Фиалка-МВ-Космос» проводились наблюдения свечений в предполагаемой области нагрева. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Серия экспериментов «МКС-Сура» включала шесть сеансов, во время которых работа стенда «Сура» сопровождалась наблюдениями с борта

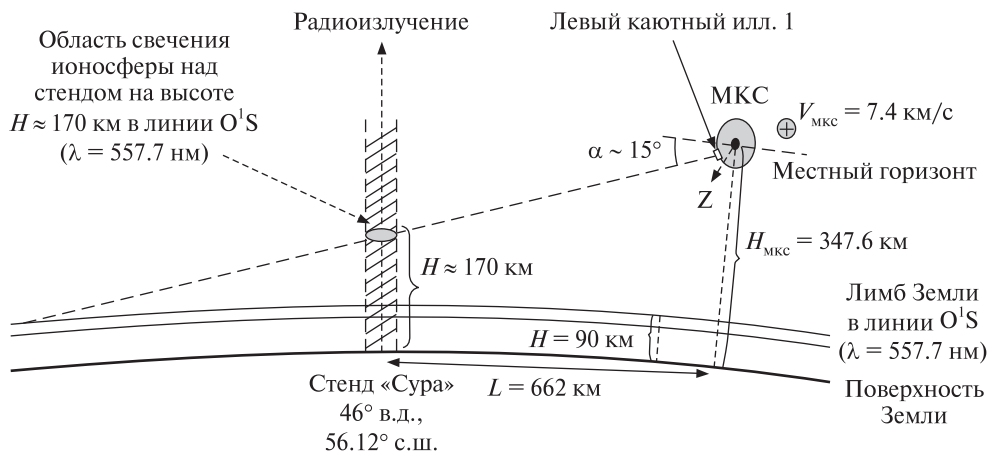


Рис. 1. Схема эксперимента по наблюдениям ионосферы над областью нагревного стенда «Сура» аппаратурой «Фиалка» на РС МКС (2 октября 2007 г., МКС-15)

МКС, а также сопутствующими наземными наблюдениями 2 октября 2007 г., 26 сентября 2008 г., 16 марта 2009 г., 20 апреля 2009 г. (наблюдения с борта МКС в магнитосопряженной области), 9 ноября 2009 г., и 10 ноября 2009 г.

Основные характеристики стенда «Сура» при проведении эксперимента: частота радиоволн нагрева 4.3—9.5 МГц, мощность передатчиков 3×250 кВт, эффективная мощность излучения составляла 10—80 МВт. Приведенные параметры нагревного стенда обеспечивают достижение на высотах ионосферы (около 300 км) условий для нагрева электронов согласно нелинейной теории взаимодействия радиоволн с ионосферной плазмой [1]. Во всех экспериментах использована рабочая частота 4.3 МГц с поляризацией обыкновенной волны, которая всегда превышала критическую частоту ионосферного слоя F2. При этом мощным радиоизлучением стенда засвечивался весь объем по высоте ионосферы в пределах диаграммы направленности антенны стенда.

В эксперименте 2 октября 2007 г. минимальное расстояние между МКС и стендом «Сура» составляло 750 км, и в период действия радионагревного стенда аппаратурой «Фиалка» с борта МКС была зарегистрирована область свечения (см. рис. 2), расположенная северо-восточнее стенда (150—200 км) и перемещающаяся на восток в плоскости кадра. Яркость свечения составляла десятки килорэллерей. Наблюдаемое свечение происходило на спокойном фоне первого эмиссионного слоя и аврорального овала как до,

так и после прохождения МКС стенда «Сура». Проведенный анализ показал, что заметных геологофизических аномалий во время эксперимента не было, межпланетное магнитное поле было очень спокойное, скорость солнечного ветра — минимальная, планетарный индекс K_p во время эксперимента составлял всего $K_p = 1.5$ (не более 3), по данным радарных наблюдений авроральный овал был спокойным.

По данным ближайшей к стенду «Сура» магнитной обсерватории Карпогоры (ИЗМИРАН) после нагревных импульсов наблюдались возмущения H - и D -компонентов геомагнитного поля. На этой основе, а также наблюдавшегося

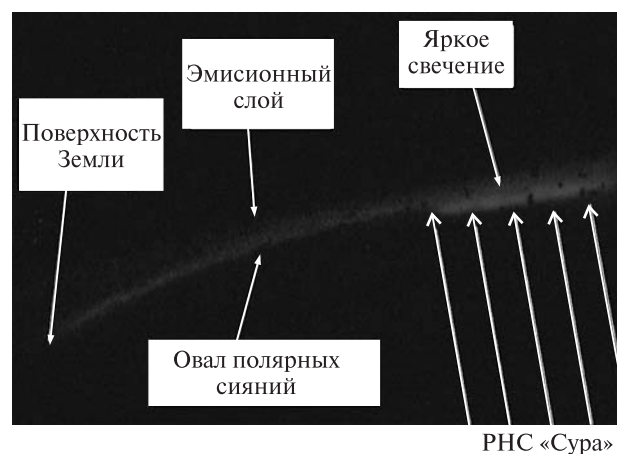


Рис. 2. Регистрация свечения в период действия радионагревного стенда (РНС) «Сура» на ионосферу Земли аппаратурой «Фиалка-МВ-Космос» (2 октября 2007 г., МКС-15)

свечения можно предположить возможность того, что это свечение было стимулировано нагревными импульсами «Суры», т. е. является искусственным. Мощности станда «Сура» явно недостаточно, чтобы вызвать яркое свечение непосредственно нагревом ионосферной плазмы, поэтому явление может быть связано с эффектом модулированного нагрева, когда период нагревных импульсов близок к периоду собственных колебаний альвеновской моды плазмы магнитной силовой трубки, опирающейся на пятно (узел стоячей волны).

В результате происходит модификация ионосферной интегральной проводимости. Периодическое изменение проводимости модулирует условия для устойчивых колебаний, характерных для спокойных условий. Сами колебания могли быть вызваны слабым коротким (меньше 1 мин, амплитуда около 2 нТл) импульсом в геомагнитном поле планетарного характера.

Из других обнаруженных с использованием аппаратуры «Фиалка» эффектов от нагревного станда «Сура» в проведенных экспериментах «МКС-Сура» можно отметить регистрацию оптического свечения (предположительно молекул кислорода, линия $\lambda = 761.9$ нм), промодулированное периодичностью работы нагревного станда, в эксперименте 16 марта 2009 г. Этот эффект был ярко выражен в момент пролета МКС вблизи станда и резко исчезал при его выключении в конце сеанса.

Эксперимент по наблюдениям с МКС области в южном полушарии, магнитосопряженной со областью ионосферы над стандом «Сура», был проведен 20 апреля 2009 г. Было зарегистрировано слабое свечение, положение которого соответствует расчетной (модель IGRF 2010) магнитно-сопряженной области для станда «Сура». Обнаруженное свечение можно трактовать как искусственное полярное сияние, вызванное работой станда, так как оно отсутствовало как до, так и после пролета МКС вдоль орбиты во время эксперимента. Отметим также, что эксперимент проведен в спокойных ночных условиях, судя по параметрам гелио-геомагнитной активности. Предварительное изучение видеозаписи области свечения, магнитосопряженной со стандом

«Сура», показало наличие слабосветящихся «пятен», коррелирующих с работой станда «Сура» при пролете МКС на минимальном расстоянии от этой области. Более подробное описание проведенных экспериментов «МКС-Сура» можно найти в работах [2, 3].

ЭКСПЕРИМЕНТ «ИМПУЛЬС»

В рамках эксперимента «Импульс-1» проведена отработка плазменного инжектора для изучения взаимодействия пучков плазмы с ионосферой, выполнены тестовые инъекции, по результатам которых проводится коррекция параметров инжектора для проведения второго этапа эксперимента («Импульс-2»). Параметры импульсного инжектора плазмы: скорость ионов 30—40 км/с, степень ионизации плазмы $\beta = 10\%$; периодичность 1.8 ± 0.2 Гц; длительность импульса — около 10 мкс.

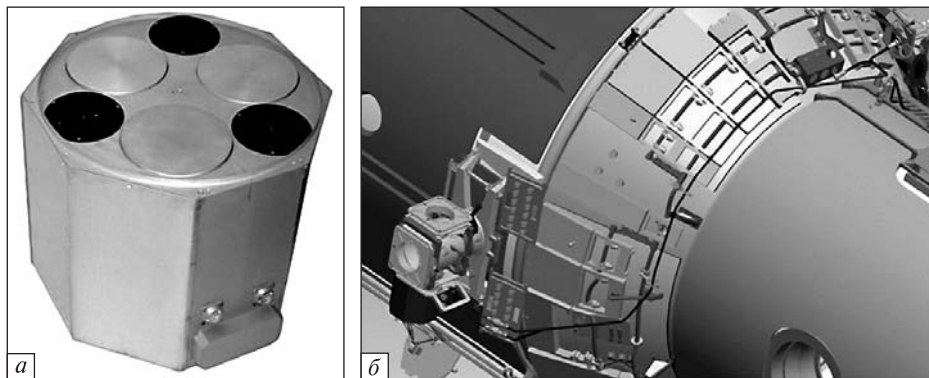
ЭКСПЕРИМЕНТ «МОЛНИЯ-ГАММА»

Эксперимент «Молния-гамма» является продолжением ранее осуществленного эксперимента «Молния-СМ», основной целью которого была отработка видеометрической системы ВФС-3М для регистрации оптических свечений от молниевых разрядов. В рамках эксперимента «Молния-гамма», научная аппаратура (см. рис. 3) которого («Фотон-гамма») подготовлена к доставке на борт РС МКС, предполагается провести исследование атмосферных вспышек оптического и гамма-излучения в условиях грозовой активности.

Целью эксперимента является изучение природы высотного разряда «спрайт» — мощного всплеска оптического излучения из грозовой зоны; проверка механизма возникновения «спрайта» как пробоя на убегающих электронах [4]; изучение свойств, частоты возникновения и интенсивности импульсного гамма-излучения для практических целей — безопасности полетов в грозовой атмосфере.

Параметры научной аппаратуры: диапазон энергий гамма-датчиков — 0.3—1 МэВ, время измерений — 16 мкс; угол поля зрения каждого из трех оптических датчиков $\pm 32^\circ$, спектральный диапазон датчика красного свечения

Рис. 3. Научная аппаратура «Фотон-гамма» эксперимента «Молния-гамма» — блок внешних датчиков — три гамма-детектора и три надирных фотометра (а) и установка блока внешних датчиков на служебном модуле РС МКС (б)



$\lambda\lambda = 0.65...0.75$ мкм, чувствительность датчика красного свечения — не хуже 0.5 мкВт/м², спектральный диапазон датчика голубого свечения $\lambda\lambda = 0.39...0.43$ мкм, чувствительность датчика голубого свечения — не хуже 80 нВт/м², спектральный диапазон датчика грозовых разрядов $\lambda\lambda = 0.8...1.0$ мкм, чувствительность датчика грозовых разрядов — не хуже 0.1 мВт/м².

Схема космического эксперимента с аппаратурой «Фотон-гамма» предполагает проведение сеансов наблюдений на теневых участках верхней атмосферы Земли в оптическом и гамма-диапазонах. При этом должен быть реализован отбор событий, связанных с одновременной регистрацией оптических и гамма-вспышек. Для этих событий предполагается запись временных профилей с высоким разрешением, а также запись энергетических спектров в гамма-диапазоне. Начало эксперимента запланировано на 2011 г.

ЭКСПЕРИМЕНТ «СЕЙСМОПРОГНОЗ-СМ»

Эксперимент «Сейсмопрогноз-СМ» направлен на экспериментальную отработку методов мониторинга электромагнитных и плазменных предвестников землетрясений, чрезвычайных ситуаций и техногенных катастроф. Научная аппаратура эксперимента (плазменно-волновой диагностический контейнер) состоит из двух радиофизических модулей — радиочастотного спектроанализатора и аппаратуры спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС. Комплекс научной аппаратуры будет обеспечивать определение характеристик распространения радиосигналов спутниковых систем навигации в режиме радио-

затменных измерений и построение высотных профилей электронной концентрации ионосферы (до высоты МКС); измерение спектра плазменных колебаний в ионосфере и пространственно-временного распределения электронной концентрации ионосферы вдоль орбиты МКС. Параметры научной аппаратуры: плазменный радиоспектрометр — диапазон часто принимаемых сигналов — $0.05...15$ МГц, пороговая чувствительность — 6 мкВ (на частоте 50 кГц), не более 1 мкВ (1 МГц), не более 1 мкВ (15 МГц); навигационный приемник — число каналов слежения за спутниками — 20 , обрабатываемые сигналы — С/А, Р1, Р2; относительная погрешность измерений: кодовой задержки — 10 см, фазовой — 0.1 мм. На РС МКС плазменно-волновой диагностический контейнер будет устанавливаться на посадочное место аппаратуры эксперимента «Молния-гамма» после его завершения. Ориентировочный срок реализации эксперимента — 2012—2013 гг.

ЭКСПЕРИМЕНТ «ГИДРОКСИЛ-МКС»

Задачами эксперимента «Гидроксил-МКС» («Оптические наблюдения состояния верхней атмосферы для прогнозирования геофизических катастроф. Создание методик глобального мониторинга состояния верхней атмосферы») являются исследования долговременной изменчивости гидроксильного излучения ($\lambda\lambda = 840...1040$ нм, высоты $80...93$ км) и излучения зеленой линии атомарного кислорода ($\lambda = 557.7$ нм, высоты $88...110$ км) и их связи со структурными параметрами атмосферы; разработка эмпири-

ческих моделей распределения интенсивностей этих излучений в зависимости от гелио-геофизических условий; применение данных об эмиссиях для разработки методов диагностирования землетрясений и других природных и техногенных катастроф. Научная аппаратура эксперимента — спектрофотометрический комплекс — состоит из двух оптических модулей: модуль гидроксильных свечений ($\lambda\lambda = 840\text{...}1040$ нм) и модуль свечений атомарного кислорода в зеленой линии ($\lambda = 557.7$ нм). Наблюдения будут проводиться по линии горизонта, по касательной к излучающему слою. Они позволят определять изменения характеристик атмосферы под влиянием солнечной и антропогенной деятельности, регистрировать свечения над сейсмоактивными областями, оценивать количество водяного пара и значений температуры в широком диапазоне высот. Эксперимент предполагается осуществить на многоцелевом лабораторном модуле РС МКС. Ориентировочные сроки начала эксперимента 2011—2012 гг.

Эксперименты «Молния-гамма» и «Гидроксил» выполняются в кооперации с научно-исследовательским учреждением «Институт при-

кладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белгосуниверситета.

1. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973. — С. 67—71.
2. Ружин Ю. Я., Иванов К. Г., Кузнецов В. Д., Петров В. Г. Контролируемая инъекция радиоимпульсов в ионосферно-магнитосферную систему и появление микросуббури 2 октября 2007 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2009. — **49**, № 3. С. 342—352.
3. Ружин Ю. Я., Кузнецов В. Д., Карабаджак Г. Ф. и др. Космический эксперимент «Сура-МКС» (2 октября 2007 года) // Космонавтика и ракетостроение. — 2009. — № 4. — С. 66—70.
4. Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Phys. Lett. A. — 1992. — **165**, N 5—6. — P. 463—468.

Надійшла до редакції 17.12.10

V. D. Kuznetsov, Yu. Ya. Ruzhin, V. M. Sinelnikov

GEOPHYSICAL EXPERIMENTS ABOARD THE ISS

The results of a series of experiments on heating the ionosphere through the «Sura» facilities with coordinated observations aboard the ISS are presented. The experiments aboard the ISS which are on the stage of preparation are briefly described.