

АКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ: КОРОТКОВОЛНОВЫЙ ТРИГГЕР СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ И АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ

Ю. Я. Ружин, В. Д. Кузнецов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

В работе приведены результаты новых экспериментов по модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением нагревного стенда СУРА. Важно отметить, что из 12 экспериментов проведённых с модулированным нагревом ионосферы в 2007–2012 гг., только в двух из них зарегистрированы возмущения в магнитном поле, которые можно интерпретировать как признак суббури, искусственно вызванных нагревным стендом СУРА. Эффекты модификации сопровождались наблюдениями на борту международной космической станции (МКС), спутником ДЕМЕТЕР и средствами наземных обсерваторий. Результаты этой серии экспериментов СУРА-МКС показали возможность локализации суббури, если активные эксперименты на базе стенда СУРА планировать в период около полуночи (в секторе разрыва Харанга или 21–24 LT) и желательно в конце восстановительной фазы геомагнитной бури (в невозмущённых ионосферных условиях).

Ключевые слова: активные эксперименты, модификация ионосферы, магнитные суббури.

ВВЕДЕНИЕ

Задачами современных космических исследований, особенно в части прогнозов космической погоды, являются детальное исследование характеристик околоземного космического пространства (ОКП) и процессов, ответственных за их изменчивость, а также возможности управления характеристиками среды для снижения рисков экономического характера. Ряд исследовательских современных программ, в частности программа ХААРП (Аляска, США) («Программа исследования полярных сияний высокочастотным воздействием»; HAARP — High Frequency Active Auroral Research Program. URL: <http://www.haarp.alaska.edu/haarp/index.html>), нацелены на широкие исследования в этой области. В России существует единственный, созданный в прошлом столетии, аналогичный стенд СУРА [Беликович и др., 2007] для облучения ионосферы мощным пучком радиоволн. Его потенциал на порядок слабее установки США и европейского стенда (Тромсё).

В экспериментах, выполненных на стенде EISCAT (European Incoherent SCATter; Ионосферно-нагревательный стенд) (Северная Норвегия, Тромсё), была продемонстрирована возможность триггерирования локальных суббуревых активаций [Blagoveshchenskaya et al., 2000] за счёт модификации ионосферно-магнитосферного взаимодействия вследствие кон-

Ружин Юрий Яковлевич — заместитель директора, доктор физико-математических наук, профессор, ruzhin@izmiran.ru

Кузнецов Владимир Дмитриевич — директор, доктор физико-математических наук, kvd@izmiran.ru

тролируемой инъекции мощных радиоволн в ночную авроральную ионосферу. Отметим, что стенд EISCAT находится на авроральных широтах, где высокий уровень различного рода геомагнитных и плазменных возмущений является обычным явлением, что определяет особенности проведения здесь нагревных экспериментов. Модификация ионосферы модулированными по амплитуде мощными радиоволнами и инъекция ультранизкочастотных — крайне низкочастотных — очень низкочастотных (УНЧ-КНЧ-ОНЧ) волн в магнитосферу Земли является одним из самых приоритетных направлений исследований, выполняемых на нагревном стенде HAARP. Сегодня стенд HAARP обладает наиболее высоким энергетическим потенциалом (эффективная мощность излучения до 3,6 ГВт) и наиболее низкой частотой излучения, что обеспечивает генерацию наиболее интенсивных плазменных возмущений по сравнению с другими стендами.

Даже кратко перечисленные выше результаты показывают, какой большой интерес до сих пор сохраняют исследования возможностей модификации ионосферы-магнитосферы Земли с помощью мощного радиоизлучения нагревных стендов [Гуревич, 2007], расположенных на её поверхности. Отечественный среднеширотный нагревный стенд СУРА (56.13N, 46.1E) даёт возможность проводить ионосферные плазменные исследования вне высокодинамичной авроральной области (например, [Беликович и др., 2007]). В рамках этих исследований на базе стенда СУРА в последние годы проведена серия новых экспериментов [Карабаджак и др., 2009; Ружин и др., 2009а б; Kuznetsov et al., 2008] с привлечением наземно-космических средств, в частности, российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС). Новизна программы заключалась в поиске резонансных условий для триггерирования мощных природных процессов относительно слабым, но целенаправленным воздействием.

СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА. АНОМАЛИЯ В ОПТИЧЕСКОМ СВЕЧЕНИИ

Эксперименты выполнялись в ночное время. Для радионагрева ионосферы с помощью стенда СУРА использовалось радиоизлучение обыкновенной поляризации, как правило, на частоте 4,3 МГц. Особенностью этих экспериментов являлось то, критическая частота f_oF_2 ионосферного слоя F2 была всегда меньше рабочей частоты мощной радиоволны (реализовывались условия нагрева «на просвет»), и мощным излучением стенда должен засвечиваться весь объём ионосферы по высоте в пределах диаграммы направленности. Частота модуляции была близка к частотам собственных альвеновских колебаний плазмы магнитной силовой трубки, опирающейся на пятно нагрева в ионосфере. Все эксперименты выполнялись с привлечением бортовой аппаратуры РС МКС (спектрозональная система «Фиалка-МВ-Космос») [Карабаджак и др., 2009].

В таблице приведены основные параметры коротковолнового (КВ) излучения и характеристики состояния ионосферы для двух сеансов рассматриваемых здесь измерений, в которых были зарегистрировано появление возмущений геомагнитного поля с суббуревыми признаками.

Основные параметры и условия проведения экспериментов

	Время нагрева. Режим излучения волны накачки (ВН)	Частота, эффективная мощность излучения и поляризация ВН. Диаграмма направленности	Критическая частота foF2	Ионосферные условия
Сеанс 1. 2.10.2007	18:40–19:00 UT ±1 мин	4300 кГц, 10 МВт (работал один модуль стенда), О-мода. 12×36° (вытянута в С-Ю направлении)	3,9 МГц	F ₂ -spread, более 4 ч (до эксперимента и после)
Сеанс 2. 25.10.2010	18:55–19:15 UT ±1 мин	4785 кГц, 100 МВт (работало три модуля стенда когерентно), О-мода. 10×10°	2,5 МГц	F ₂ -spread, (в развитии)

В эксперименте 2007 г. (сеанс 1) сразу после вхождения области нагрева в поле зрения бортового регистратора зарегистрировано яркое локальное свечение (рис. 1), которое, по оценкам, находилось в пределах 100...300 км (при высоте нижнего края сияния 130...150 км) к северу от стенда СУРА [Карабаджак и др., 2009, Ружин и др., 2011].

Предполагалось, что в экспериментах «на просвет» в результате взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой появляются нагретые электроны в гораздо большем поперечном сечении объёма магнитной силовой трубки (опирающейся на область нагрева), чем при классическом нагреве, где этот размер ограничен диаграммой направленности антенны стенда и узким слоем по высоте (в области отражения волны нагрева). Оценки показывают, что свечение такой яркости не может быть прямым результатом нагрева из-за низкой эффективной мощности нагрева (см. таблицу). Аномальным является не только яркость свечения, но и его положение — к северу от геометрической оси КВ-пучка, излучаемого стендом СУРА.

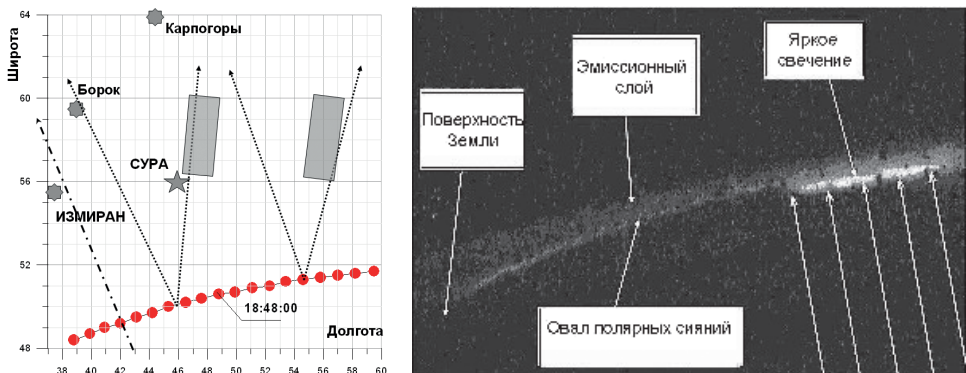


Рис. 1. План эксперимента в географических координатах (широта/долгота). Красным отмечена проекция орбиты МКС, пунктиром — поле зрения регистратора, штрих пунктиром — орбита искусственного спутника Земли (ИСЗ) ДЕМЕТЕР (DEMETETER — Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions), закрашенный прямоугольник — расчётное положение свечения. Панель справа — аномальное свечение

Свечение совпадает со всплеском “b” (рис. 2, левая панель) в магнитном поле и, по-видимому, обусловлено впрыскиванием электронов двойным слоем, развившемся на взрывной фазе активизации суббури, вызванной работой стенда. Размер свечения в долготном направлении составил около 200...250 км. Анализ гелиогеофизической обстановки показал отсутствие значительных гелио-геофизических аномалий в период проведения эксперимента. По данным сети INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network), планетарный индекс магнитной активности не превышал 3, авроральный овал был спокойный, заметные вариации солнечного ветра и межпланетного магнитного поля отсутствовали (по данным спутников GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) и др.). Эксперименты сопровождались поддержкой измерений средствами как наземных обсерваторий, так и спутника ДЕМЕТЕР.

СУББУРЯ В МАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЯХ

В настоящее время считается, в основном, что ионосфера является пассивным элементом в процессе реализации суббури. В нашем же случае при облучении ионосферы наблюдались явления, сопутствующие суббуревой активности и возмущениям ионосферно-магнитосферной системы. Прежде всего, отметим, что в двух комплексных экспериментах (из числа проведённых в 2007–2012 гг.) с нагревным стендом СУРА зарегистрированы весьма похожие друг на друга возмущения в магнитном поле Земли, которые можно интерпретировать как признак суббурь, стимулированных работой стенда.

На рис. 2 приведены вариации горизонтальной компоненты по данным обсерватории Карпогоры (ИЗМИРАН). Обращает на себя внимание такая особенность, как практически подобное повторение для обоих случаев характерных вариаций геомагнитного поля (см. **a**, **b** и **c**): сброс после 1-го импульса нагрева, всплеск в районе 5-6-го импульсов волны накачки,

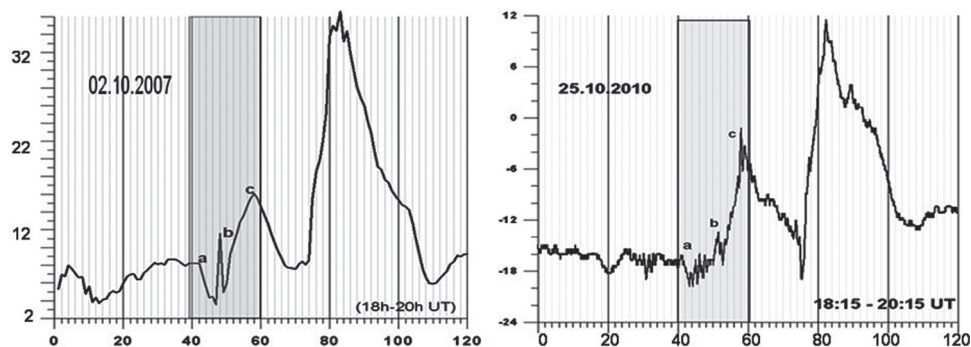


Рис. 2. Вариации (вертикальная шкала в [нТл]) магнитного поля Земли во время двух суббурь, вызванных работой стенда СУРА. Затемнённый прямоугольник — время сеансов нагрева

затем положительная бухта, которая заканчивается по окончании сеанса, и основная бухта амплитудой около 30 нТл и одинаковой длительностью для обоих событий. Последующий анализ магнитограмм обсерватории Карпогоры не обнаружил подобной комбинации вариаций в течение нескольких лет наблюдений. Это является дополнительным аргументом в пользу искусственного происхождения микросуббуль, развитие которых было зарегистрировано в сеансах 1 и 2 во время активных экспериментов на базе стенда СУРА. Магнитосопряжённые измерения в Индийском океане (в южном полушарии) подтвердили локализацию суббулевого явления в окрестности меридиана стенда СУРА.

ДАнные БОРТОВЫХ ПРИБОРОВ СПУТНИКА ДЕТЕТЕР И СОСТОЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ

Эксперимент 2007 г. проведён синхронно с пролётом спутника ДЕТЕТЕР [First results..., 2006]. Рассмотрим ситуацию в ионосфере в районе стенда по данным измерений комплексом научной аппаратуры спутника. На рис. 3 приведены результаты измерений аппаратурой спутника ДЕТЕТЕР (на высоте ~660 км) во время эксперимента 2 октября 2007 г., когда спутник пролетал между Москвой и Сурой на минимальном расстоянии ~400 км от стенда (см. проекцию орбиты на рис. 1). Верхняя панель на рис. 3 (слева), представляет измеренные потоки энергичных электронов с энергией до 0,1; 1,0 и 2,5 МэВ; средняя панель демонстрирует поведение концентрации электронов плазмы вдоль орбиты; на нижней панели показано изменение ионного состава плазмы. Стрелкой поперёк всех панелей отмечен момент пересечения спутником широты стенда СУРА (или момент максимального сближения ИСЗ с центром возмущённой магнитной силовой трубки). Видно, что, судя по падению концентрации плазмы (при пересечении широты 56°) и появлению признаков сильной нестационарности в распределении концентрации плазмы (средняя панель), граница плазмосферы находилась именно в этом месте, т.е. значительно южнее обычного её положения. Признаки качественного перехода в зону плазменной турбулентности подтверждаются также измерениями температуры ионов и электронов на борту спутника ДЕТЕТЕР [Ружин и др., 2012]. Здесь же начинают резко нарастать компонента энергичных электронов до 100 кэВ (верхняя панель) и концентрация тяжёлых ионов кислорода (нижняя панель). Ион кислорода становится доминирующим. Последний факт является свидетельством вхождения спутника в зону продольного тока, вытекающего из ионосферы.

О неустойчивости ионосферной плазмы в этой же области свидетельствует ионосферное рассеяние радиоволн типа F_2 -spread, обнаруженное на сети ионозондов на широте стенда в долготном секторе, по крайней мере, от Казани до Калининграда, что является дополнительным признаком [Ossakov, Chaturvedi, 1979] присутствия продольного тока в этом обширном регионе ещё до начала эксперимента.

Данные карт ТЕС, а мировой сети IGS (Intellectual General Solutions) станций позволяют оценить интегральное содержание плазмы по результатам

просвечивания ионосферы сигналами системы спутников GPS (Global Positioning System) (см. рис. 3, справа). Для оценки состояния ионосферно-магнитосферной системы применялся анализ глобальных TEC-карт в формате IONEX (IONosphere map EXchange), которые регулярно создаются лабораториями CODE (Control of Discrete Event Systems) и JPL (Jet Propulsion Laboratory) по данным мировой сети IGS-станций (используются данных более чем от 150 станций приёма сигналов спутников GPS).

Данные карт TEC мировой сети IGS станций позволяют оценить интегральное содержание плазмы по результатам просвечивания ионосферы сигналами системы спутников GPS (см. рис. 3, справа). Для оценки состояния ионосферно-магнитосферной системы применялся анализ глобальных TEC-карт в формате IONEX, которые регулярно создаются лабораториями CODE и JPL по данным мировой сети IGS станций (используются данных более чем от 150 станций приёма сигналов спутников GPS).

IONEX-данные доступны на сайте: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>. Известно также, что использование глобальных TEC-карт позволяет проводить непрерывный мониторинг ионосферы с высокой точностью и достоверностью [Jakowski, Sardon, 1996]. На рис. 3 (справа) представлены пространственные вариации Тес для конкретного дня (двухчасовой интервал: 18–20 UT) в единицах измерения TECU ($\text{TECU} = 10^{16} \text{эл/М}^2$) над данными пунктами (СУРА, ИЗМИРАН, Карпогоры). Пунктиром показана проекция орбиты спутника DEMETER во время работы стенда СУРА. Сравнивая Тес с поведением концентрации плазмы на высоте спутника DEMETER, видим, что интегральное содержание минимально в районе севернее стенда, что подтверждает вывод о положении границы плазмосферы вблизи параллели СУРА-ИЗМИРАН.

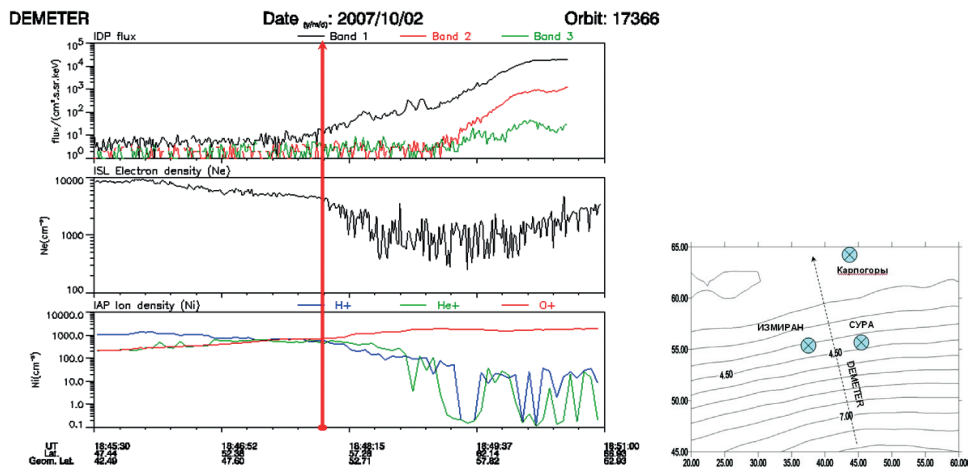


Рис. 3. Представлены данные измерений спутником ДЕТЕМЕТЕР (слева) и изолинии TEC (Total Electron Content) (справа, географические координаты) — интегрально-го содержания плазмы по результатам радиопросвечивания ионосферы сигналами системы спутников GPS

РАДИОТРАССИРОВАНИЕ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СТЕНДА СУРА

Согласно ионограммам, полученным в районе нагревного стенда СУРА, которые характеризуют состояние ионосферы во время проведения эксперимента, критические частоты основных слоёв ионосферы были ниже рабочей частоты стенда. Модификация ионосферы в зоне её засветки радиоизлучением стенда могла быть «на просвет», т. е. проходящей мощной волной в пределах диаграммы ($12 \times 36^\circ$) направленности антенного поля стенда СУРА. Нагрев электронов ионосферной плазмы должен был происходить в объёме, засвеченном стендом в диапазоне высот от 100 км и выше [Ружин и др., 2011, 2012]. Но аномальное свечение, зарегистрированное на МКС, и наблюдавшаяся суббуревая активность явно не совпадают с положением стенда и смещены к северу от стенда на сотни километров. Обнаруженное во время эксперимента по данным ИСЗ DEMETER положение плазмопаузы севернее стенда, конечно, облегчает интерпретацию, так как плазма границы плазмосферы сама по себе неустойчива, что благоприятно для триггерирования процессов внешним воздействием.

Базируясь на условиях эксперимента, попытаемся найти объяснение тому, как излучение стенда могло привести к наблюдавшейся авроральной активности к северу от стенда СУРА. Известно, что существенное влияние на распространение радиоволн оказывает неоднородность ионосферы в горизонтальном направлении [Kolomiitsev et al., 1999]. Градиенты критических частот максимальны в утренние часы, когда величина их достигает 0,4 МГц на 100 км, и возрастают с увеличением солнечной активности. В горизонтально неоднородной ионосфере нарушается симметрия траектории КВ-радиоволн, изменяется время их группового запаздывания, расстояние скачка, величины МПЧ (максимально применимая частота).

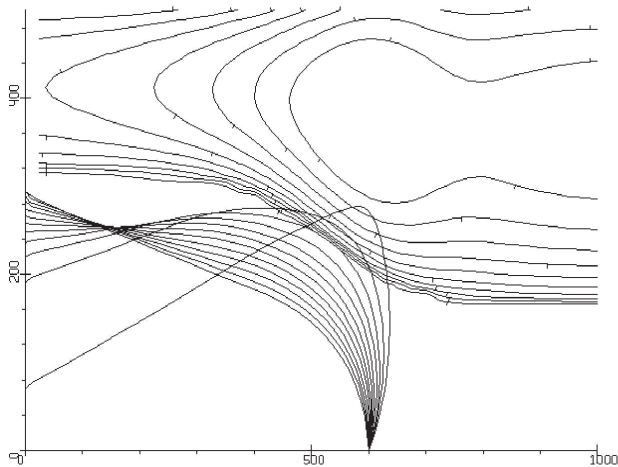


Рис. 4. Результаты радиотрассирования (высота-дальность [км]) для эксперимента 2007 г. При расчёте приняты во внимание: $N_e = 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ ($h = 660 \text{ км}$ — DEMETER); $f_oF2 = 3,8 \text{ МГц}$; $h_m = 280 \text{ км}$; $f_{SU\text{RA}} = 4,3 \text{ МГц}$; $FOV = (36 \times 12^\circ)$; $TEC = 2,5 \dots 4,0 \text{ TECU}$ (север — слева)

Опираясь на конкретные данные спутников Demeter, GPS и наземного радиозондирования, нами проведён анализ лучевого радиотрассирования, который показал (рис. 4), что спад концентрации (градиент критических частот и МПЧ (максимально применимая частота)) севернее стэнда создавал условия для перераспределения и перефокусировки излучаемого мощного КВ-пучка за счёт рефракции. При этом засвеченная стэндом область ионосферы (в меридиональной плоскости) могла достигать широт $60...62^\circ$, что, по-видимому, и приводило к заметному вмешательству КВ-облучения ионосферы стэндом СУРА в субавроральные процессы. Отметим, что фокусировка на высотах $\sim 240...280$ км наступает на севере от стэнда СУРА на удалении $\sim 300...500$ км. Таким образом, при таком состоянии ионосферно-магнитосферной системы наклон главного ионосферного слоя F2 способствовал перенаправлению на север и почти горизонтальному прохождению нагревного излучения с возможной фокусировкой на удалении от стэнда в сотни километров.

ОБСУЖДЕНИЕ. СЦЕНАРИЙ АКТИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Как отмечено раньше, обычно ионосфера рассматривается как пассивный элемент в процессе реализации суббури. В то же время есть несколько отступлений от этого подхода [Klimas et al., 2000; Milovanov et al., 1996]. Это модели, придающие особое значение изменению проводимости ионосферы и его роли в усилении продольных токов, а также модели, акцентированные на рассоединении магнитосферной конвекции ионосферы, вызванном образованием параллельных электрических полей. Наконец, существуют модели турбулентного пограничного альвеновского слоя, который даёт сильный турбулентный нагрев плазмы и появление ускоренных частиц. В двух успешных экспериментах СУРА-МКС ионосфера явно выступала активным элементом в процессе генерации наблюдавшейся авроральной активности.

Рассмотрим возможный ход развития событий при генерации суббурь такого высокого подобия, как наблюдались в этих двух случаях в рамках программы СУРА-МКС (см. таблицу). Предполагается [Ружин и др., 2012], что возникновение источника возмущений (стационарного продольного тока) на силовых линиях субавроральных широт сопровождается всплеском в продольных токах. Этот ток растекается в окрестности по ионосфере (тонкий слой) и замыкается через другие силовые линии с подключением магнитосопряжённой ионосферы. Известно, что «холодные» электроны (с энергией меньше 1 эВ) являются хорошими носителями продольного тока [Волков и др., 1985]. Для того, чтобы создать токи наблюдаемой величины $1...10$ А/км², достаточно, как правило, приложить очень небольшую (меньше 1 В) продольную разность потенциалов. В нашем случае, если проводить модификацию ионосферы южнее субавроральных широт, например на силовой линии нагревного стэнда, то возникает возможность замыкания продольного тока через силовые линии, опирающиеся на ионосферу, засвеченную стэндом. Оценки показывают, что этот путь короче и интегральная проводимость вдоль пути в этом случае выше (т.е. волно-

вое сопротивление меньше), так как силовая линия находится внутри плазмосферы (где выше плотность плазмы и меньше альвеновская скорость) [Ружин и др., 2012]. При наличии природных (естественных) нитевидных неоднородностей в ионосфере, вытянутых вдоль магнитного поля, возникает структуризация продольного тока в зоне засветки стендом (мозаичная картина в плоскости поперечного сечения магнитной силовой трубки, начинённой такими неоднородностями). Это повышает вероятность превышения критического значения концентрации тока для реализации соответствующих неустойчивостей плазмы [Трахтенгерц, Фельдштейн, 1985] в задействованной структуре ионосферно-магнитосферной цепи. При работе стенда в ионосфере в пределах засвеченной стендом области появляются нагретые электроны, которые увеличивают концентрацию продольного тока, и, таким образом, локализуется область ионосферы, через которую возможно замыкание прежде равномерно распределённого (в окрестности зоны нагрева) тока субавроральной области.

Исходя из результатов радиотрассирования, рост концентрации тока в засвеченной стендом зоне произошёл за счёт перераспределения и фокусировки излучения стенда и омического нагрева ионосферной плазмы. Омический нагрев ионосферной плазмы происходит из-за ненулевой волновой проводимости и столкновительного поглощения КВ-излучения вдоль всего пути распространения мощной радиоволны. Из-за большого числа возможных плазменно-волновых процессов, происходящих в зоне, близкой к высоте отражения КВ-излучения, обычно трудно разделить эффекты омического нагрева и нелинейных и резонансных процессов [Shoucri et al., 1984]. Но при облучении ионосферы на частотах выше критической слоя F2 (без отражения КВ-излучения) отсутствует стоячая волна, и происходит лишь ограниченное разбухание излучаемого пучка радиоволн. Такой режим облучения позволяет исследовать эффект омического нагрева в широком диапазоне высот при больших амплитудах поля облучения. Омический нагрев при облучении ионосферы «на просвет» рассматривался в работе [Lofas et al., 2009], где на базе недавнего эксперимента и моделирования показано, что наиболее эффективный нагрев электронов происходит до высот 260...280 км. Результаты модельного радиотрассирования на основе всего комплекса ионосферных данных во время нагревных экспериментов показали реальную возможность эффективной засветки (в частности, с фокусировкой, см. рис. 4) и модификации этого диапазона высот ионосферы мощным КВ излучением стенда СУРА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённых экспериментов дают веские основания предполагать, что при определённых состояниях ионосферно-магнитосферной системы локальное воздействие на ионосферу мощного КВ излучения стенда СУРА может триггерировать суббурю. Другими словами, существует возможность эффективного вмешательства в природные процессы с помощью нагревного стенда (или передатчика КВ) даже при небольшой (~10 МВт) эффективной мощности излучения (см. таблицу).

В двух активных экспериментах по модификации ионосферы излучением станда СУРА с использованием наземных и космических средств диагностики (магнитные обсерватории, МКС, спутник ДЕМЕТЕР и др.) обнаружены случаи суббуревой активности (высокой степени идентичности), стимулированной работой станда. С учётом реальных параметров среды и самого пучка радиоволн проведено моделирование распространения и геометрии облучения ионосферы. Показано, что основным моментом, сопутствующим условиям триггерирования активности, было состояние ионосферы над стандом, позволявшее перераспределение и фокусировку радиоизлучения севернее станда на высотах 200...300 км, в результате чего было обеспечено вторжение мощного пучка в субавроральную область ионосферы. Это позволило нарушить метастабильное состояние ионосферно-магнитосферной системы и вызвать суббурю с соответствующими вариациями в магнитном поле и ярким локальным сиянием (высыпаниями и искусственной авророй).

Поиск условий эффективности воздействия КВ-излучения наземных передатчиков на ключевые процессы, сопутствующие развитию суббуревой активности, является предметом дальнейших исследований. Указание на возможность управления характеристиками среды повышает актуальность продолжения экспериментов и проведения более детальных исследований фундаментальных процессов, ответственных за наблюдавшиеся динамику и формирование структур околоземного пространства во время экспериментов по программе СУРА-МКС.

ЛИТЕРАТУРА

- [Беликович и др., 2007] *Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н.* и др. Стенд СУРА: исследования атмосферы и космического пространства: обзор // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2007. Т. 50(7). С. 545–576.
- [Волков и др., 1985] *Волков М. А., Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П.* О структуре полей и продольных токов в разрыве Харанга // Геомагнетизм и аэронавигация. 1985. Т. 25. № 3. С. 445–449.
- [Гуревич, 2007] *Гуревич А. В.* Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физ. наук (УФН). 2007. Т. 177. № 11. С. 1145–1177.
- [Карабаджак и др., 2009] *Карабаджак Г. Ф., Комраков Г. П., Кузнецов В. Д., Пластинин Ю. А., Ружин Ю. Я., Фролов В. Л., Хмелинин Б. А.* Исследование глобальных пространственно-временных характеристик свечения верхней атмосферы и ионосферы Земли при воздействии на них радиоизлучения при наблюдении с борта МКС // Космонавтика и ракетостроение. 2009. Вып. 4(51). С. 134–157.
- [Коломийцев и др., 1999] *Коломийцев О. П., Ружин Ю. Я., Егоров И. Б., Разинков О. Г., Черкашин Ю. Н.* Модельные исследования влияния ионосферных дыр на условия распространения декаметровых радиоволн // Докл. АН СССР. 1999. Т. 369. № 4. С. 220–224.
- [Ружин и др., 2009а] *Ружин Ю. Я., Иванов К. Г., Кузнецов В. Д., Петров В. Г.* Контролируемая инжекция мощных радиоимпульсов в ионосферно-магнитосферную систему и появление микросуббурь // Геомагнетизм и аэронавигация. 2009. Т. 49. № 3. С. 703–708.

- [Ружин и др., 2009б] Ружин Ю. Я., Кузнецов В. Д., Карабаджак Г. Ф., Пластинин Ю. А., Хмелинин Б. А., Фролов В. Л., Комраков Г. П. Комплексный эксперимент СУРА-МКС (2 октября 2007 года) // Тр. конф. «Радиофизические методы в дистанционном зондировании». Муром. 2009. С. 66–70.
- [Ружин и др., 2011] Ружин Ю. Я., Кузнецов В. Д., Ковалёв В. И., Карабаджак Г. Ф., Пластинин Ю. А., Хмелинин Б. А., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Паро М. О возможности локализации суббури нагревным стендом СУРА // Тр. 23-й Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола. 2011. Т. 2. С. 255–260.
- [Ружин и др., 2012] Ружин Ю. Я., Кузнецов В. Д., Ковалёв В. И., Бершадская И. Н., Карабаджак Г. Ф., Пластинин Ю. А., Фролов В. Л., Комраков Г. П. О возможности локализации суббури нагревным стендом СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 1. С. 94–105.
- [Трахтенгерц, Фельдштейн, 1985] Трахтенгерц В. Ю., Фельдштейн А. Я. О диссипации альвеновской волны в слое с аномальным сопротивлением // Геомагнетизм и аэронавигация. 1985. Т. 25. С. 334–336.
- [Blagoveshchenskaya et al., 2000] Blagoveshchenskaya N. F., Kornienko V. A., Borisova T. D., Thide B., Kosch M. J., Rietveld M. T., Mishin E. V., Lukyanova R. Yu., Troshichev O. A. Triggering of local substorm activation by powerful HF radiowaves // Proc. 5th Intern. Conf. Substorms. St. Petersburg, Russia, ESA SP-443, July 2000. P. 477–480.
- [First results..., 2006] First results of the DEMETER micro-satellite. // Planetary and Space Sciences. 2006. V. 54. Iss. 5 (special issue). P. 411–558. doi: 10.1016/j.pss.2005.10.012.
- [Jakowski, Sardon, 1996] Jakowski N., Sardon E. Comparison of GPS/IGS-derived TEC data with parameters measured by independent ionospheric probing techniques // Intern. GPS Service Symp. Silver Spring, Md., 19-21 March, 1996. 1996. С. 221–230.
- [Klimas et al., 2000] Klimas A. J., Valdivia J. A., Vassiliadis D. et al. Self-organized criticality in the substorm phenomenon and its relation to localized reconnection in the magnetospheric plasma sheet // J. Geophysical Research. 2000. V. 105. P. 18765.
- [Kolomiitsev et al., 1999] Kolomiitsev O. P., Ruzhin Yu. Ya., Egorov I. B., Razinkov O. G., Cherkashin Yu. The ionospheric holes — modeling and diagnostics // Phys. Chem. Earth (C). 1999. V. 24. No. 4. P. 393–399.
- [Kuznetsov et al., 2008] Kuznetsov V. D., Ruzhin Yu. Ya., Karabadzhak G. F., Plastinin Ya. A., Khmelinin B. A., Frolov V. L., Komrakov G. P. Preliminary results of modification of the ionospheric plasma by high-power radio emission from the SURA facility as observed on board of the International Space Station // 37th COSPAR, 2008. Montreal, Canada: Abstr. 2008. C 52-0036-08.
- [Lofas et al., 2009] Lofas H., Ivchenko N., Gustavsson B., Leyser T. B., Rietveld M. T. F-region electron heating by X-mode radiowaves in underdense conditions // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 2585–2592. URL: www.ann-geophys.net/27/2585/2009.
- [Milovanov et al., 1996] Milovanov A. V., Zelenyi L. M., Zimbardo G. Fractal structures and power law spectra in the distant Earth's magnetotail // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 19,903–19,910.
- [Ossakov, Chaturvedi, 1979] Ossakov S. L., Chaturvedi P. K. Current convective instability in diffuse aurora // J. Atmos. Terr. Phys. 1979. V. 6. P. 332–335.
- [Shoucri et al., 1984] Shoucri M. M., Morales G. J., Maggs J. E. Ohmic heating of the polar F region by HF pulses // J. Geophysical Research. 1984. V. 89. P. 2907–2917.

ACTIVE EXPERIMENT: AURORA AND SUBSTORM TRIGGERED BY HF RADIO EMISSION

Yu. Ya. Ruzhin, V. D. Kuznetsov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

We present the results of the new experiments on modification of the ionosphere by high-power high-frequency (HF) waves from the SURA heating facility. It is important to notice that from all of 12 our experiments on ionosphere heating during 2007–2012 only in two of them there were registered very similar disturbances in a magnetic field which can be interpreted as a signature of artificially induced substorms by SURA heater. The effects of modification were observed on board the International Space Station (ISS), DEMETER satellite and groundbased observatories. The results of this SURA — ISS experiment series have shown that for possible localization of a substorm the active experiments on the basis of the SURA facility should be planned during the periods near to local midnight (Harang discontinuity sector or around 21–24 LT) and preferably at the end of a regenerative phase of a geomagnetic storm (in undisturbed ionosphere conditions).

Keywords: active experiments, ionosphere modification, magnetic substorm.

Ruzhin Yury Yakovlevich — deputy director, doctor of physical and mathematical sciences, professor, ruzhin@izmiran.ru

Kuznetsov Vladimir Dmitrievich — director, doctor of physical and mathematical sciences, kvd@izmiran.ru