

УДК 551.510.5;550.388.2;550.3+551.5/629.78

## АВРОРАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ, ВЫЗВАННАЯ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА “СУРА”

© 2013 г. Ю. Я. Ружин<sup>1</sup>, В. Д. Кузнецов<sup>1</sup>, Ю. А. Пластинин<sup>2</sup>, Г. Ф. Карабаджак<sup>2</sup>,  
В. Л. Фролов<sup>3</sup>, М. Парро<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк (Московская обл.)

<sup>2</sup>ФГУП “Центральный научно-исследовательский институт машиностроения” (ФГУП ЦНИИМАШ), г. Королёв (Московская обл.)

<sup>3</sup>ФГБНУ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Н. Новгород

<sup>4</sup>LPCE/CNRS, Франция

e-mail: ruzhin@izmiran.ru

Поступила в редакцию 30.05.2012 г.

Серия экспериментов по модификации ионосферы радионагревом в КВ диапазоне, проведенных на базе стенда “СУРА” совместно с оптическими измерениями на борту международной космической станции (МКС), показали эффективность таких воздействий на ионосферу при рабочей частоте стенда выше критической плазменной (для основного слоя  $F2$  ионосферы). Эксперименты сопровождались поддержкой измерений средствами наземных обсерваторий, МКС, спутников Demeter и GPS. В работе приводятся результаты анализа всего комплекса данных. Проведены расчеты лучевого КВ радиотрассирования для эксперимента 02 октября 2007 г. и показано, что за счет рефракции на градиенте критических частот слоя  $F2$  пучком стенда засвечивалась ионосфера (эффекты перераспределения и перефокусировки лучей) к северу от стенда вплоть до широт  $60\text{--}62^\circ$  N. В итоге получено, что результаты анализа наземных и спутниковых измерений (как в окрестности нагревного стенда, так и в магнитносопряженной области) свидетельствуют о возможности триггерирования суббури в экспериментах с нагревным стендом “СУРА”.

DOI: 10.7868/S0016794013010173

### 1. ВВЕДЕНИЕ

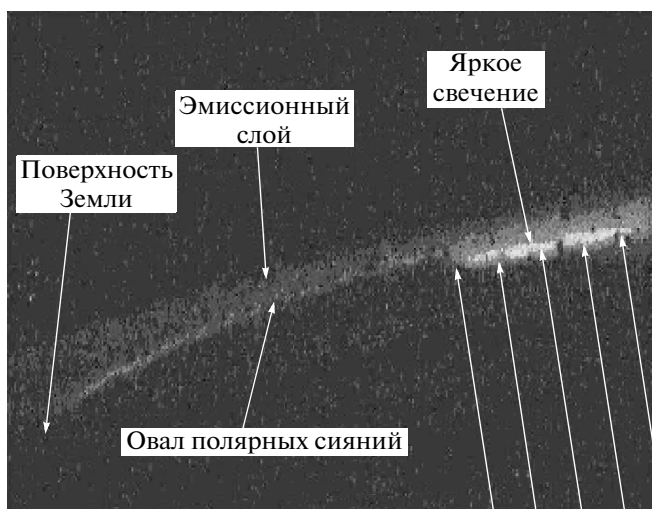
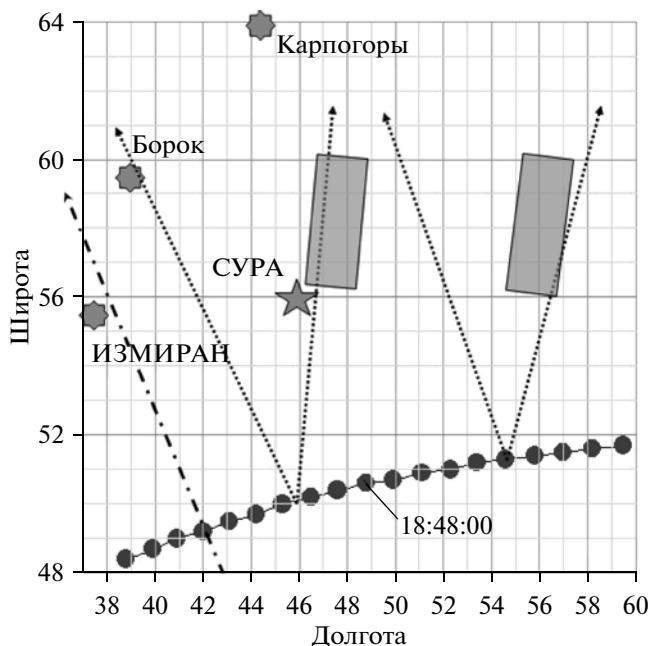
До настоящего времени большой интерес вызывают исследования возможностей модификации процессов в ионосферно-магнитосферной цепи с помощью мощного радиоизлучения нагревных стендов [Гуревич, 2007; Беликович и др., 2007], расположенных на земной поверхности. В частности, в эксперименте, выполненном на стенде EISCAT (Сев. Норвегия, Тромсё) [Blagoveshchenskaya et al., 2000], была продемонстрирована возможность триггерирования суббури активности за счет модификации ионосферно-магнитосферного взаимодействия вследствие контролируемой инъекции мощных радиоволн в ночную авроральную ионосферу. Отметим, что стенд EISCAT находится в авроральных широтах, где высокий уровень различного рода геомагнитных и плазменных возмущений является обычным явлением, что определяет особенности проведения здесь нагревных экспериментов.

В нашей работе мы представляем результаты измерений, полученные в нагревных экспериментах на базе среднеширотного стенда “СУРА” [Беликович и др., 2007] при рабочей частоте коротковолнового (КВ) облучения ионосферы вы-

ше критической плазменной (для основного слоя  $F2$  ионосферы), и приводим доказательства возможности модификации ионосферно-магнитосферной связи при нагреве ионосферы мощным КВ излучением стенда “СУРА” и, как следствие этого, – локальной интенсификации авроральной активности. Эксперименты сопровождались поддержкой измерений средствами наземных обсерваторий, международной космической станции (МКС), спутников ИСЗ Demeter и GPS. Необходимо отметить, что из числа всех проведенных по программе СУРА – МКС экспериментов (в 2007–2010 гг.) с нагревом ионосферы только в двух из них зарегистрированы подобные возмущения в магнитном поле Земли, которые можно интерпретировать как признак суббури, стимулированных работой стенда.

### 2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты выполнялись в ночное время. Для радионагрева ионосферы с помощью стенда “СУРА” использовалось КВ радиоизлучение обыкновенной поляризации, как правило, на частоте



**Рис. 1.** Слева – план эксперимента 02.10.2007 г. (в географических координатах); справа – яркое локальное свечение, зарегистрированное средствами МКС в этом же эксперименте. Пунктиром показано поле зрения бортовой видеокамеры.

4.3 МГц. Луч излучающей антенны стенда был ориентирован под углом  $12^\circ$  от вертикали на юг в плоскости геомагнитного меридиана (для стенда восточное магнитное склонение составляет  $11^\circ$ ) приблизительно вдоль направления геомагнитного поля Земли. Особенностью этих экспериментов являлось то, что для всех выполненных экспериментов критическая частота  $f_oF2$  ионосферного слоя  $F2$  была всегда меньше рабочей частоты мощной радиоволны (реализовывались условия нагрева “на просвет”), и мощным излучением стенда засвечивался весь объем ионосферы в пределах диаграммы направленности. Волна накачки (ВН) излучалась в режиме 1 мин – излучение, 1 мин – пауза. Во время экспериментов регистрировались ионограммы ионозондом DPS-4 (Москва, ИЗМИРАН) и ионозондом “Базис-М”, расположенным на территории самого стенда. Геометрия экспериментов приведена на рис. 1 (левая панель).

Всего во время экспериментов СУРА–МКС в течение 2007–2010 гг. было проведено более 12-ти сеансов измерений. В таблице приведены основные параметры излучения мощной радиоволны и характеристики состояния ионосферы для двух рассматриваемых здесь сеансов измерений, в которых было зарегистрировано появление возмущений геомагнитного поля с суббуревыми признаками.

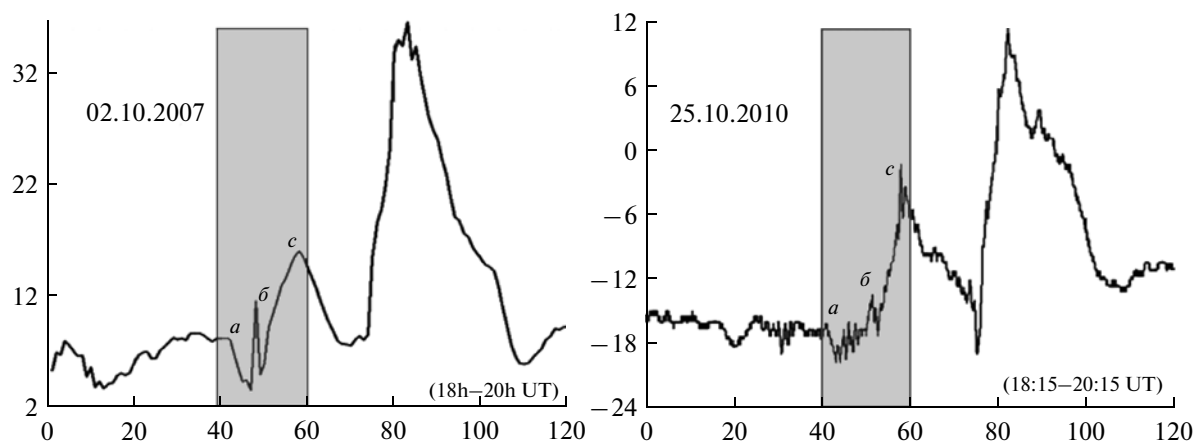
### 3. АНАЛИЗ КОМПЛЕКСА ДАННЫХ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### 3.1. Оптические и магнитные измерения

В первую очередь приведем результаты оптических наблюдений с борта МКС и последствий воздействия на ночную ионосферную плазму мощного радиоизлучения стенда “СУРА” во время первого эксперимента 2 октября 2007 г. (18:40–

Основные параметры и условия проведения экспериментов

	Время нагрева. Режим излучения ВН.	Частота, эфф. мощность излучения и поляризация ВН. Диаграмма направленности.	Критическая частота $f_oF2$	Ионосферные условия
Сеанс 1. 02.10.2007 г.	18:40–19:00 UT, $\pm 1$ мин	4300 кГц, 10 МВт (работал один модуль стенда). O-мода. $12^\circ \times 36^\circ$ (вытянута в N-S направлении).	3.9 МГц	$F2$ -spread, более 4 ч (до эксперимента и после).
Сеанс 2. 25.10.2010 г.	18:55–19:15 UT, $\pm 1$ мин	4785 кГц, 100 МВт (работало три модуля стенда когерентно). O-мода. $10^\circ \times 10^\circ$ .	2.5 МГц	$F2$ -spread, (в развитии).



**Рис. 2.** Вариации магнитного поля Земли во время 2-х суббурь, которые предположительно вызваны работой стенда “СУРА” (по данным ст. ИЗМИРАН в Карпогорах для сеанса 1 – слева и сеанса 2 – справа). Затемненные прямоугольники показывают время сеансов нагрева.

19:00 UT). С борта МКС ТВ-камерой оптического диапазона получено более тысячи изображений яркого локального свечения (см., например, рис. 1, правая панель), появившегося в поле зрения камеры при пролете в окрестности стенда во время эксперимента. Компактное пятно свечения появилось к северо-востоку от стенда “СУРА” (на расстоянии минимум в 100–200 км, см. рис. 1 слева – серые прямоугольники) и перемещалось на восток в плоскости изображения со скоростью  $\sim 5$  км/с. Яркость аврорального свечения достигала десятков килоэрэлей. Предполагалось, что в экспериментах “на просвет” в результате взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой появляются нагретые электроны в гораздо большем поперечном сечении 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 [Карабджак и др., 2009], что свечение такой яркости не может быть прямым результатом нагрева из-за низкой эффективной мощности нагрева (см. таблицу). Аномальным является и положение его на расстоянии минимум в 100–200 км к северу от оси КВ пучка, излучаемого стендом “СУРА”.

Отметим дальше, что все активные космические эксперименты 2007–2010 гг. проводились на фоне глубокого минимума солнечной активности и при спокойном состоянии магнитосферно-ионосферной системы. Планетарный индекс магнитной активности не превышал 3. В таких условиях в первом эксперименте (таблица, сеанс 1) были зарегистрированы локальные аномалии в вариациях геомагнитного поля (данные сети станций ИЗМИРАН, в частности, obs. Карпогоры), которые могут быть связаны с нагревом

ионосферы стендом “СУРА” [Kuznetsov et al., 2008, Ружин и др., 2009a]. Они характеризуются тем, что сразу после включения стенда наблюдались возмущения в магнитном поле Земли (см. рис. 2, левая панель), которые характерны для суббуревой активности [Ружин и др., 2009]. Судя по амплитуде (в сравнении с данными глобальной сети “INTERMAGNET”, включая также станции магнитно-сопряженного региона), возмущения были локализованы в пределах зоны “СУРА”–Карпогоры.

Событие, зарегистрированное во время нагревного эксперимента 25 октября 2010 г. (таблица, сеанс 2, см. рис. 2, правая панель), по всем признакам также можно классифицировать как микросуббурю длительностью 1–1.5 ч. Обращает на себя внимание (см. рис. 2) такая особенность, как практически подобное повторение для обоих случаев характерных вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля (см. моменты: *a*, *b* и *c*): сброс после 1-го импульса нагрева, всплеск в районе 5–6-го импульсов волны накачки, затем положительная бухта, максимум которой заканчивается по окончании сеанса нагрева, и затем – основная бухта амплитудой  $\sim 30$  нТл. Отметим также, что кроме подобия вариаций по форме, наблюдается практически одинаковая длительность обоих событий (немногим больше 60 мин).

Последующий анализ магнитограмм obs. Карпогоры не обнаружил подобной комбинации геомагнитных вариаций в течение нескольких лет наблюдений. Это является дополнительным аргументом в пользу искусственного происхождения микросуббурь, развитие которых было зарегистрировано в сеансах 1 и 2 во время активных экспериментов на базе стенда “СУРА”.

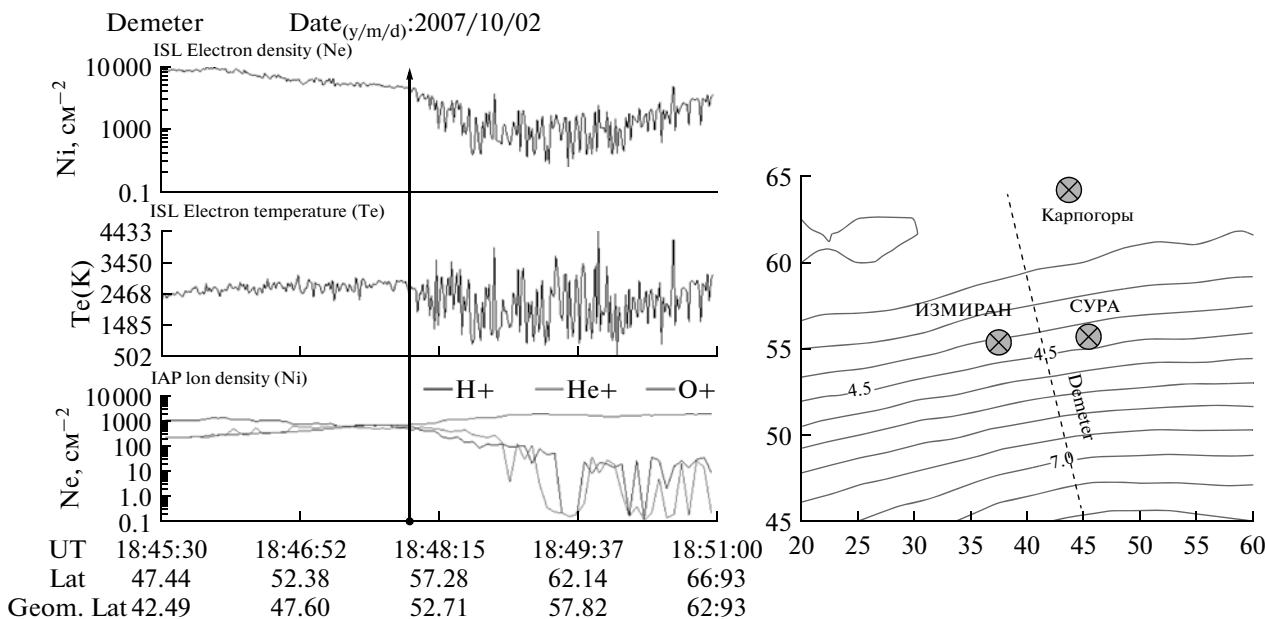


Рис. 3. Данные измерений ИСЗ Demeter (слева) и изолинии ТЕС (справа, географические координаты) – интегрального содержания плазмы по результатам радиопросвечивания ионосферы сигналами системы спутников GPS.

### 3.2. Данные бортовых приборов ИСЗ Demeter

Эксперимент 2007 г. проведен синхронно (см. проекцию орбиты ИСЗ Demeter на рис. 3 – справа) с пролетом ИСЗ Demeter (его описание см. в работе [First..., 2006]). Рассмотрим ситуацию в ионосфере в районе стенда по данным измерений комплексом научной аппаратуры спутника. На рисунке 3 (слева) приведены результаты измерений аппаратурой ИСЗ Demeter (на высоте ~660 км) во время эксперимента 02 октября 2007 г., когда спутник пролетал между Москвой и стендом “СУРА” на минимальном расстоянии ~400 км к западу от стенда. Верхняя и средняя панели на рис. 3 (слева) представляют поведение концентрации и температуры электронов плазмы вдоль орбиты; на нижней панели показано изменение ионного состава плазмы. Стрелкой поперек всех панелей отмечен момент пересечения спутником широты стенда “СУРА” (или момент максимального сближения ИСЗ с центром возмущенной нагревом плазмы магнитной силовой трубки). Видно, что, судя по резкому падению концентрации плазмы (при пересечении широты 56°) и появлению признаков сильной нестационарности в распределении концентрации и температуры электронов плазмы (средняя панель), граница плазмосферы находилась именно в этом месте, т.е. значительно южнее обычного ее положения. Признаки качественного перехода в зону плазменной турбулентности подтверждаются также измерениями и температуры ионов на борту ИСЗ Demeter. Здесь же начинают резко нарастать компонента энергичных электронов до 100 кэВ и концентрация тяжелых

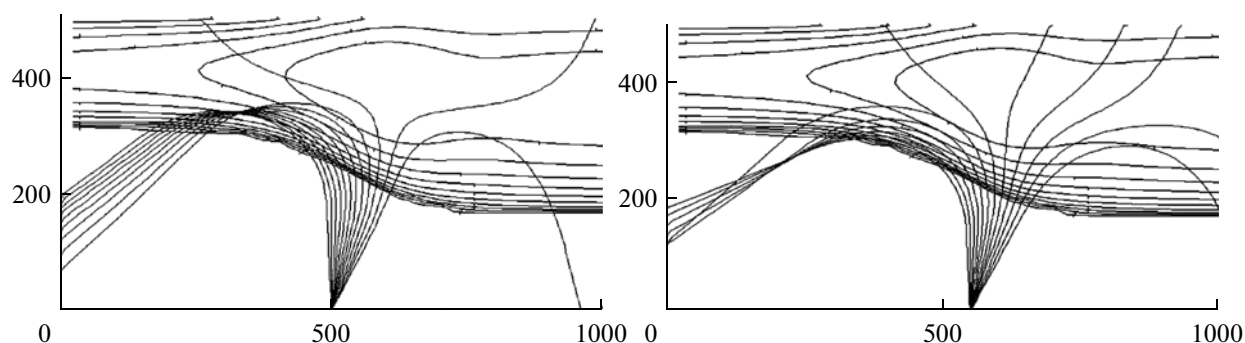
ионов кислорода. Ион кислорода становится доминирующим (см. рис. 3, нижняя панель). Последний факт является свидетельством вхождения спутника в зону продольного тока, вытекающего из ионосферы.

О неустойчивости ионосферной плазмы в этой же области свидетельствует ионосферное рассеяние радиоволн типа “F2-spread”, обнаруженное на сети ионозондов на широте стенда в долготном секторе, по крайней мере, от Калининграда до Казани, что является дополнительным признаком [Ossakov. and Chaturvedi.,1979] присутствия продольного тока в этом обширном регионе еще до начала эксперимента.

### 3.3. Состояние ионосферы во время эксперимента

Данные карт ТЕС (Total Electron Content) мировой сети IGS станций позволяют оценить интегральное содержание плазмы по результатам просвечивания ионосферы сигналами системы спутников GPS. Для оценки состояния ионосферно-магнитосферной системы применялся анализ глобальных ТЕС карт в формате IONEX (IONosphere map EXchange), которые регулярно создаются лабораториями CODE и JPL по данным мировой сети IGS станций (используются данные более чем от 150-ти станций приема сигналов спутников GPS). IONEX данные доступны на сайте: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>.

Известно также, что использование глобальных ТЕС карт позволяет проводить непрерывный



**Рис. 4.** Результаты радиотрассирования в плоскости меридиана (высота – дальность, км) для эксперимента 2007 г. При расчете приняты во внимание:  $N_e = 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $h = 660 \text{ км}$  – ИСЗ Demeter);  $foF2 = 3.8 \text{ МГц}$ ;  $hm = 280 \text{ км}$ ;  $f_{SURF} = 4.3 \text{ МГц}$ ;  $FOV = (36^\circ \times 12^\circ)$ ;  $TEC = 2.5\text{--}4.0 \text{ TECU}$  (IONEX карты). На панели справа – источник мощного КВ излучения (стенд “СУРА”) смещен к югу на 50 км.

мониторинг ионосферы с высокой точностью и достоверностью [Jakowski and Sardon, 2006]. На рисунке 3 (справа) представлены изолинии пространственных вариаций TEC (в географических координатах) 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 ИСЗ Demeter во время работы стенда “СУРА”. Сравнивая TEC с поведением концентрации плазмы на высоте ИСЗ Demeter видим, что интегральное содержание минимально (меньше 3 TECU) в районе севернее стенда, что подтверждает вывод о возможном положении границы плазмосферы вблизи параллели “СУРА”–ИЗМИРАН.

Согласно ионограммам, полученным в районе нагревного стенда “СУРА”, которые характеризуют состояние ионосферы во время проведения эксперимента, критические частоты основных слоев ионосферы были ниже рабочей частоты стенда. Модификация ионосферы в зоне ее засветки радиолучами стенда могла быть “на просвет”, т.е. проходящей мощной волной в пределах диаграммы ( $12^\circ \times 36^\circ$ ) направленности антенного поля стенда “СУРА”. Нагрев электронов ионосферной плазмы должен был происходить в объеме, засвеченном стендом в диапазоне высот от 100 км и выше [Ружин и др., 2009б]. 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.

#### 3.4. Радиотрассирование КВ излучения стенда “СУРА” во время эксперимента 2007 г.

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 [Коломийцев и др., 1999]. Опираясь на конкретные данные спутников Demeter, GPS и наземного радиозондирования, нами проведен анализ лучевого радиотрассирования, который показал (рис.4), что спад концентрации (градиент критических частот и МПЧ) севернее стенда создавал условия для перераспределения и перефокусировки излучаемого мощного КВ пучка за счет рефракции.

При этом засвеченная стендом область ионосферы (в меридиональной плоскости) могла достигать широт  $60\text{--}62^\circ$ , что, по-видимому, и приводило к заметному вмешательству КВ облучения ионосферы стендом “СУРА” в субавроральные процессы. Панели на рисунке отличаются только положением излучателя (правой панели соответствует горизонтальное смещение стенда “СУРА” к югу – 50 км) относительно градиента. Отметим, что фокусировка на высотах  $\sim 240\text{--}280 \text{ км}$  (панель справа) наступает на севере от “СУРЫ” на удалении  $\sim 300\text{--}340 \text{ км}$ , а ионосфера “засвечена” до  $59\text{--}61^\circ \text{ N}$ .

Локальная аврора (см. рис. 1, левая панель, закрашенные прямоугольники) может находиться на таком же расстоянии, если минимальная высота (высота нижнего края полярного сияния) ~105–110 км (см. верхние стороны закрашенных прямоугольников). Как отмечено выше, все эксперименты выполнялись с привлечением бортовой аппаратуры РС МКС (аппаратура “Фиалка”) [Карабаджак и др., 2009]. В эксперименте 2007 г. после пересечения области нагрева полем зрения бортового регистратора зафиксировано яркое локальное свечение, которое по оценкам [Ружин и др., 2011] находилось в пределах 100–200 км (при высоте нижнего края сияния 140–150 км) к северу от стенда “СУРА”. Свечение по времени совпадает со всплеском “ $\delta$ ” (рис. 2, левая панель) в магнитном поле и, по-видимому, обусловлено впрыскиванием электронов двойным слоем, развившемся на взрывной фазе активизации суббури в зоне критического значения продольного тока, вытекающего из ионосферы. Рост концентрации тока в засвеченной стендом зоне произошел за счет перефокусировки излучения 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. Обычно из-за большого числа возможных плазменно-волновых процессов, происходящих в зоне, близкой к высоте отражения КВ излучения, трудно разделить эффекты омического нагрева и нелинейных и резонансных процессов [Shoucri et al., 1984]. Но при облучении ионосферы на частотах выше критической слоя  $F_2$  (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. Об омическом нагреве при облучении ионосферы “на просвет” нами найдена единственная работа [Lofas et al., 2009], где на базе недавнего эксперимента и моделирования показано, что наиболее эффективный нагрев электронов происходит до высот 260–280 км. Результаты нашего радиотрассирования на основе всего комплекса ионосферных данных показали реальную возможность засветки этого диапазона высот (в частности, с фокусировкой, см. рис. 4, справа) мощным КВ излучением стенда “СУРА” во время экспериментов.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, накопленные экспериментальные факты при проведении серии экспериментов СУРА–МКС, свидетельствуют о возмож-

ности эффективного вмешательства в природные процессы с помощью нагревного стенда даже при небольшой (~10 МВт) эффективной мощности излучения волны накачки. Результаты серии экспериментов 2010 г. подтвердили, что для возможной локализации суббури активные эксперименты на базе стенда “СУРА” следует планировать [Ружин и др., 2011] в период вблизи осеннего равноденствия и локальной полуночи, т.е. в районе 21–24 LT (сектор разрыва Харанга [Волков и др., 1985]), а также, предпочтительно, в конце восстановительной фазы геомагнитной бури, т.е. в уже “подготовленной” ионосфере. Как итог, отметим, что результаты проведенных экспериментов дают веские основания предполагать, что при качественном прогнозе состояния магнитосферно-ионосферной системы можно триггерировать суббурю с помощью локального воздействия на ионосферу мощным КВ излучением стенда “СУРА”. Наши выводы основаны на результатах целой серии экспериментов СУРА–МКС, полученных за три года (всего 12 аналогичных экспериментов со стендом) в разных условиях (локальное время, сезонные вариации условий и т.д.). Особенно отметим повторение только в октябре (в двух успешных экспериментах) суббуревой активности как по форме (структуре), так и по привязке к периоду нагрева с точностью до секунд. Точное подобие этим двум событиям как по структуре, так и по длительности суббури, в природе не наблюдалось в течение нескольких лет.

В этой связи уместно вспомнить о подобном геомагнитном суббуревом эффекте одного из запусков мощной ракеты с космодрома Плесецк, зарегистрированном на магнитной обс. Архангельск [Oraevsky et al., 1995; Деминов и др., 2001]. При этом стоит особенно отметить, что это подобие четко выражено при сравнении эффектов запуска ракеты, именно и только, в том же самом временном интервале (19–20 UT; 21–22 LT), в котором проводилась инъекция радиоволн КВ стенда “СУРА” и наблюдались описанные выше геомагнитные суббури. Приходим к выводу, что, по-видимому, в некоторых случаях, когда магнитосфера “подготовлена” к суббуре, эффект внешнего (искусственного) вмешательства может стимулировать начало магнитосферной суббури, обеспечивая “привязку” времени начала этого возмущения к временам сеансов нагрева ионосферы стендом “СУРА” или пересечения ракетой динамо-области ионосферы.

Авторы выражают благодарность Х.Д. Канониди и К.Х. Канониди за проведение магнитных измерений, Ю.В. Копылову за помощь в расчетах по радиотрассированию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н. и др.* Стенд “Сура”: исследования атмосферы и космического пространства (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 50. № 7. С. 545–576. 2007.
- *Волков М.А., Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П.* О структуре полей и продольных токов в разрыве Харанга // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 25. № 3. С. 445–449. 1985.
- *Гуревич А.В.* Нелинейные явления в ионосфере // УФН. Т. 177. № 11. С. 1145–1177. 2007.
- *Деминов М.Г., Ораевский В.Н., Ружин Ю.Я.* Ионосферно-магнитосферные эффекты от запусков ракет в сторону высоких широт // Геомагнетизм и аэрномия. 2001. Т. 41. № 6. С. 772–781
- *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. Вып. 4 № 51. С. 134–157. 2009.
- *Коломийцев О.П., Ружин Ю.Я., Егоров И.Б., Разинков О.Г., Черкашин Ю.Н.* Модельные исследования влияния ионосферных дыр на условия распространения дециметровых радиоволн // ДАН СССР. Т. 369. № 4. С. 220–224. 1999.
- *Ружин Ю.Я., Иванов К.Г., Кузнецов В.Д., Петров В. Г.* Контролируемая инъекция мощных радиоимпульсов в ионосферно-магнитосферную систему и появление микросуббурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 3. С. 703–708. 2009а.
- *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”. Ред. Д.С. Лукин. г. Муром. С. 66–70. 2009б.
- *Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Ковалев В.И., Карабаджак Г.Ф., Пластинин Ю.А., Хмелинин Б.А., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Парро М.* О возможности локализации суббури нагревным стендом СУРА / Тр. 23-ей Всероссийской научн. конф. “Распространение радиоволн”. Ред. Д.С. Лукин. г. Йошкар Ола, 2011 г. Т. 2. С. 255–260. 2011.
- *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. on substorms. St. Petersburg, Russia. 16–20 May 2000 (ESA SP-443, July 2000). P. 477–480. 2000.
- First results of the DEMETER micro-satellite // Planet. Space Sci. V. 54. № 5 (special issue). 2006.
- *Jakowski N., Sardon E.* Comparison of GPS/IGS-derived TEC data with parameters measured by independent ionospheric probing techniques / Intern. GPS Service Symposium. Silver Spring, Md., 19–21 March, 1996.
- *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 // 37 COSPAR. Montreal, Canada. Abstr. C 52-0036-08. 2008.
- *Kolomiitsev O.P., Ruzhin Yu.Ya., Egorov I.B., Razinkov O.G., Cherkashin Yu.* The ionospheric holes – modeling and diagnostics // Phys.Chem.Earth (C). V. 24. № 4. P. 393–399. 1999.
- *Lofas H., Ivchenko N., Gustavsson B., Leyser T. B., Rietveld M. T.* F-region electron heating by X-mode radiowaves in underdense conditions // Ann. Geophysicae. V. 27. P. 2585–2592. 2009. ([www.ann-geophys.net/27/2585/2009/](http://www.ann-geophys.net/27/2585/2009/))
- *Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Depueva A.Kh., Kozlov E.F.* The subauroral events generated by rocket launching // Adv. Space Res. V. 15. № 11. P. 153–158. 1995.
- *Ossakov S.L., Chaturvedi P.K.* Current convective instability in diffuse aurora // J. Atmos. Terr. Phys. V. 6. № 4. P. 332–335. 1979.
- *Shoucr M.M., Morales G.J., Maggs J.E.* Ohmic heating of the polar F region by HF pulses // J. Geophys. Res. V. 89. № A5. P. 2907–2917. 1984.