

УДК 550.388:533.951+573.868

О ВОЗМОЖНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ СУББУРИ НАГРЕВНЫМ СТЕНДОМ «СУРА»

Ю. Я. Ружин¹, В. Д. Кузнецов¹, В. И. Ковалёв¹, И. Н. Бершадская¹,
Г. Ф. Карабаджак², Ю. А. Пластинин², В. Л. Фролов³, Г. П. Комраков³, М. Парро⁴

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Троицк Московской области;

² Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, г. Москва;

³ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия;

⁴ LPCE/CNRS, Орлеан, Франция

Приведены результаты анализа гелио-геофизических условий экспериментов 2007–2010 годов по локальной модификации ионосферы мощным радиоизлучением нагревного стенда «Сура». Их особенностью является то, что рабочая частота стенда превышала верхнегибридную плазменную частоту для максимума F_2 -слоя ионосферы. Все эксперименты проводились в секторе местного времени разрыва Харанга (т. е. с 21:00 до 00:00 по местному времени) для наиболее вероятного влияния работы стенда на активизацию природных процессов в субавроральной области ионосферы. Установлено, что по крайней мере в двух экспериментах наблюдавшаяся суббуревая активность в зоне воздействия стенда могла быть стимулирована его работой. Результаты наземных и спутниковых измерений, как в окрестности стенда «Сура», так и в магнитосопрежённой области, поддерживают вывод о возможности локализации суббури этим стендом.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие на ионосферу Земли мощным коротковолновым (КВ) радиоизлучением специально построенных нагревных стендов показало, что при использовании волн с О-поляризацией вблизи высоты их отражения в F_2 -области ионосферы развивается интенсивная искусственная ионосферная турбулентность. Наиболее значимыми её проявлениями являются: 1) сильный разогрев электронов, когда их температура увеличивается в несколько раз, 2) генерация искусственных ионосферных неоднородностей с различными размерами от долей метра до десятков километров в поперечном к геомагнитному полю направлении и 3) возбуждение высокочастотной плазменной турбулентности, стимулирующей ускорение электронов плазмы до сверхтепловых энергий порядка $20 \div 50$ эВ в области плазменных резонансов взаимодействия волны накачки с плазмой. Результаты этих исследований можно найти в [1–5] и в цитируемой в этих работах многочисленной литературе.

Исследования также показали, что искусственные плазменные возмущения регистрируются не только вблизи высоты отражения волны накачки, но и на высотах внешней ионосферы. Так проведённые на стенде «Сура» (ФГБНУ НИРФИ, г. Нижний Новгород) эксперименты [6–8] продемонстрировали, что воздействие мощной радиоволны на F_2 -слой ионосферы возбуждало низкочастотные волны в очень низкочастотном и крайне низкочастотном диапазонах, которые обнаруживались на высотах $h \approx 500 \div 1000$ км в возмущённой магнитной силовой трубке с диаметром $100 \div 200$ км, опирающейся на возмущённую область ионосферы, и создавало потоки ускоренных до сверхтепловых энергий электронов, которые могут проникать в верхнюю ионосферу и магнитосферу Земли.

Плазменные возмущения во внешней ионосфере над стендом «Сура» в последние годы активно исследовались с помощью французского искусственного микроспутника Земли DEMETER.

Им были измерены индуцируемые при модификации F_2 -области ионосферы флуктуации концентрации, температуры плазмы и электрических и магнитных полей в очень низкочастотном и крайне низкочастотном диапазонах, изучены условия образования дактов концентрации плазмы, показано, что при определённых условиях возможно возбуждение магнитосферного мазера [3, 9–12]. Все эксперименты на стенде «Сура», результаты которых перечислены выше, были выполнены в вечерних и ночных условиях, когда волна накачки с O -поляризацией отражалась в F_2 -области ионосферы вблизи высоты максимума концентрации электронов.

На нагревном стенде EISCAT (г. Тромсё, Норвегия) воздействие на внешнюю ионосферу и магнитосферу Земли проводилось за счёт модификации E -области ионосферы модулированной по амплитуде мощной радиоволной. В результате демодуляции такой радиоволны в ионосфере генерируются волны ультра- и очень низкочастотных диапазонов, которые возбуждают волновод Земля–ионосфера, а также распространяются вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля в магнитосферу и далее до магнитосопряжённой к области их генерации точки.

Отметим здесь эксперименты, выполненные с помощью искусственного спутника Земли FAST [13, 14], в которых при использовании частоты амплитудной модуляции $F_{\text{mod}} = 3$ Гц для волны накачки были обнаружены ультранизкочастотные волны на высоте 2550 км с частотой 3 Гц и индуцированный ими поток сверхтепловых электронов, идущий вниз от области их генерации на высотах порядка 3500 км около границы ионосферного альвеновского резонатора. В экспериментах [15] с помощью искусственного спутника Земли INTERBALL-2 исследовались результаты воздействия на нижнюю ионосферу мощных радиоволн с частотой модуляции $F_{\text{mod}} = 1733$ Гц. В них на высоте около 8000 км были зарегистрированы индуцированное мощной радиоволной крайне низкочастотное излучение и идущий вверх поток надтепловых электронов.

Полученные результаты интерпретировались как возбуждение продольных токов при нагреве плазмы нижней ионосферы, как это происходит при развитии суббури. Наконец, в выполненных на стенде EISCAT экспериментах [5] была продемонстрирована возможность запустить локальную суббуревую активность за счёт модификации ионосферно-магнитосферного взаимодействия контролируемой инъекцией 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 ультра-, крайне- и очень низкочастотных волн в магнитосферу Земли является одним из приоритетных направлений исследований, выполняемых на нагревном стенде HAARP (Аляска, США). Такой подход позволяет изучать взаимодействие волн и частиц в магнитосфере [16], а при использовании искусственного спутника Земли — измерять пространственное распределение интенсивности этих волн над областью их генерации [17]. Сегодня стенд HAARP обладает наиболее высокой эффективной мощностью излучения до 3,6 ГВт и наиболее низкой частотой излучения мощной радиоволны, что обеспечивает генерацию наиболее интенсивных плазменных возмущений по сравнению с другими стендами.

Перечисленные выше результаты показывают, какой большой интерес до сих пор вызывают исследования возможностей модифицировать магнитосферу Земли с помощью мощного радиоизлучения нагревных стендов, расположенных на её поверхности. В нашей работе мы представляем результаты измерений, полученных в экспериментах 2007–2010 годов по нагреву ионосферы среднеширотным стендом «Сура» (ФГБНУ НИРФИ, г. Нижний Новгород), и доказываем возможность модификации ионосферно-магнитосферных связей даже нагревом ионосферы «на просвет» радиоволнами небольшой мощности, следствием чего является локальное усиление авроральной активности.

Необходимо особо отметить, что в двух экспериментах зарегистрированы очень похожие возмущения магнитного поля Земли, которые можно интерпретировать как суббури, стимулированные работой стенда. Результаты этих двух экспериментов подробно анализируются в данной работе.

В одном из них была возможность использовать данные искусственного спутника Земли DEMETER [18], который во время измерений пролетал достаточно близко от стенда «Сура». На основе полученных результатов предложены модель и механизмы наблюдавшихся явлений. Заметим, что эксперименты на базе стенда «Сура» и одновременные оптические измерения с борта Международной космической станции [19, 20] показали эффективность воздействия на ионосферу даже при рабочей частоте стенда выше критической частоты для F_2 -слоя ионосферы f_{0F_2} .

1. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, ИОНОСФЕРНЫЕ УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

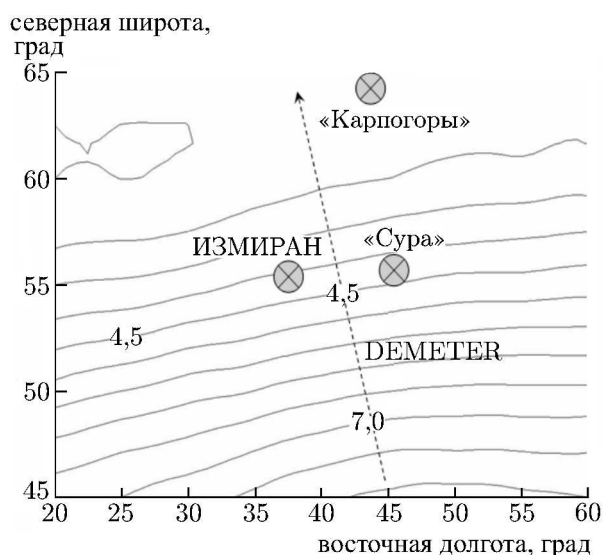


Рис. 1. План эксперимента (в географических координатах) и изолинии полного электронного содержания (интегральной по высоте концентрации электронов) в единицах $1\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ по результатам радиопросвечивания ионосферы сигналами навигационных спутников GPS

За $5 \div 20$ мин до начала работы стенда по программе проводилась настройка его передатчиков на рабочую частоту с выходом излучения в эфир. Во время экспериментов регистрировались ионограммы ионозондом DPS-4 (ИЗМИРАН, г. Москва) и ионозондом «Базис-М», расположенным на территории самого стенда. Геометрия экспериментов приведена на рис. 1. Эксперименты «Сура»—Международная космическая станция в течение 2007–2010 годов включают 12 сеансов измерений.

В табл. 1 приведены основные параметры излучения мощной радиоволны и характеристики состояния ионосферы для двух сеансов рассматриваемых здесь измерений, в которых были зарегистрированы возмущения геомагнитного поля с суббуревыми признаками.

Во всех экспериментах предполагалось, что в результате взаимодействия мощного радиоизлучения

Эксперименты выполнялись в ночное время. Для радионагрева ионосферы с помощью стенда «Сура» использовалось радиоизлучение с обычной поляризацией, как правило, на частоте 4,3 МГц. Луч антенны стенда был наклонён на 12° на юг от вертикали в плоскости геомагнитного меридиана (для стенда магнитное склонение — 11° , восточное) и направлен приблизительно вдоль магнитного поля Земли. Эти эксперименты отличались тем, что критическая частота f_{0F_2} ионосферного слоя F_2 была всегда меньше частоты мощной радиоволны, т. е. реализовывался нагрев «на просвет», и мощное излучение стенда засвечивало весь объём ионосферы по высоте в пределах диаграммы направленности.

Волна накачки излучалась в режиме 1 мин — излучение, 1 мин — пауза. Время начала излучения привязывалось к началу минуты по показаниям синхронизатора, которые ежедневно сверялись с сигналами точного времени вещательных радиостанций. Фактическая точность установки времени не превышала долей секунды.

Таблица 1

Дата	Время нагрева. Режим излучения волны накачки	Частота, эффективная мощность и поляризация волны накачки. Диаграмма направленности	Критическая частота f_{0F_2}	Ионосферные условия
02.10.2007 (сеанс 1)	18:40÷19:00 UT. 1 мин — нагрев; 1 мин — пауза	4300 кГц, 10 МВт (работал один модуль стенда), О-мода. 12° × 36° (вытянута по линии север—юг)	3,9 МГц	F_2 -spread более 4 часов (до и после эксперимента)
25.10.2010 (сеанс 2)	18:55÷19:15 UT. 1 мин — нагрев; 1 мин — пауза	4785 кГц, 100 МВт (работали три модуля стенда когерентно), О-мода. 10° × 10°	2,5 МГц	F_2 -spread в развитии

чения с ионосферной плазмой активные электроны появляются в гораздо большем поперечном сечении объёма опирающейся на область нагрева магнитной силовой трубки, чем при классическом нагреве [2], где этот объём ограничен диаграммой направленности антенны стенда и узким по высоте слоем в области отражения волны нагрева. Отметим, что во время всех активных космических экспериментов 2007–2010 годов магнитосферно-ионосферная система находилась в спокойном состоянии. Планетарный индекс магнитной активности K_p не превышал 3.

В таких условиях уже в первом эксперименте 2007 года (сеанс 1) [19, 20] были зарегистрированы местные аномалии в вариациях геомагнитного поля (данные станций ИЗМИРАН, в частности, обсерватории Карпогоры), которые могут быть связаны с нагревом ионосферы стендом «Сура». Они характеризуются тем, что сразу после включения стенда наблюдались возмущения магнитного поля Земли (см. рис. 2, левая панель), которые характерны для суббуревой активности. Возмущения геомагнитного поля были локализованы в пределах зоны «Сура»–Карпогоры [21], судя по их амплитуде по сравнению с данными глобальной сети «Интермагнет», включая станции и магнитносопряжённого региона. Событие 25 октября 2010 года (сеанс 2, см. рис. 2, правая панель) по всем признакам также можно классифицировать как микросуббурю с длительностью 1÷1,5 часа.

Обращает на себя внимание (см. рис. 2) такая особенность, как практически подобное повторение для обоих случаев характерных вариаций геомагнитного поля, отмеченных на рисунке цифрами 1, 2 и 3: резкий излом после 1-го импульса нагрева (1), узкий всплеск в районе 5÷6 импульсов волны накачки (2), затем положительная полуволна, которая заканчивается по окончании сеанса (3), и основная полуволна с амплитудой около 30 нТл и одинаковой длительностью для обоих событий. Последующий анализ магнитограмм, полученных в обсерватории Карпогоры, не обнаружил подобной комбинации вариаций в течение нескольких лет наблюдений. Это может являться серьёзным аргументом в пользу искусственного происхождения микросуббурь, развитие которых было зарегистрировано в сеансах 1 и 2 во время активных экспериментов на базе стенда «Сура».

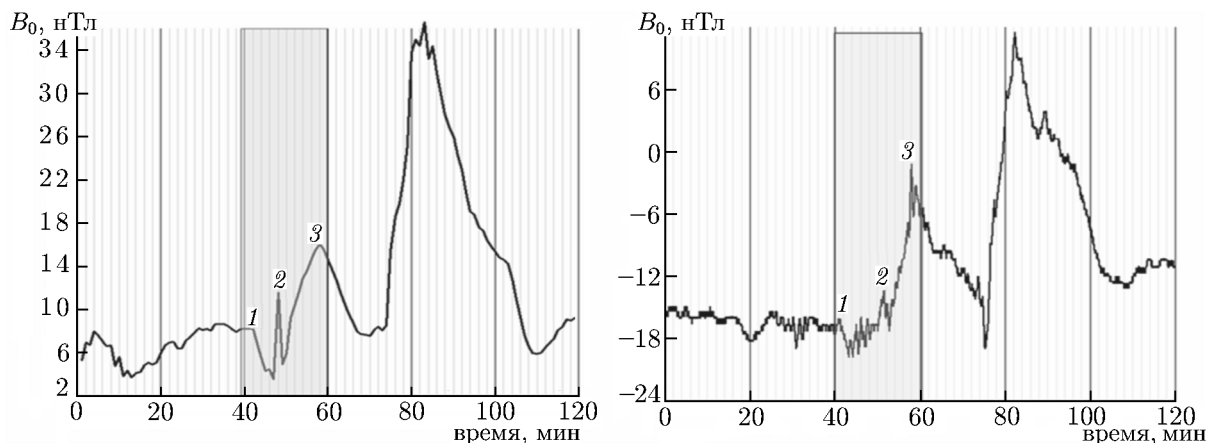


Рис. 2. Вариации магнитного поля Земли во время двух суббурь, которые предположительно вызваны работой стенда «Сура» (по данным станции ИЗМИРАН в Карпогорах для сеанса 1 02.10.2007 с 18:00 до 20:00 UT — слева и сеанса 2 25.10.2010 с 18:15 до 20:15 UT — справа). Затемнённые прямоугольники показывают время сеансов нагрева

2. ДАННЫЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ БОРТОВОЙ АППАРАТУРОЙ СПУТНИКА DEMETER И МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

При анализе магнитометрических измерений в сеансе 1 у нас была возможность использовать данные микроспутника DEMETER, поскольку нагрев проводился, когда аппарат проходил вблизи магнитной силовой трубки, модифицированной мощным радиоизлучением стенда «Сура».

Спутник DEMETER был запущен на круговую орбиту с высотой порядка 700 км для диагностики ионосферных возмущений, связанных с землетрясениями, извержениями вулканов, а также электромагнитных проявлений человеческой активности. Его характеристики подробно изложены в специальном выпуске журнала [18]. Он обладает уникальным набором высокочувствительных инструментов, что позволяет регистрировать основные параметры ионосферной плазмы: электронную и ионную концентрации и температуры, скорость ионов, энергетический спектр электронов в диапазоне $70 \text{ кэВ} \div 2,5 \text{ МэВ}$, а также измерять напряжённости электрического поля в диапазоне частот от 0 Гц до 3,3 МГц и магнитного поля от 10 Гц до 20 кГц. Имеющаяся на спутнике аппаратура даёт возможность решать задачи, связанные с изучением влияния мощных радиоизлучений существующих коротковолновых радиопередатчиков на ионосферу Земли, изучать механизмы распространения плазменных возмущений различной природы вдоль силовых линий геомагнитного поля, исследовать условия формирования спектра ионосферных неоднородностей концентрации плазмы как искусственной, так и естественной природы и т. п.

На рис. 3 приведены полученные со спутника DEMETER данные во время эксперимента 2 октября 2007 года, когда он пролетал между станцией ИЗМИРАН в Карпогорах и стендом «Сура» на минимальном расстоянии около 400 км от последнего (проекцию орбиты см. на рис. 1). Верхняя панель на рис. 2 представляет измеренные потоки энергичных электронов с энергиями до 0,1; 1,0 и 2,5 МэВ; средняя панель демонстрирует эволюцию концентрации электронов плазмы вдоль орбиты; на нижней панели показано изменение ионного состава плазмы. Стрелкой поперёк всех панелей отмечен момент максимального сближения спутника с осью возмущённой магнитной силовой трубки.

Судя по падению концентрации плазмы при пересечении спутником 56° с. ш. и появлению сильной нестационарности в её распределении (средняя панель), граница плазмосферы находилась именно в этом месте — значительно южнее её обычного положения. Здесь же резко

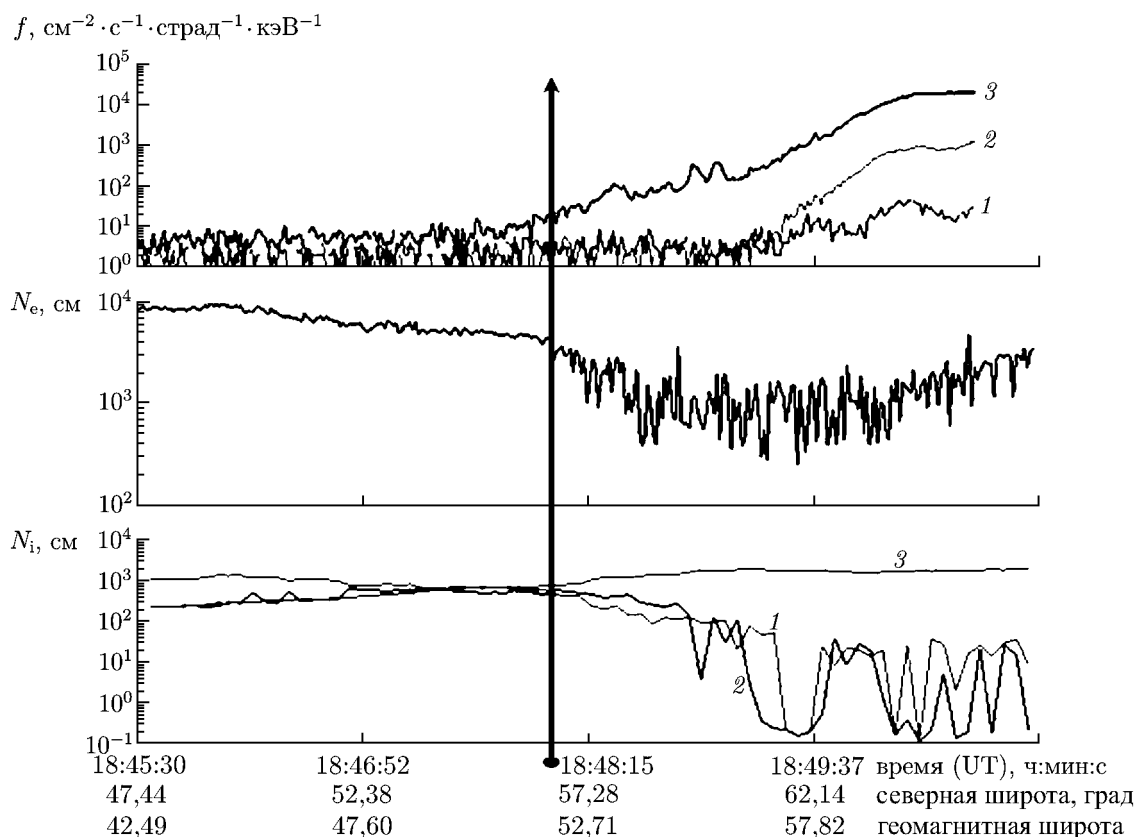


Рис. 3. Результаты измерений плазменных характеристик 02.10.2007 на орбите спутника DEMETER (высота орбиты порядка 660 км). На верхней панели представлены измеренные потоки энергичных электронов f с энергиями до 0,1 МэВ (кривая 1); 1,0 МэВ (кривая 2) и 2,5 МэВ (кривая 3); на средней панели показано поведение концентрации электронов плазмы вдоль орбиты; на нижней панели приведено изменение ионного состава плазмы (кривая 1 соответствует иону H^+ , 2 — He^+ , 3 — O^+)

нарастают потоки энергичных электронов с энергиями до 100 кэВ и тяжёлых ионов кислорода. Последний факт свидетельствует о наличии продольного тока, вытекающего из ионосферы. На неустойчивость ионосферной плазмы в этой области указывает ионосферное рассеяние радиоволн типа « F_2 -spread», обнаруженное сетью ионозондов на широте станда в долготном секторе по крайней мере от Казани до Калининграда. Такое рассеяние, согласно [22], является дополнительным признаком наличия продольного тока в этом обширном регионе ещё до начала эксперимента.

Данные карт полного электронного содержания мировой сети станций International Geophysical System (см. рис. 1) позволяют оценить интегральное содержание плазмы по результатам просвечивания ионосферы сигналами от спутников GPS. Для оценки состояния ионосферно-магнитосферной системы анализировались глобальные карты полного электронного содержания в формате IONosphere map EXchange, которые регулярно создаются в Jet Propulsion Laboratory по данным сети станций International Geophysical System с использованием более чем 150 станций приёма сигналов от спутников GPS. Данный формат предполагает пространственное разрешение 5° по долготе, $2,5^\circ$ по широте и временной интервал 2 часа. Данные в формате IONosphere map EXchange доступны на сайте <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>. Известно также [23], что использование глобальных карт полного электронного содержания позволяет проводить непрерывный мониторинг ионосферы с высокой точностью и достоверностью.

На рис. 1 представлены пространственные вариации полного электронного содержания для конкретного дня на двухчасовом интервале 18–20 UT) в единицах измерения TECU ($1\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$) над пунктами «Сура», ИЗМИРАН и Карпогоры. Пунктиром на рисунке показана проекция орбиты спутника DEMETER во время работы стенда «Сура». Сравнивая полное электронное содержание поведение концентрации плазмы (см. рис. 3) на высоте полёта спутника DEMETER, можно видеть, что интегральная по высоте концентрация электронов имеет провал севернее стенда и косвенно подтверждает вывод о возможном положении границы плазмосферы вблизи параллели «Сура»–ИЗМИРАН–Калининград.

Все эксперименты выполнялись с привлечением бортовой аппаратуры «Фиалка» российского сектора Международной космической станции [20]. В эксперименте 2007 года после вхождения области нагрева в поле зрения бортового регистратора наблюдалось яркое местное оптическое свечение, которое, по оценкам, находилось в пределах $100 \div 300$ км (при высоте нижнего края сияния $130 \div 150$ км) к северу от стенда «Сура». Это оптическое свечение совпадает со всплеском 2 (рис. 2, левая панель) магнитного поля и, по-видимому, обусловлено впрыскиванием электронов из двойного слоя, развившегося на взрывной фазе активизации суббури. Диаметр области свечения по долготе составил около $200 \div 250$ км.

3. СЦЕНАРИЙ АКТИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

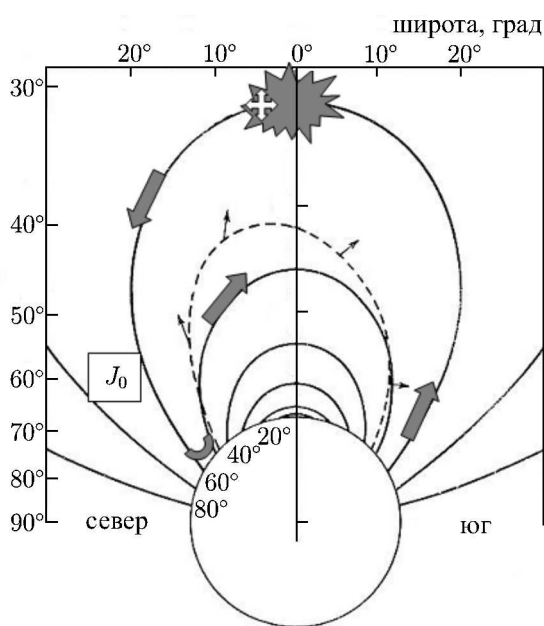


Рис. 4. Сценарий активного космического эксперимента «Сура»–Международная космическая станция

новое сопротивление меньше, т. к. магнитная силовая линия находится внутри плазмосферы, где концентрация плазмы выше, а альвеновская скорость меньше.

При наличии естественных нитевидных неоднородностей в ионосфере, вытянутых вдоль магнитного поля, продольный ток в зоне стенда структурируется, т. е. возникает мозаичная картина в плоскости сечения магнитной силовой трубки, начинённой такими неоднородностями. Это повышает вероятность превышения критического значения плотности тока для реализации соответствующих неустойчивостей плазмы в задействованной структуре ионосферно-магнитосферной

Предполагается, что возникновение источника плазменных возмущений на магнитных силовых линиях субавроральных широт сопровождается всплеском продольных токов. Этот ток растекается в некоторой области ионосферы и замыкается через другие силовые линии с подключением её магнитосопряжённой области (см. рис. 4). Согласно [24] «холодные» электроны с энергией меньше 1 эВ являются подходящими носителями продольного тока. Для того, чтобы создать токи с наблюдаемой плотностью $1 \div 10 \text{ А/км}^2$, достаточно, как правило, приложить очень небольшую (меньше 1 В) продольную разность потенциалов.

В нашем случае при модификации ионосферы немного южнее основной токовой зоны (см. данные спутника DEMETER, рис. 3), продольный ток может замыкаться через магнитные силовые линии в окрестности стенда «Сура». Оценки показывают, что этот путь короче и интегральная проводимость вдоль него выше, т. е. волновое сопротивление меньше, т. к. магнитная силовая линия находится внутри плазмосферы, где концентрация плазмы выше, а альвеновская скорость меньше.

цепи.

Ионосферное рассеяние радиоволн типа « F_2 -spread», которое обнаруживается на ионограммах, как минимум, во всём долготном поясе от Калининграда до Казани, свидетельствует о наличии ионосферных неоднородностей этого нитевидного типа во время экспериментов. Одной из причин появления такого рассеяния [22] может быть конвективно-токовая неустойчивость ионосферной плазмы, которая наступает при наличии продольных токов.

Таким образом, в соответствии с предложенной выше физической моделью предполагается, что при работе нагревного стенда в пределах диаграммы направленности его антенны появляются «активные» электроны, которые увеличивают плотность продольного тока в объёме ионосферы, засвеченном излучением стенда. Проводимость в этом месте возрастает и ограничивает в ионосфере область, через которую возможно замыкание тока, прежде распределённого севернее стенда. На рис. 5 схематично представлены горизонтальная проекция на ионосферу распределения продольных токов (<http://www.kosmofizika.ru/ucheba/dist/fig3a.jpg>) в области зоны Харанга и положение обсерватории Карпогоры и стенда «Сура».

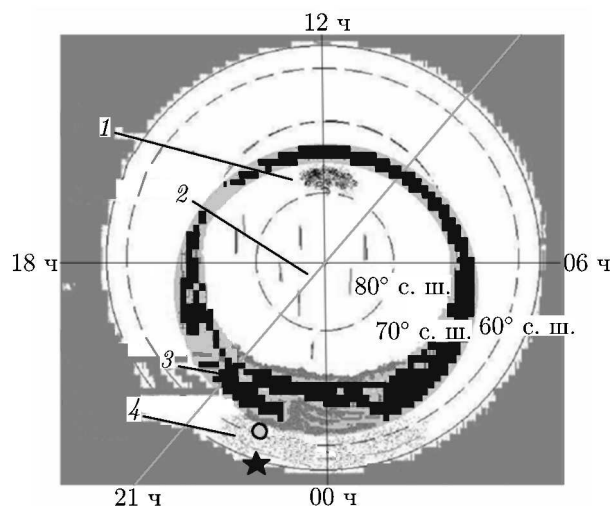


Рис. 5. Зоны токов (сегмент разрыва Харанга [24], 21:00–00:00 по местному времени) втекающих (чёрный цвет) и вытекающих из ионосферы (серый). Звёздочка обозначает стенд «Сура», а круг — Карпогоры; 1 — касп, 2 — полярная шапка, 3 — кольцевая зона, 4 — субавроральная зона. По периметру рисунка указано местное время

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Учитывая скромные пространственные масштабы нашего воздействия на ионосферно-магнитосферную цепь для активации авроральных процессов и множество возникающих в связи с этим вопросов, отметим весьма активно развивающееся в последние годы новое направление, в котором суббуря рассматривается как стохастический процесс в системе с мелкомасштабной ячеистой структурой и случайным распределением избранного параметра ячеек, например, напряжённости магнитного поля. Под воздействием внешней причины возмущение в подобной системе, например магнитное пересоединение, начинается в малом числе ячеек, где параметр имел критическое значение к началу процесса. Результатом является сброс параметра ниже порогового уровня и последующая временная эволюция каждой возмущённой ячейки, но за счёт этого не одна, а ряд соседних ячеек достигают критического уровня данного параметра и система переходит в режим возмущения. Таким образом, при сохраняющемся внешнем воздействии возмущение охватывает всё большее число ячеек, распространяясь подобно лавине. Такой процесс получил название самоорганизованной критичности (см., например, [25, 26] и ссылки там). Известны многочисленные наблюдения, свидетельствующие о мелкомасштабной ячеистой структуре магнитного поля в хвосте земной магнитосферы и токовой системы нейтрального слоя.

Среди механизмов, предложенных для объяснения свойств продольного электрического поля, наиболее широко известны аномальное сопротивление плазмы и зеркальная геометрия магнитного поля Земли. Для появления двойного слоя необходима исходная разность электрических потенциалов. В бесстолкновительной плазме она сосредоточится в слое с толщиной порядка дебаевско-

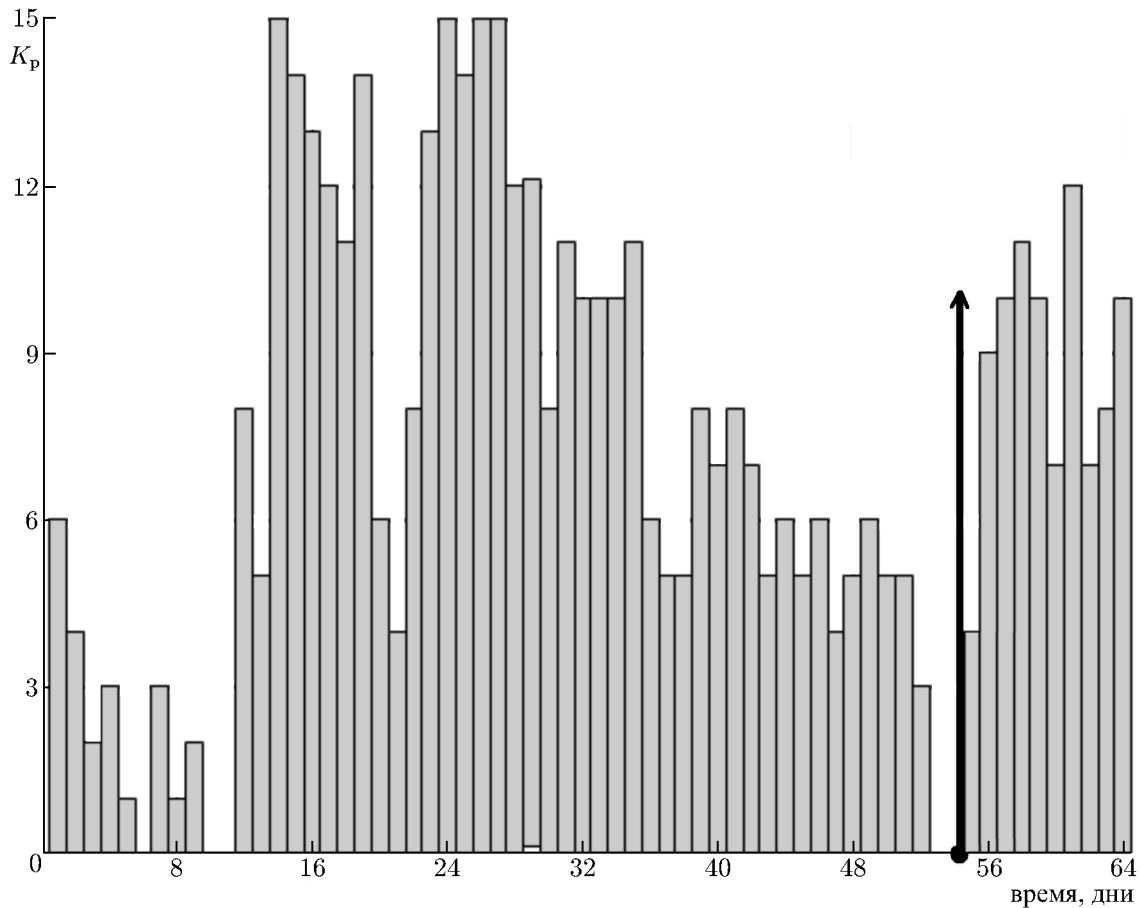


Рис. 6. Вариации величины 3-часового K_p -индекса, отражающего уровень геомагнитной активности с 26.09.2007 по 03.10.2007, т. е. до и после проведения первого сеанса измерений эксперимента «Сура»—Международная космическая станция. Видно, что этот сеанс (его время обозначено стрелкой) был проведён на стадии восстановления геомагнитной бури, которая протекала в период 27.09–01.10.2007

го радиуса. Аномальное сопротивление плазмы возникает, если относительная скорость электронов и ионов в продольном токе превышает скорость ионного звука. В этом случае плазма становится неустойчивой относительно ионно-звуковых или ионно-циклотронных колебаний. Аномальное сопротивление способно быстро нагревать плазму на соответствующих силовых линиях, а образование двойных слоёв приводит к ярким пространственно ограниченными формам полярных сияний. Вторжение энергичных частиц, ускоренных в двойном слое, вызывает не только локализацию сияний, но и резко увеличивает поперечные проводимости ионосферной плазмы, что приводит к росту плотностей продольных токов, замыкающихся через эту область ионосферы. Таким образом, положительная обратная связь ограничивает в пространстве лавинообразный процесс.

Граница плазмосферы наиболее неустойчива и предпочтительна для активного вмешательства в авроральные процессы. Положение границы плазмосферы на низких географических широтах часто сохраняется на восстановительной фазе магнитной бури, см., например, [27]. Исходя из данных IONosphere map EXchange и спутника DEMETER (см. рис. 1 и 3), показывающих положение границы плазмосферы, и магнитометрических данных (см. рис. 6), определяющих время начала восстановительной фазы геомагнитной бури, именно эти условия способствовали срыву суббури в первом эксперименте «Сура»—Международная космическая станция 02.10.2007 и

появление яркого местного оптического свечения [19, 20] в момент искусственной активации суббури [21]. В эксперименте 25.10.2010, практически тождественно первому, повторно наблюдался такой же ход развития событий (см. рис. 2).

Таким образом, есть все основания предполагать, что при качественном прогнозе состояния магнитосферно-ионосферной системы можно пространственно ограничить суббурю с помощью локального воздействия на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура». Наши выводы основаны на результатах экспериментов «Сура»—Международная космическая станция, полученных за три года (всего 12 аналогичных экспериментов со стендом) в разных условиях, т. е. при различных местном времени, сезоне и т. д.. В первую очередь отметим повторение только в октябре (в двух успешных экспериментах) суббуревой активности как по форме, так и по привязке к периоду нагрева с точностью до секунд. Подобное в естественных условиях не наблюдалось, о чём свидетельствует анализ магнитограмм Карпогор за октябрь месяц нескольких предшествующих лет. Для подкрепления достоверности выводов использован комплекс данных наземной сети магнитометров «Интермагнет», ионозондов ИЗМИРАН, «Сура» и т. д., спутников DEMETER, GPS и измерений на борту Международной космической станции.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Накопленные в последнее время экспериментальные факты, в частности при проведении экспериментов «Сура»—Международная космическая станция, свидетельствуют о возможности эффективного вмешательства в природные процессы с помощью среднеширотного стенда даже при небольшой (порядка 10 МВт) эффективной мощности излучения волны накачки. Результаты серии экспериментов 2010 года подтвердили, что для возможного пространственного ограничения суббури активные эксперименты на базе стенда «Сура» следует проводить вблизи равноденствия и местной полудни (сектор разрыва Харанга: 21:00–24:00 по местному времени, см. рис. 5), а также, предпочтительно, в конце восстановительной фазы геомагнитной бури, т. е. в подготовленной ионосфере.

Несомненно, необходимо проводить дальнейшее исследование возможности повысить эффективность и повторяемость искусственного воздействия на ионосферу в процессе активных комплексных космических экспериментов. Продолжение последних важно не только для более глубокого понимания ионосферно-магнитосферных связей и фундаментальных процессов физики плазмы околоземного космического пространства, но и для различных практических приложений.

Авторы выражают благодарность сотрудникам стенда «Сура» за обеспечение работы стенда, Х. Д. Канониди и К. Х. Канониди — за проведение магнитных измерений и рецензенту, благодаря замечаниям которого улучшено содержание и представление результатов работы.

Работы на стенде «Сура» проводились при финансовой поддержке РФФИ (грант 11–02–00374–а) и Министерства образования и науки РФ (госконтракт 16.518.11.7066).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Atmos. Terr. Phys. 1997. V. 58, No. 18.
2. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
3. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
4. Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545.

5. Благовещенская Н. Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С.-Петербург: Гидрометеозда, 2001.
6. Vas'kov V. V., Bud'ko N. I., Kapustina O. V., et al. // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 1998. V. 60. P. 1 261.
7. Гдалевич Г. Л., Клос З., Михайлов Ю. М. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2003. Т. 43. С. 645.
8. Васьков В. В., Комраков Г. П., Ораевский В. Н. и др. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1995. Т. 35. С. 154.
9. Рапопорт В. О., Фролов В. Л., Комраков Г. П. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2007. Т. 50, № 8. С. 709.
10. Rapoport V. O., Frolov V. L., Polyakov S. V., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 2010. V. 115. Art. no. A10322.
11. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // *Письма в ЖЭТФ.* 2008. Т. 88, вып. 12. С. 908.
12. Марков Г. А., Белов А. С., Фролов В. Л. и др. // *ЖЭТФ.* 2010. Т. 138, вып. 6. С. 1037.
13. Robinson T. R., Strangeway R., Wright D. V., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27, No. 19. P. 3 165.
14. Wright D. V., Davies J. A., Yeoman T. K., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 2003. V. 108, No. 2. P. 1090.
15. Zelenyi L. M., Petrukovich A. A., Lutsenko V. N., Mogilevsky M. M. // *EOS.* 2004. V. 85, No. 17. P. 169.
16. Golkowski M., Inan U. S., Gibby A. R., Cohen M. B. // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. Art. no. A10201.
17. Piddyachiy D., Inan U. S., Bell T. F., et al. // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. Art. no. A10308.
18. *Planet. Space Sci.* 2006. V. 54, No. 5.
19. Ruzhin Yu. Ya., Kuznetsov V. D., Karabadzhak G. F., et al. // 37th COSPAR. 2008. Montreal, Canada. Art. no. C52-0036-08.
20. Карабаджак Г. Ф., Комраков Г. П., Кузнецов В. Д. и др. // *Космонавтика и ракетостроение.* 2009. Вып. 4 (51). С. 134.
21. Ружин Ю. Я., Иванов К. Г., Кузнецов В. Д., Петров В. Г. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2009. Т. 49, № 3. С. 703.
22. Ossakov S. L., Chaturvedi P. K. // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1979. V. 6. P. 332.
23. Jakowski N., Sardon E. // Report at Int. GPS Service Symposium, Silver Spring, USA, 19–21 March 1996.
24. Волков М. А., Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1985. Т. 25, № 3. С. 445.
25. Klimas A. J., Valdivia J. A., Vassiliadis D., et al. // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 18 765.
26. Milovanov A. V., Zelenyi L. M., Zimbardo G. // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 19 903.
27. Кринберг И. А., Тацилин А. В. *Ионосфера и плазмосфера.* М.: Наука, 1984. 189 с.

Поступила в редакцию 9 декабря 2011 г.; принята в печать 27 февраля 2012 г.

ON THE POSSIBILITY OF LOCALIZATION OF A SUBSTORM USING THE “SURA” HEATING FACILITY

*Yu. Ya. Ruzhin, V. D. Kuznetsov, V. I. Kovalev, I. N. Bershadskaya, G. F. Karabadzhak,
Yu. A. Plastinin, V. L. Frolov, G. P. Komrakov, and M. Parro*

We present the results of analyzing helio-geophysical conditions of the experiments performed in 2007–2010 to study modification of the ionosphere with high-power RF radiation of the “Sura” heating

facility. The peculiarity of the experiments is the fact that the operating frequency of the facility exceeded the upper-hybrid plasma frequency for the maximum of the F₂ layer of the ionosphere. All the experiments were performed in the local-time sector of the Harang discontinuity (i.e., from 21:00 to 00:00, local time) to match the most probable influence of the facility operation on the onset of natural processes in the subauroral region of the ionosphere. At least two experiments were found to demonstrate that the observed substorm activity in the region of the modification produced by the facility could be stimulated by its operation. The results of the ground- and satellite-based measurements, both in the vicinity of the “Sura” facility, and in the magnetically linked region, confirm the conclusion about the possibility of substorm localization by this facility.