

О триггерировании авроральной активности мощным КВ излучением стенда СУРА.

Ю.Я. Ружин¹, В.Д. Кузнецов¹, И.Н. Бершадская¹, Г.Ф. Карабаджак², Ю.А. Пластинин², В.Л. Фролов³.

1 - Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г.Троицк, E-mail: ruzhin@izmiran.ru

2- ФГУП «Центральный научно - исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИМАШ), Россия, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, 4

3 - ФГБНУ Научно-исследовательский радиофизический институт г. Н.Новгород

Результаты экспериментов по модификации ионосферы радионагревом, проведенных на базе стенда СУРА совместно с оптическими измерениями на борту 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 и спутников ДЕМЕТЕР и GPS . В нашем докладе приводятся результаты анализа лучевого КВ радио трассирования для эксперимента 02.10.07, базирующиеся на учете всего комплекса данных. 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°-65°. В результате получено, что результаты наземных и спутниковых измерений (как в окрестности стенда СУРА, так и в магнитносопряженной области) поддерживают вывод о возможности триггерирования суббури нагревным стендом СУРА.

The results of the experiments on modification of the ionosphere by high-power high-frequency (HF) waves from the SURA heating facility are presented. The effects of modification were observed on board the International Space Station (ISS), DEMETER satellite and groundbased observatories. At all Sura-ISS experiments the HF ordinary waves is used to be always more than plasma frequency at F2 max. In the present study the ray tracing analysis clearly shows that ionosphere density decreasing (from DEMETER and IONEX data) at higher than SURA latitudes can redirect and refocused transmitter beam power in northward structure (up to 50°-65° latitude) away from the beam center by refraction. By this way we have chance to participate by means of radiated SURA HF power in subauroral and auroral processes. As conclusion, the results of our SURA - ISS experiment series have shown the possibility of substorm triggering by the active experiments on the basis of SURA facility.

В нашей работе, мы представляем результаты измерений, полученные в нагревных экспериментах на стенде СУРА (ФГБНУ НИРФИ, Н. Новгород), и приводим доказательство возможности модификации ионосферно-магнитосферной связи при нагреве ионосферы мощными КВ радиоволнами и, как следствие этого, — локальной интенсификации авроральной активности. 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. Эксперименты выполнялись в ночное время. Для радионагрева ионосферы с помощью стенда СУРА [1] использовалось радиоизлучение обыкновенной поляризации, как правило, на частоте 4,3 МГц. Луч излучающей антенны стенда был ориентирован под углом 12° от вертикали на юг в плоскости геомагнитного меридиана (для стенда магнитное склонение составляет 11° восточное) приблизительно вдоль геомагнитного поля Земли. Особенностью этих экспериментов являлось то, что для всех выполненных экспериментов критическая частота f_{0F2} ионосферного слоя F_2 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 течении 2007 – 2010 гг. было проведено 12 сеансов измерений. В таблице 1 приведены основные параметры излучения мощной радиоволны и характеристики состояния ионосферы для двух сеансов рассматриваемых здесь измерений, в которых были зарегистрировано появление возмущений геомагнитного поля с суббуревыми признаками.

Таблица 1. 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
<u>Сеанс 1.</u> 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 часов (до эксперимента и после).
<u>Сеанс 2.</u> 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).

Приведем результаты анализа комплекса наблюдений с борта Международной космической станции (МКС) и последствий воздействия на ночную ионосферную плазму мощного радиоизлучения стенда «Сура» 2 октября 2007 года (18:40 – 19:00 UT). С борта МКС ТВ-камерой оптического диапазона получено более 1000 изображений яркого локального свечения (Рис.1, правая панель), появившегося в поле зрения камеры при пролете в окрестности стенда «Сура». Компактное пятно свечения появилось к северо-северо-востоку от стенда (минимум в 100-200 км, см. левую панель – серые прямоугольники) и перемещалось на восток в плоскости изображения со скоростью около 5 км/сек. Яркость аврорального свечения достигала десятков килоэрэлей.

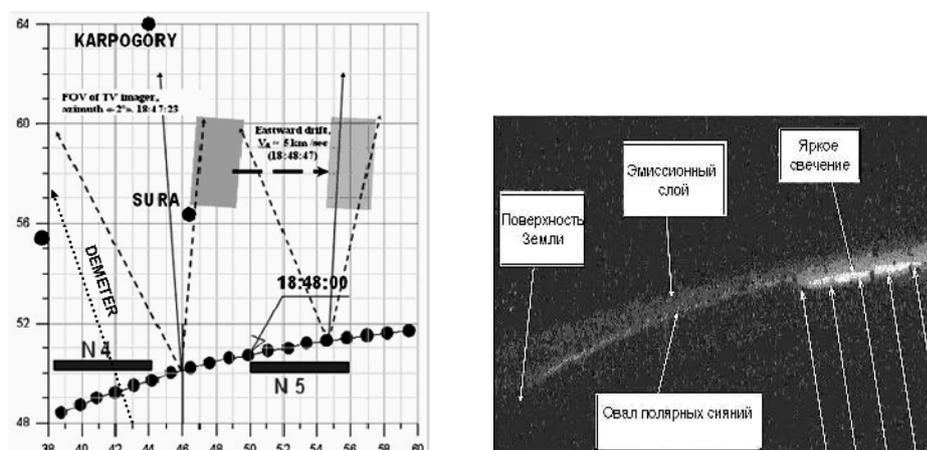


Рис. 1. Представлены, слева - план эксперимента 02.10.09 (в географических координатах) и справа - яркое локальное свечение, зарегистрированное средствами МКС в этом же эксперименте.

Предполагалось, что в экспериментах «на просвет» в результате взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой появляются нагретые электроны в гораздо большем поперечном сечении объема 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 [1] из-за низкой эффективной мощности нагрева (см. Таблицу). Аномальным является и положение его на расстоянии минимум в 100-200 км от оси КВ пучка излучаемого стендом СУРА.

Отметим дальше, что во время всех активных космических экспериментов 2007-2010 гг. наблюдалось спокойное состояние магнитосферно-ионосферной системы. Планетарный индекс магнитной активности не превышал 3. В таких условиях уже в первом эксперименте 2007 г. (сеанс 1) [3,4] были зарегистрированы локальные 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 в магнитном поле Земли (см. рис.1, левая панель), которые характерны для суббуревой активности и, судя по амплитуде (в сравнении с данными глобальной сети «Интермагнет», включая станции и магнитно сопряженного региона), были локализованы в пределах зоны СУРА-Карпогоры [5]. Событие 25 октября 2010 года (сеанс 2, см. рис.1, правая панель) по всем признакам также можно классифицировать как микросуббурю длительностью 1-1.5 часа.

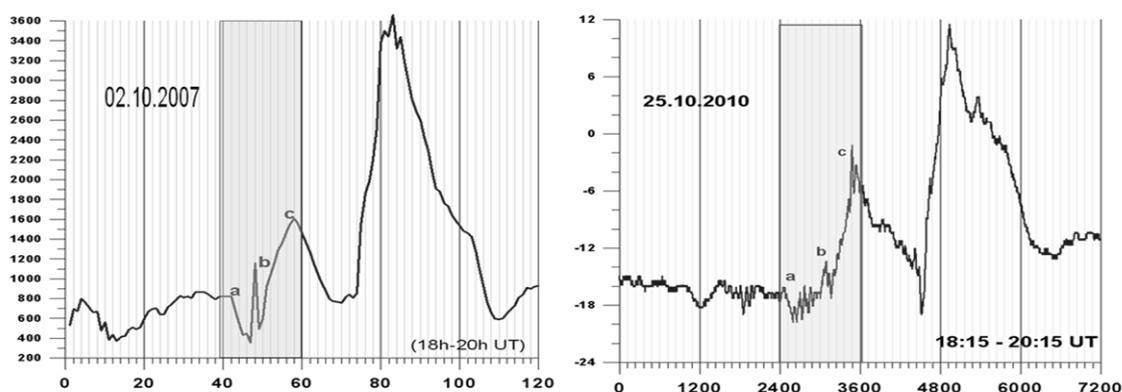


Рис. 2. Вариации магнитного поля Земли во время 2-х суббурь, которые предположительно вызваны работой стенда СУРА (по данным станции ИЗМИРАН в Карпогорах для сеанса 1 – слева и сеанса 2 – справа). Затемненные прямоугольники показывают время сеансов нагрева.

Обращает на себя внимание (см. рис. 2) такая особенность, как практически подобное повторение для обоих случаев характерных вариаций геомагнитного поля (см.: а, в и с): сброс после 1-го импульса нагрева, всплеск в районе 5–6-го импульсов волны накачки, 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 течении 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.

Эксперимент 2007 г. проведен синхронно с пролетом спутника ДЕМЕТЕР [6]. Рассмотрим ситуацию в ионосфере в районе стенда по данным измерений комплексом научной аппаратуры спутника. На Рис.3 (слева) приведены результаты измерений аппаратурой спутника ДЕМЕТЕР (на высоте ~660 км) во время эксперимента 02 октября 2007 года, когда спутник пролетал между Москвой и Сурой на минимальном расстоянии ~400 км от стенда (см. проекцию орбиты см. на Рис.1). Верхняя панель на Рис.3 (слева) представляет измеренные потоки энергичных электронов с энергиями до 0.1, 1.0 и 2.5МэВ; средняя панель демонстрирует поведение концентрации 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 магнитной силовой трубки). Видно,

что, судя по падению концентрации плазмы (при пересечении широты 56 градусов) и появлению признаков сильной нестационарности в распределении концентрации плазмы (средняя панель), граница плазмосферы находилась именно в этом месте, то есть значительно южнее обычного ее положения. Признаки качественного перехода в зону плазменной турбулентности подтверждаются также измерениями температуры ионов и электронов на борту ДЕМЕТЕР. Здесь же начинают резко нарастать компонента энергичных электронов до 100 кэВ и концентрация тяжелых ионов кислорода. Ион кислорода становится доминирующим. Последний факт является свидетельством вхождения спутника в зону продольного тока, вытекающего из ионосферы.

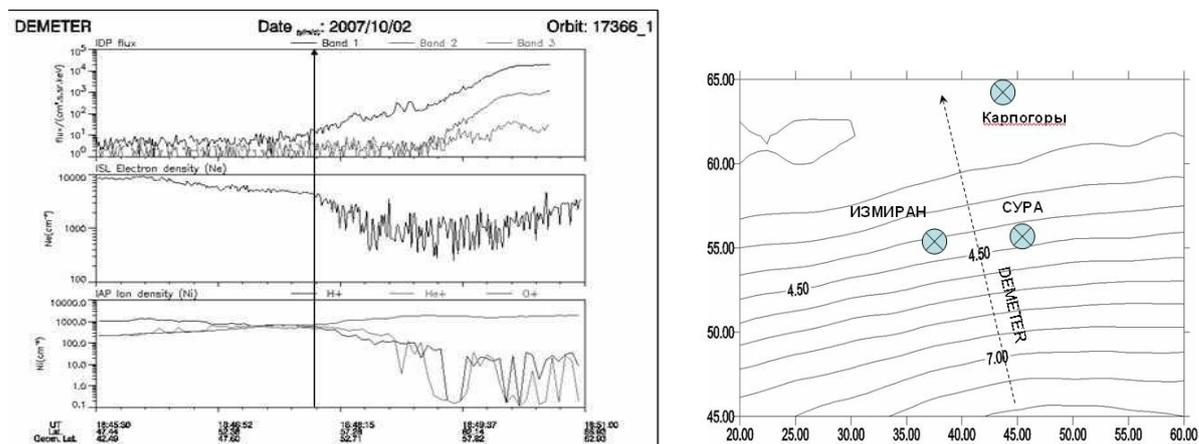


Рис. 3. Представлены данные измерений спутником ДЕМЕТЕР [10] (слева) и изолинии ТЕС (справа, географические координаты) - интегрального содержания плазмы по результатам радио просвечивания ионосферы сигналами системы спутников GPS.

О неустойчивости ионосферной плазмы в этой же области свидетельствует ионосферное рассеяние радиоволн типа « F_2 -spread», обнаруженное на сети ионозондов на широте станда в долготном секторе, по крайней мере, от Казани до Калининграда, что является дополнительным признаком [7] присутствия продольного тока в этом обширном регионе еще до начала эксперимента.

Данные карт ТЕС (Total Electron Content) мировой сети IGS станций (Рис.3) 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 данных более чем от 150 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 мониторинг ионосферы с высокой точностью и достоверностью [8]. 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 ДЕМЕТЕР во время работы станда СУРА. Сравнивая ТЕС с поведением концентрации плазмы на высоте спутника ДЕМЕТЕР, видим, что интегральное содержание минимально в районе севернее станда, что подтверждает вывод о возможном положении границы плазмосферы вблизи параллели СУРА – ИЗМИРАН.

Согласно ионограмм, полученных в районе нагревного станда «Сура», которые характеризуют состояние ионосферы во время проведения эксперимента, критические частоты основных слоев ионосферы были ниже рабочей частоты станда. Модификация

ионосферы в зоне ее засветки радиолучами станда могла быть «на просвет», то есть проходящей мощной волной в пределах диаграммы ($12^{\circ} \times 36^{\circ}$), направленности антенного поля станда «Сура». Нагрев электронов ионосферной плазмы должен был происходить в объеме, засвеченном стандом в диапазоне высот от 100 км и выше [9,10]. Но аномальное свечение, зарегистрированное на МКС и наблюдавшаяся суббуревая активность явно не совпадают с положением станда и смещены к северу от станда на сотни километров. Обнаруженное положение плазмопаузы севернее станда во время эксперимента, 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 станда могло привести к наблюдавшейся авроральной активности.

Известно, что существенное влияние на распространение КВ оказывает неоднородность ионосферы в горизонтальном направлении. 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, изменяется время группового запаздывания, расстояние скачка, величины МПЧ. Опираясь на конкретные данные спутников ДЕМЕТЕР, GPS и наземного радиозондирования проведен анализ лучевого радиотрассирования, который показал (Рис.4), что спад концентрации (градиент критических частот и МПЧ) севернее станда создавал условия для перераспределения и перефокусировки излучаемого пучка КВ за счет рефракции. При этом засвеченная область ионосферы (в меридиональной плоскости) могла достигать широт 60° - 65° , что, повидимому, и приводило к успешному вмешательству в субавроральные процессы. Панели на рисунке отличаются только положением излучателя (правая панель: горизонтальное смещение станда СУРА к югу - 50 км) относительно градиента.

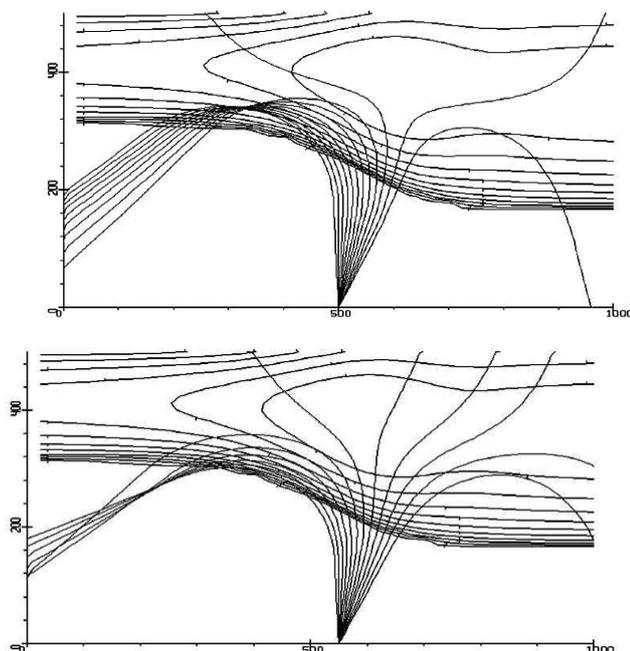


Рис. 4. Результаты радиотрассирования (высота – дальность, км) для эксперимента 2007 г. При расчете приняты во внимание: $N_e = 5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$ ($h=660 \text{ km}$ – ДЕМЕТЕР); $f_{0F2}=3.8 \text{ MHz}$; $h_m=280 \text{ km}$; $f_{\text{SUРА}}=4.3 \text{ MHz}$; $\text{FOV}=(36^{\circ} \times 12^{\circ})$; $\text{TEC} = 2.5 - 4.0 \text{ TECU}$ (IONEX data).

Отметим, что фокусировка (панель справа) наступает на севере от СУРЫ примерно в 340 км, а ионосфера «засвечена» до 59° - 60° северной широты. Локальная аврора (см. Рис.1, левая панель) находится на таком же расстоянии, если минимальная высота (высота

нижнего края полярного сияния) около 105-110 км (верхи прямоугольников). Как отмечено выше, все эксперименты выполнялись с привлечением бортовой аппаратуры РС МКС (аппаратура «Фиалка») [4]. В эксперименте 2007 года после вхождения области нагрева в поле зрения бортового регистратора зарегистрировано яркое локальное свечение, которое по оценкам, находилось в пределах 100-200 км (при высоте нижнего края сияния 140-150 км) к северу от стенда СУРА. Свечение совпадает со всплеском «в» (Рис.2, левая панель) в магнитном поле и, вероятно, обусловлено впрыскиванием электронов двойным слоем, развившемся на взрывной фазе активизации суббури в зоне продольного тока, вытекающего из ионосферы.

Таким образом, накопленные экспериментальные факты при проведении экспериментов СУРА – МКС, свидетельствуют о возможности эффективного вмешательства в природные процессы с помощью среднеширотного стенда даже при небольшой (~ 10 МВт) эффективной мощности излучения волны накачки. Результаты серии экспериментов 2010 года подтвердили, что для возможной локализации суббури активные эксперименты на базе стенда СУРА следует планировать [10] в периоды вблизи равноденствия и локальной полуночи (сектор разрыва Харанга: 21-24 LT), а также, предпочтительно, в конце восстановительной фазы геомагнитной бури (в подготовленной ионосфере). Как итог, отметим, что есть веские основания предполагать, что при качественном прогнозе состояния магнитосферно-ионосферной системы можно триггерировать суббурю с помощью локального воздействия на ионосферу мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА. Наши выводы основаны на результатах серии экспериментов СУРА – МКС, полученных за три года (всего 12 аналогичных экспериментов со стендом) в разных условиях (локальное время, сезонные вариации и т.д.). В первую очередь 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 в природе не наблюдалось в течении нескольких лет. Для достоверности выводов использован комплекс данных наземной сети магнитометров (ИНТЕРМАГНЕТ), ионозондов (ИЗМИРАН, СУРА и т.д.), спутников ДЕМЕТЕР, GPS и измерений на борту МКС.

Литература

1. 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.
2. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. // УФН, 2007, Т. 177, №11, с.1145-1177
3. Kuznetsov V.D., Ruzhin Yu.Ya., Karabadzha 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, 2008, Montreal, Canada, Abstr.C 52-0036-08.
4. 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), Стр.134-157.
5. 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 аэрономия, 2009, Том 49, № 3, стр. 703-708.
6. First results of the DEMETER micro-satellite. //Planetary and Space Sci., 2006. Vol. 54, No. 5 (special issue).
7. Ossakov S.L. and Chaturvedi P.K. Current convective instability in diffuse aurora. J.Atmos.Terr.Phys. 1979, 6, 332-335
8. Jakowski N. and Sardon E. Comparison of GPS/IGS-derived TEC data with parameters measured by independent ionospheric probing techniques // International GPS Service Symposium, Silver Spring, Md., 19-21 March, 1996

9. Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Карабаджак Г.Ф., Пластинин Ю.А., Б.А. Хмелинин, В.Л. Фролов, Г.П. Комраков. Комплексный эксперимент «Сура» - МКС (2 октября 2007 года). Труды конф. «Радиофизические методы в дистанционном зондировании», Секция 1, Муром, 2009. стр.66-70.
10. Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Ковалев В.И., Карабаджак Г.Ф., Пластинин Ю.А., Б.А. Хмелинин, В.Л. Фролов, Г.П. Комраков, М. Паро. О возможности локализации суббури нагретым стендом СУРА. Труды 23-ой Всеросс. научной конференции «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, 2011 г. Том 2; С. 255-260