

Комплексные наземно-космические эксперименты Сура-МКС 2017 года

Ю.Я. Ружин¹, В.С. Докукин¹, В.Д. Кузнецов¹, Ю.А. Пластинин²,

¹ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4, E-mail: ruzhin@izmiran.ru

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

В задачи экспериментов 2017г. входили: прогноз гео- и гелиофизических условий в ионосфере, выбор режимов нагрева при минимальных значениях критической частоты слоя F2 ионосферы, анализ результатов радиозондирования ионосферы и измерения геомагнитных возмущений наземными средствами, исследования возможностей повышения эффективности и вероятности искусственного воздействия на ионосферу, а также установление корреляции между вариациями геомагнитного поля и циклограммой работы радионагревного стенда. Эксперименты проведены с применением комбинации новых условий нагрева (скважность, период воздействия, двухчастотный и непрерывный нагрев, вариации излучаемой мощности, поляризация, направление КВ излучения и др.) в промежутках между рекуррентными магнитными бурями. Показано наличие пульсаций геомагнитного поля и эффектов суббурь, стимулированных стендом Сура (в соответствии с циклограммой), на фоне спокойных геофизических условий.

The objectives of the experiments 2017 included: forecast of geo - and heliophysical conditions in the ionosphere, the choice of heating modes with a minimum critical frequency of the F2 layer of the ionosphere, analysis of the results of radio sounding of the ionosphere and measurements of geomagnetic disturbances on the ground, research of efficiency and probability artificial effects on the ionosphere, and founding correlations between geomagnetic field variations and program of Sura emission. The experiments were carried out using a combination of new heating conditions (duty cycle, exposure period, two-frequency and continuous heating, variations in radiated power, polarization, direction of radiation HF, etc.) in the intervals between recurrent magnetic storms. The presence of geomagnetic field pulsations and effects of substorms stimulated by the SURA facility (in accordance with the cycloramas) against the background of quiet geophysical conditions is shown.

Введение

В рамках исследований на базе стенда СУРА в последние годы проведена серия новых экспериментов [1-6] с привлечением наземно-космических средств, в частности, российского сегмента МКС. Новизна программы заключалась в поиске резонансных условий для триггерирования мощных природных процессов относительно слабым, но целенаправленным воздействием. Одним из таких природных явлений в ОКП является суббуревая активность. 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 [2-4], что для всех выполненных измерений критическая частота f_0F_2 ионосферного слоя F2 была всегда меньше рабочей частоты мощной радиоволны (реализовывались условия нагрева «на просвет»), и мощным излучением стенда засвечивался весь объем ионосферы по высоте в пределах диаграммы направленности. Частота модуляции была близка к частотам собственных альфвеновских колебаний плазмы магнитной силовой трубки, опирающейся на пятно нагрева в ионосфере.

Установлено [5,6], что для среднеширотного нагревного стенда СУРА возможность «засвечивать» субавроральную ионосферу появляется при аномальном положении экваториальной стенки ГИП (плазмопаузы) вблизи широты 55°-58°. Это явление было обнаружено по данным комплексного эксперимента 2007 г. и детально исследовано с

использованием всех доступных разнородных измерений. Было показано, что в эксперименте 2010 г. обнаруженный эффект «засвечивания» субавроральной ионосферы также был связан с упомянутым выше положением плазмопаузы, т.е. в том же широтном диапазоне. Практически все успешные эксперименты реализуются во время 18-20 UT, когда стенд СУРА приближается максимально к границе плазмосферы и области разрыва Харанга. Судя по данным, полученным высокоапогейным спутником IMAGE [7], именно в этот период хвост (“Tail”) - структурный элемент плазмосферы, попадает в область возможной засветки субавроральной ионосферы стендом СУРА. Плазменный хвост, протянувшийся от основной области плазмосферы, является следствием изменения электрического поля конвекции. Когда интенсивность конвекции уменьшается, плазменный хвост закручивается вокруг основной части плазмосферы вследствие эффекта коротации, который становится преобладающим.

Для выбора условий проведения экспериментов использовались данные по гелио-геомагнитной активности и прогноз орбитальных данных – условий пригодных для наблюдений по горизонту с борта МКС. Необходимым условием для экспериментов является состояние ионосферно - магнитосферного звена, которое определяется уровнем гелио-геомагнитной активности как накануне, так и в момент проведения экспериментов СУРА-МКС. Оптимальное условия для решения задач данной серии экспериментов – это спокойная геомагнитная обстановка. Так как корональные дыры часто "живут" по несколько оборотов Солнца (то есть по несколько месяцев), то производимые ими быстрые потоки солнечного ветра являются стабильными образованиями и возникающие при этом магнитные бури являются повторяющимися с периодом вращения Солнца (27 дней). Это дает возможность прогнозировать такие бури на 27 дней вперед, то есть является основой для долгосрочного прогноза. В связи с этим проведен анализ компонент геомагнитного поля обсерватории ИЗМИРАН за август-сентябрь месяцы для выявления возможных рекуррентных возмущений и показано, что по состоянию на конец августа ожидаемые условия по геомагнитной активности были вполне приемлемые.

Условия и некоторые результаты проведенных экспериментов

Как отмечено выше, эксперименты СУРА-МКС обычно проводятся в режиме нагрева «на просвет» для активации возможно большего объема ионосферы в основании магнитной силовой трубки. Таким образом появляется возможность стимулировать собственные колебания плазмы трубки и проводить поиск резонансных условий для триггерирования суббуревой обстановки с высыпаниями энергичных частиц и авроральными явлениями (свечениями). Рабочая частота стенда выбирается в зависимости от текущего состояния ионосферы, точнее от величины критической частоты основного слоя ионосферы F2. Ранее нами применялся режим нагрева в виде меандра с периодом 120 сек (1 мин – нагрев, 1 мин – пауза).

Новым режимом нагрева явилось использование двухчастотного нагрева со смещением второй частоты относительно основной на выбранную частоту из ОНЧ диапазона длин радиоволн. Это никак не влияло на поиск резонансов, но при этом появляется возможность проверить опыт других исследователей [8] по созданию «небесной антенны» для генерации ОНЧ излучений при работе нагревного стенда.

Исходя из гелио-геофизических условий и согласованных дат и времени работы с космонавтами (средствами МКС) проведены 6 экспериментов (частота нагрева 4,3 МГц). Оптимальное время суток из условий оптических наблюдений средствами МКС - это вечернее время до 22 часов МДВ. По геофизическим условиям из опыта предыдущих экспериментов серии СУРА- МКС это время совпадало с удобным положением сектора разрыва Харанга для успешного решения вопросов

стимулирования суббурь нагревным стендом. Таким образом местное время 20-22 часа являлось оптимальным.

Таблица 1.

Дата (2017) / Поляризация	Время Начала UT	Время конца UT	Частота Δf /ОНЧ, Гц	Мощность 1+2, МВт	Частота f_0F2 , кГц	Высота максимума слоя F2, км
20.09 / «X»	18:00	18:10	10800	27+7	4200	250
	18:10	18:20	13300		Spread F2	
	18:20	18:30	10000			
22.09 / «O»	17:00	17:10	10800	6+18	3300	300
	17:10	17:20	13300		E_s	
	17:20	17:30	10000			
28.09 / «X»	18:20	18:30	10800	6+9	E_s /4300	350
	18:30	18:40	13300		кратники	
29.09 / «X»	17:25	17:35	10800	6+9	4500	250
	17:35	17:45	13300		Spread F2	
02.10 / «X»	18:00	18:10	10800	6+9	E_s /5000	350
	18:10	18:20	13300			
04.10 / «O»	17:55	18:15	-----	50 МВт (4300 кГц)	3000	200
					Spread F2	

В таблице 1 приведены даты и конкретное время реализованных космических экспериментов (КЭ), а также параметры нагрева и слоя F2 ионосферы. Эксперименты 1-2 проведены в спокойных геомагнитных условиях перед серией экспериментов с МКС. Были проверены возможности реализации двухчастотного нагрева. В эксперименте №1 нагрев проводился непрерывно в течении 30 минут. Эксперимент №2 той же длительности проведен в режиме меандра. В обоих экспериментах три интервала по 10 минут отличались второй частотой нагрева сдвинутой относительно основной на соответствующую частоту ОНЧ диапазона (10.8, 13.0 или 14.2 кГц).

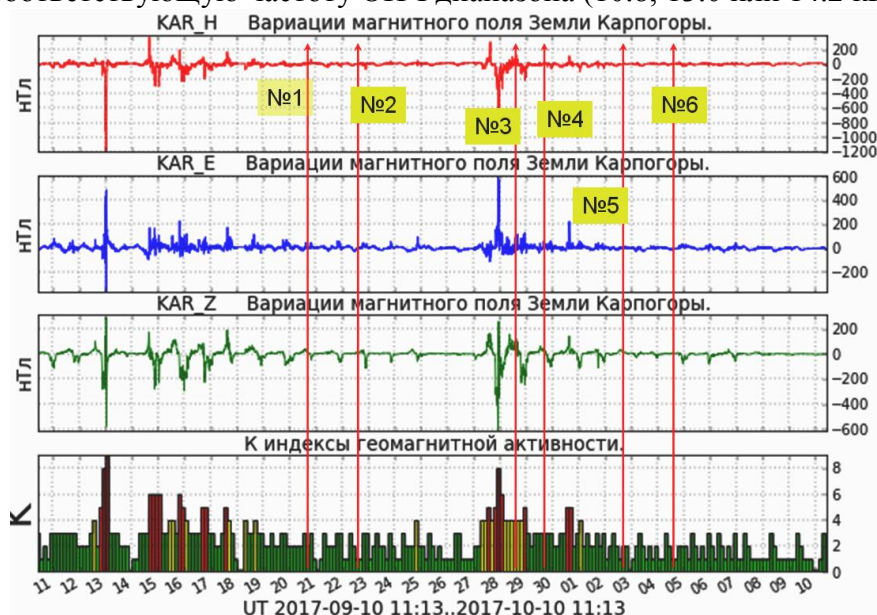


Рис.1. Три компоненты геомагнитного поля по данным обсерватории Карпогоры за месяц.

На рисунке 1 приведена магнитограмма – вариации геомагнитного поля (три компоненты) по данным обсерватории Карпогоры за месяц (с 10.09 по 10.10) с

нанесенными временами проведения 6 экспериментов (вертикальные стрелки). Нижняя панель представляет информацию о геомагнитной активности за указанный период, где К – локальный индекс магнитной активности. Из рисунка видно, что первые два и последние два эксперимента проведены в спокойных геомагнитных условиях (индекс К не превышал 3). Эксперименты №3 и №4 реализованы на фоне магнитной бури на фазе максимума и восстановления.

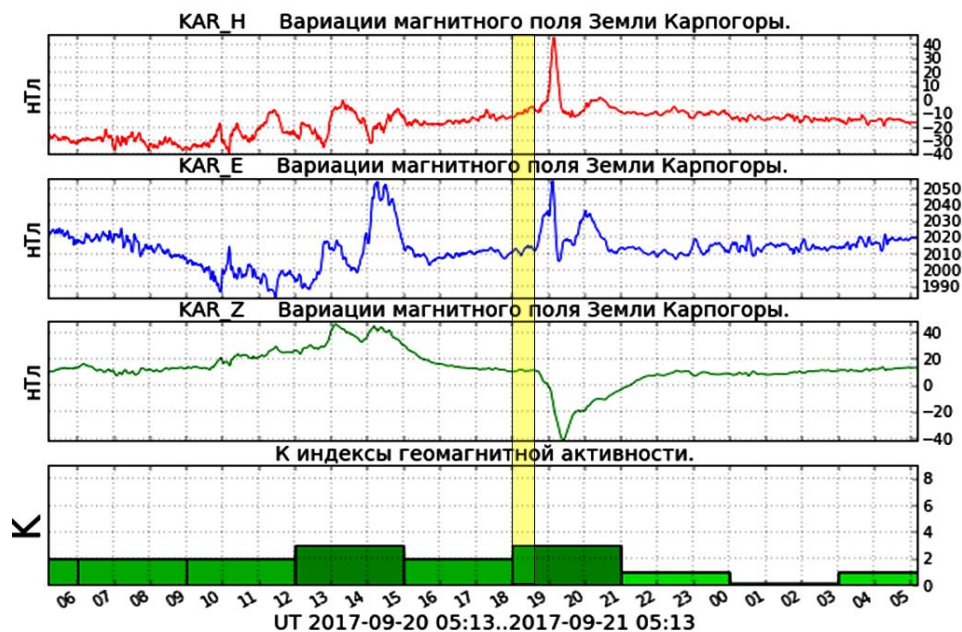


Рис.2. Три компоненты геомагнитного поля и индекс магнитной активности – данные обсерватории Карпогоры 20 сентября 2017 г.

Эксперимент №1. 20.09.2017г.

В результате в эксперименте №1 в магнитном поле зарегистрирована изолированная суббуря, возможно стимулированная работой стенда СУРА. По данным субавроральной обсерватории ИЗМИРАН в Карпогорах (Архангельская область) амплитуда этого возмущения (изолированная суббуря) превышала 50-55 нТл (рисунок 2). Анализ вариаций геомагнитного поля по данным сети Интермагнет показал, что в магнитно-сопряженной области (о. Кергелен) и станции Борок, ближней к области воздействия, амплитуда возмущения практически совпадала – около 50 нТл. На среднеширотной станции Тихани (Венгрия) удаленной почти на 2000 км амплитуда была значительно меньше – около 15 нТл.

Детально вариации горизонтальных компонент геомагнитного поля в течении 5 часов представлены на рисунке 3. Прямоугольником отмечен период работы стенда – 30 минут. Видно, что событие начало развиваться при включении стенда и в дальнейшем его поведение практически повторяет события успешно триггерированных стендом СУРА одиночных суббурь в 2007 и 2010 годах [3,5].

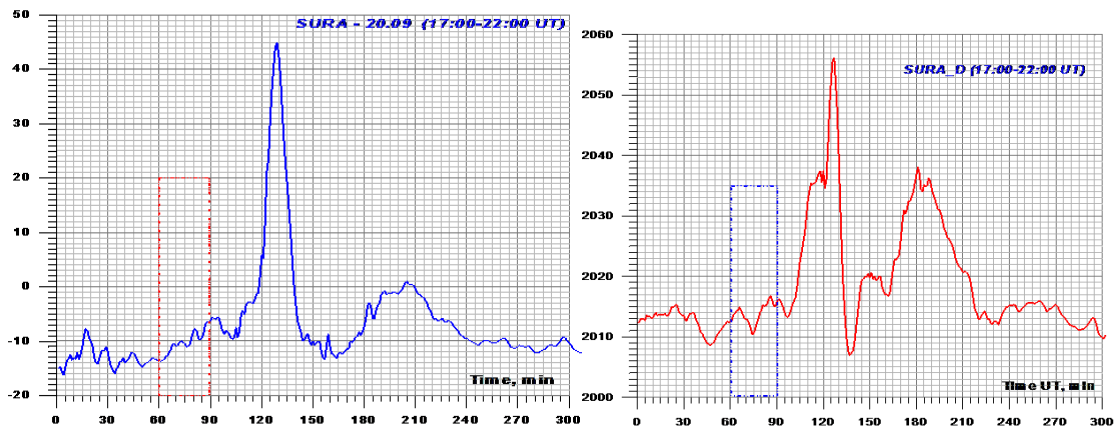


Рис.3. Горизонтальные компоненты геомагнитного поля - данные обсерватории Карпогоры 20 сентября 2017 г.

Эксперимент №2. 22.09.2017г.

По геомагнитным данным 22.09.2017 на спокойном фоне наблюдается возмущение в магнитном поле типа суббури, развивавшееся в процессе нагрева ионосферы. Данная суббуря отличается как по морфологии, так по длительности от триггерированных стендом явлений в 2007 и 2010 годах. Для подтверждения локализации возмущения в зоне воздействия проведен анализ магнитограмм станций сети Интермагнет. Как и в предыдущем эксперименте, локализация этой суббури также совпадает с районом области нагрева. Так, например, в Москве амплитуда вариаций горизонтальных компонент составляла 30-35 гамм, а в Карпогорах составляла 50-80, а вертикальная - 150! Последнее подчеркивает индивидуальность этого события и является показателем локализации возмущения между стендом СУРА и Карпогорами (в Москве это возмущение составляло меньше 10 гамм).

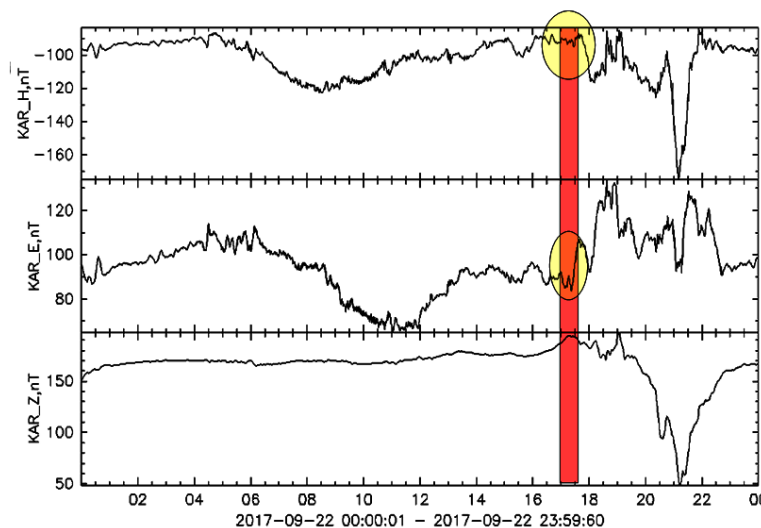


Рис.4. Магнитограмма станции Карпогоры 22.09.2017 . Хорошо видна спокойно-суточная вариация как индикатор геомагнитной активности.

На рисунке 5 приведены фрагменты (см. овалы на Рис.4), где прямоугольником отмечен период работы стенда с периодом 1 минута (20сек+40сек). Стенд работал три промежутка времени А, В и С, отличающиеся второй частотой нагрева. Хорошо видно начало вариации при включении стенда и динамику вариаций при переключении (каждые 10 минут) второй частоты нагрева.

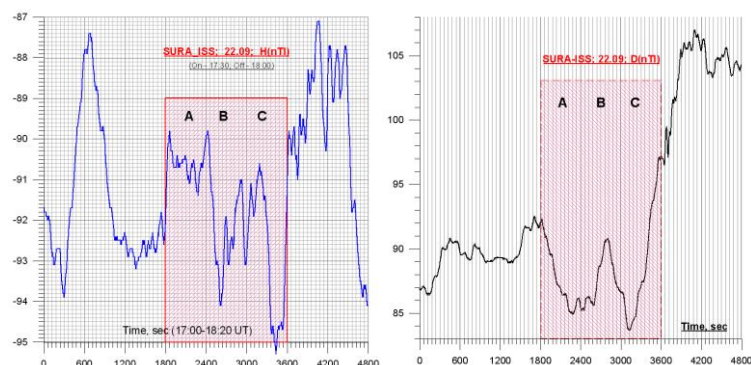


Рис.5. Вариации геомагнитного поля - горизонтальные компоненты (ст. Карпогоры).

Эксперимент №3 и три последующих были сопряжены с работой космонавтов на борту Международной космической станции. Режим работы стенда СУРА – модулированное излучение (период 1 минута) на двух частотах в течении 20 минут (2 сеанса по 10 минут): Х-поляризация, наклон 12° на юг, режим излучения: [+ 20 с, – 40 с]. Отметим, что как следует из рисунка 1, этот эксперимент реализован в течении мощной магнитной бури. Сильная магнитная буря началась 28 сентября 2017 года, из-за вхождения нашей планеты в поток быстрого солнечного ветра. Хотя в течение работы нагревного стенда и видны изменения в магнитном поле, но уверенно и однозначно считать их результатом воздействия нагревного стенда нельзя. По той же причине в экспериментах №4 и №5 также не обнаружены вариации в магнитном поле сопоставимые с программой работы стенда СУРА.

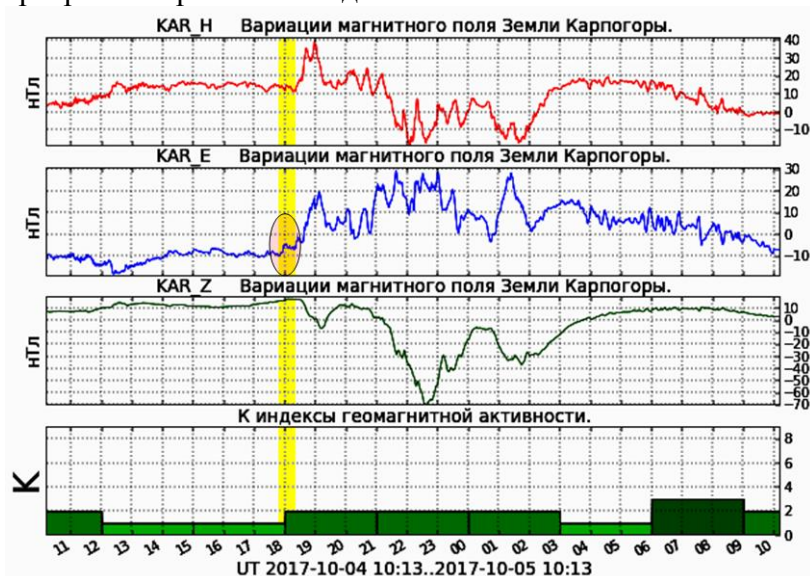


Рис.6. Магнитограмма станции Карпогоры. Видна спокойно-суточная вариация как индикатор геомагнитной активности.

Эксперимент №6. 04.10.2017г.

На рисунке 6 представлена регистрация геомагнитного поля за 04-05.10.2017 г. Цветом отмечен период работы стенда в режиме «1мин+1мин». Горизонтальная шкала - время гринвичского меридиана (UT). Нижняя панель – индекс геомагнитной активности для станции Карпогоры. Видно возмущение магнитного поля амплитудой больше 100 нТл. При этом индекс магнитной активности был не больше 2 (по шкале для положения ст. Карпогоры) в течение нескольких часов до эксперимента и после (по крайней мере, до 9 часов утра МДВ). На фоне спокойной геомагнитной обстановки

зарегистрировано возмущение типа суббури или целого комплекса авроральной активности после работы стенда.

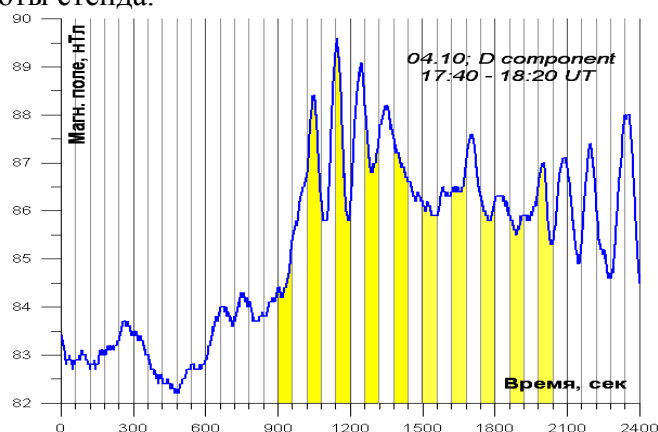


Рис.7. Фрагмент регистрации (40 минут), где цветом отмечены все десять импульсов воздействия на ионосферу программой работы стенда СУРА.

Более детальный анализ показал, что заметные вариации геомагнитного поля начались именно сразу после включения стенда, которые в развитии привели к наблюдавшемуся возмущению геомагнитного поля. На рисунке 7 показан фрагмент (см. овал, E- компонента, Рис.6), где видна явная корреляция наведенной периодичности пульсаций с работой стенда, за которой последовало мощное возмущение - возможно стимулированное нагревным стендом СУРА. Всплески гармоничных пульсаций геомагнитного поля наблюдались на всех трех компонентах синхронно с работой стенда.

Заключение

В ходе серии экспериментов 2017 года были выбраны и успешно реализованы новые режимы нагрева ионосферы. Так, при непрерывном с X – поляризацией двухчастотном нагреве уже в первом эксперименте 20.09 на спокойном геомагнитном фоне наблюдалась одиночная изолированная суббура, идентичная триггерированным ранее суббурям, но полученная в новых условиях. В двух других экспериментах во время нагрева с O-поляризацией начались возмущения, идентифицированные как результат нагрева, которые, развиваясь, по окончанию эксперимента, превратились в возмущение суббурного типа длительностью в несколько часов.

Для выявления корреляции между вариациями геомагнитного поля и циклограммой работы радионагревного стенда проведено детальное сопоставление данных по вариациям геомагнитного поля (обсерваторий ИЗМИРАН и сети Интермагнет) с программой работы стенда в различных режимах и сочетаниях их параметров. Показано наличие пульсаций геомагнитного поля и эффектов суббурь, стимулированных стендом Сура (в соответствии с циклограмм.

Таким образом, в экспериментах 2017 года обнаружены новые эффекты - возмущения параметров ионосферно – магнитосферной системы, которые можно считать результатом активного воздействия КВ излучения стенда СУРА на ионосферу. Указание на возможность управления характеристиками среды повышает актуальность продолжения экспериментов, как для фундаментальных исследований, так и для прикладных целей.

Литература

1. Ружин Ю.Я., Иванов К.Г., Кузнецов В.Д., Петров В. Г. Контролируемая инжекция мощных радиоимпульсов в ионосферно- магнитосферную систему и появление микросуббурь 02/10/2007. //Геомagnetизм и аэрономия. 2009. Т. 49. № 3. С. 703-708.
2. 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.
3. Ruzhin Yu.Ya., Kuznetsov V.D., Karabadzhak G.F., Plastinin Ya.A., Frolov V.L. et al. The ionosphere- magnetosphere excitation in the Sura - ISS HF experiments. //38th COSPAR, 2010, Bremen, Germany, Abstr. С 52-0036-08.
4. Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Ковалёв В.И., Бершадская И.Н., Карабаджак Г.Ф., Пластинин Ю.А., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Парро М. О возможности локализации суббури нагревным стендом «Сура». //Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Том LV. №1-2. С. 94-105.
5. Ружин Ю.Я., В.Д. Кузнецов, Ю.А. Пластинин, Г.Ф. Карабаджак, В.Л. Фролов, М. Парро. Об авроральной активности, вызванной мощным радиоизлучением стенда СУРА. //Геомagnetизм и аэрономия. 2013. Т. 53. № 1. С. 46-52.
6. Kuznetsov, V. D.; Ruzhin, Yu. Ya. Anthropogenic trigger of substorms and energetic particles precipitations. *Advances in Space Research*, 2014, Volume 54, Issue 12, p. 2549-2558.
7. Sandel B.R., Goldstein J., Gallagher D.L., Spasojevic M. Extreme ultraviolet IMAGER observations structure and dynamics of the plasmasphere. *Space Science Reviews* 109: 25–46, 2003.
8. Kuo, S., A. Snyder, P. Kossey, C.-L. Chang, and J. Labenski. Beating HF waves to generate VLF waves in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 117, A03318, doi:10.1029/2011JA017076.