

**ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНЫМ КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СРЕДНЕШИРОТНОГО
НАГРЕВНОГО СТЕНДА «СУРА» НА ЛОКАЛЬНЫЕ ИОНОСФЕРНО-
МАГНИТОСФЕРНЫЕ СВЯЗИ**
**INFLUENCE OF THE HIGH-POWER HIGH-FREQUENCY RADIO EMISSION FROM THE
MID-LATITUDE SURA HEATING FACILITY ON THE LOCAL IONOSPHERE-
MAGNETOSPHERE COUPLING**

А.С. Белов¹, Г.А. Марков¹, В.Л. Фролов², М. Парро³, Б.М. Шевцов⁴, В.В. Бычков⁴

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, alexis-belov@yandex.ru

²Научно-исследовательский радиофизический институт, frov.418@nirfi.sci-nnov.ru

³Environment Physics and Chemistry Laboratory, mparrot@cnr-orleans.fr

⁴Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, bshev@ikir.ru

Studying of the ionosphere-magnetosphere coupling and investigation of the possibility of influence on them by means of existing ground-based radio engineering facilities is a significant problem of the modern geophysics. Realization of such influence is based on the possibility of artificial waveguide channels (density ducts) formation by high-power HF radio emission from the Earth's surface. This density structures profound influence on the ELF/VLF electromagnetic waves excitation and propagation processes in the disturbed magnetic tube. The presented data were obtained on the mid-latitude Sura heating facility during experiment performed in May 12, 2008 at the late evening time. Measurements of electromagnetic and plasma disturbances characteristics at the outer ionosphere heights were carried out by using the onboard equipment of the satellite DEMETER. It is shown that during satellite passage through the magnetic tube resting upon the region of intense generation of artificial ionospheric turbulence are observed the artificial duct formation with increase in the plasma density by approximately 40 %, substantial amplification of electric fields in a range to 400 – 500 Hz and magnetic fields intensity in a range to 200 Hz, and also increase twice (in comparison with background level) in the flow intensity of precipitation electrons with energy 90 – 525 keV. Generation of such low frequencies electromagnetic emissions in the artificial wave channel, and also increase the precipitation of energetic electrons from the radiating belts are the features of maser excitation in the local plasma tube of the magnetospheric resonator.

Изучение электромагнитных и плазменных волновых явлений в ионосферно-магнитосферной системе Земли является значимой задачей в современной физике, актуальность которой возрастает в последнее время в связи с резким и весьма значительным увеличением техногенной электромагнитной нагрузки на ионосферу. Важным достижением последних лет явилась экспериментальная демонстрация возможности создания искусственных плазменных волноводов с помощью контролируемого воздействия на ионосферу мощным КВ радиоизлучением [1, 2], что открывает перспективы активного управляемого воздействия на процессы генерации и распространения электромагнитных излучений в магнитосфере Земли.

Представленные в настоящей работе исследования были проведены на нагревном стенде «Сура» (географические координаты: 56.15° N, 46.11° E), расположенном в 120 км восточнее г. Н. Новгород. Стенд является одной из пяти в мире (и единственной в Российской Федерации) действующих установок для исследования взаимодействия мощного радиоизлучения с околоземной плазмой. Кроме того, стенд «Сура» – это единственная в настоящее время установка, расположенная в средних широтах. Поэтому он обладает рядом преимуществ по сравнению со стендами, расположенных в полярных и авроральных широтах, где непрогнозируемые сильные естественные возмущения ионосферы и магнитосферы Земли приводят к возникновению значительных трудностей при интерпретации наблюдаемых явлений. Регистрация возмущений параметров плазмы, КНЧ и ОНЧ вариаций электромагнитных полей была проведена посредством непосредственных (in situ) измерений с помощью бортовой аппаратуры французского микроспутника DEMETER.

Эксперимент был выполнен 12 мая 2008 г. в поздние вечерние часы, когда траектория ИСЗ DEMETER на высоте ~ 660 км проходила над стендом «Сура» в окрестности возмущенной магнитной силовой трубки. При проведении измерений стенд «Сура» излучал в режиме «несущая» радиоволны О-поляризации на частоте 4300 кГц с эффективной мощностью излучения $P_{\text{eff}} = 80$ МВт. Стенд включался на 15 минут за 11 минут до расчетного времени $T \approx 18:16:28$ UT пролета спутника вблизи оси возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на область с интенсивной искусственной ионосферной турбулентностью, возбуждаемой мощной радиоволной вблизи высоты ее отражения в F_2 -области ионосферы. В этом эксперименте диаграмма

направленности антенны стенда была наклонена на 12° на юг, чтобы усилить генерацию ионосферной турбулентности за счет эффекта «магнитного зенита» [3]. Волна накачки отражалась на высоте ~ 220 км. Критическая частота F_2 -слоя ионосферы f_{0F2} была ~ 5 МГц, но регистрировался полупрозрачный спорадический E -слой с критической частотой до 4.7 МГц. Режим работы стенда был выбран таким образом, чтобы обеспечить условия формирования искусственного плазменно-волнового канала (дакта плотности) на высотах внешней ионосферы Земли [1]. Аппаратура ИСЗ DEMETER функционировала в режиме обзорной (survey) моды с относительно малой скоростью оцифровки данных, позволившей провести их регистрацию на достаточно протяженном временном интервале.

Эксперимент выполнялся в достаточно спокойных геомагнитных условиях ($K_p \approx 1$) и каких-либо заметных геомагнитных возмущений по данным сети станций INTERMAGNET в этот интервал времени не было зафиксировано. Однако в этот день был зарегистрирован повышенный уровень полного электронного содержания (ТЕС) (критический индекс планетарного ионосферно-плазматического шторма [4] $W_p = 4$ был превышен с 16:00 UT и во время эксперимента составлял $W_p = 5.4$). Вероятно, поэтому особенностью данного эксперимента явилось наличие достаточно интенсивного потока энергичных электронов, зарегистрированного аппаратурой ИСЗ на интервале времени от 18:15:42 до 18:17:38 UT в области широт $49^\circ - 60^\circ$ N (см. рис. 2в).

На рис. 1 приведены результаты измерений концентрации электронов и основных ионов O^+ и H^+ плазмы на высотах ~ 660 км, а также измеренной температуры электронов. Время наибольшего сближения спутника с осью возмущенной силовой магнитной трубки выделено на рисунке затемнением. Хорошо видно формирование в данном эксперименте искусственного дакта с возрастанием плотности электронов N_e и ионов N_{O^+} (превалирующих на данных высотах) при уменьшении плотности более легких ионов N_{H^+} и N_{He^+} . В возмущенной магнитной силовой трубке наблюдается также повышение на 20 % температуры электронов. Согласно приведенным данным, характерный поперечный масштаб дакта плотности составлял ~ 80 км.

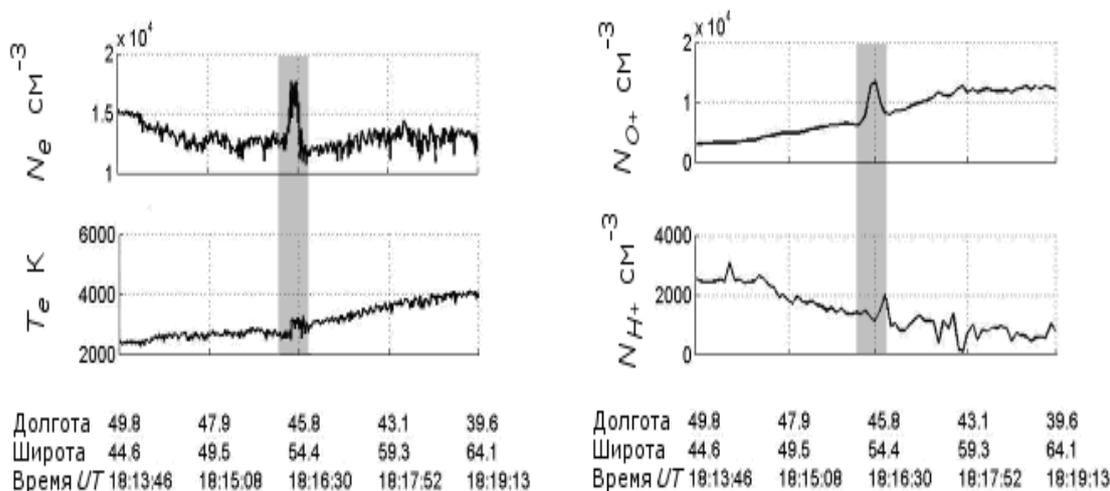


Рис. 1. Результаты измерений концентрации электронов N_e и основных (на высоте орбиты спутника) ионов N_{O^+} и N_{H^+} , а также температуры электронов T_e , выполненных бортовой аппаратурой ИСЗ DEMETER. По горизонтальной оси отложены координаты спутника и всемирное время, соответствующее его положению.

Спектрограммы волновых возмущений электрических и магнитных полей приведены на рис. 2 (панели а и б, соответственно) вместе с графиком зависимости количества J_e высыпающихся энергичных (~ 100 кэВ) электронов (панель в) от времени пролета спутника. Затемненная область, аналогично рис. 1, соответствует времени пролета ИСЗ DEMETER в области возмущенной магнитной силовой трубки. В этой области наблюдается значительное увеличение интенсивности электрических полей в диапазоне до ~ 400 Гц и магнитных полей в диапазоне до ~ 150 Гц. Так как плазменно-волновой канал является открытой системой, то ширина области локализации поля генерируемых мод несколько превышает поперечный масштаб плазменного волновода.

Важным результатом является факт возрастания в два раза (по сравнению с фоновым уровнем) интенсивности потока высыпающихся электронов с энергиями ~ 100 кэВ.

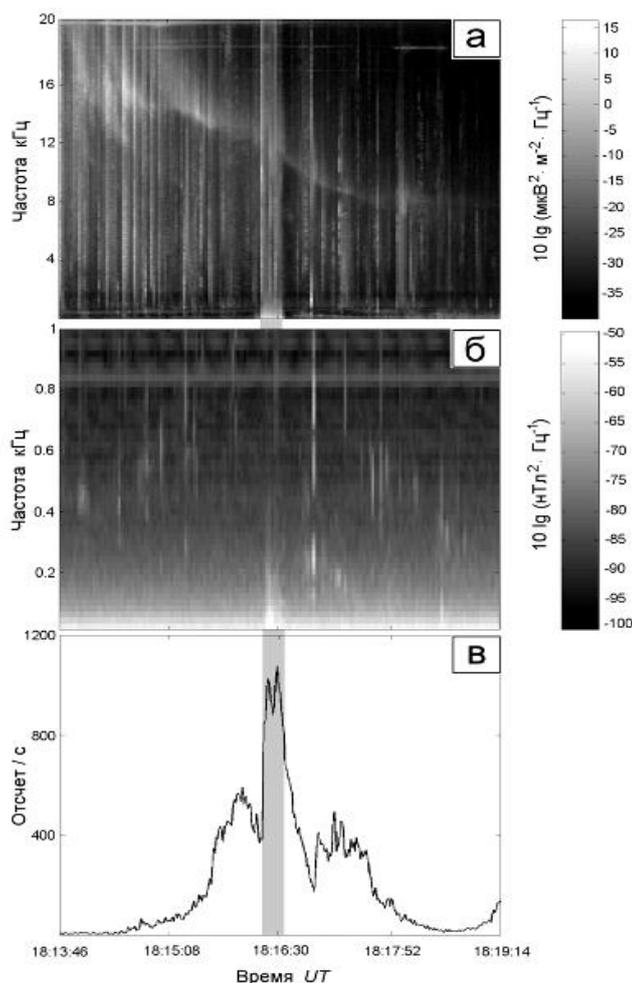


Рис. 2. Спектрограммы волновых возмущений электрических (панель а), магнитных полей (б) и зависимость количества выпадающих энергичных электронов (в) от времени пролета спутника.

Отношение амплитуд магнитной и электрической составляющих излучения позволяет оценить показатель преломления волны $n = B/E$. Для электрических и магнитных полей, показанных на рис. 2, на частотах ниже 100 Гц $n \sim 100$, что доказывает электромагнитную волновую природу создаваемых возмущений.

Формирование в магнитосфере достаточно протяженного дакта плотности, локализирующего волновые поля, уменьшает требования на возбуждающие эти волны токи, так как при этом снижаются потери на излучение через боковые стенки и уменьшается значение нормы волны. В результате имеющихся потоков резонансных электронов может оказаться достаточно для возбуждения магнитосферного мазера в заданной силовой трубке с дактом плотности. Признаками раскочки магнитосферного мазера в проведенном эксперименте является генерация КНЧ и ОНЧ электромагнитных излучений в искусственном волновом канале, а также увеличение в нем потока выпадающих из радиационных поясов энергичных электронов.

Таким образом, при создании искусственных плазменных волноводов с помощью нагрева ионосферы мощным КВ радиоизлучением наземного передатчика имеется возможность контролируемого возбуждения магнитосферного мазера, что открывает перспективы активного управляемого воздействия на локальные ионосферно-магнитосферные связи, процессы генерации и распространения низкочастотных электромагнитных излучений в магнитосфере Земли.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-02-00171-а) и программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № П 1072).

Литература

1. В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Г.П. Комраков и др., Письма в ЖЭТФ 88, 908 (2008).
2. G.M. Milikh, K. Papadopoulos, H. Shroff, Geophys. Res. Lett. 35, L17104 (2008).
3. A.V. Gurevich, K.P. Zybin, H.C. Carlson et al., Phys. Lett. A 305, 264 (2002).
4. T.L. Gulyaeva and I. Stanislavska, Ann. Geophys. 26, 2645 (2008).