

Том II, с. 75–78

УДК: 550.3 + 530.182 + 533.951

ИСКУССТВЕННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТО–СОПРЯЖЕННОЙ ОБЛАСТИ ПРИ СТИМУЛЯЦИИ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ СТЕНДА СУРА

А. О. Рябов¹, В. Л. Фролов^{1,2}

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Б.-Печерская 25/12а, НИРФИ ННГУ

E-mail: RyabovAIOI@yandex.ru

² Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18

Аннотация. На основе результатов экспериментов, выполненных по программе СУРА-DEMETER на нагревном стенде СУРА в 2005–2010 гг., проанализированы свойства высыпаний энергичных электронов в магнито-сопряженной области относительно области, возмущенной стендом СУРА. Рассмотрены искусственные высыпания с энергиями $E \geq 100$ кэВ из радиационного пояса Земли при модификации $F2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами O -поляризации в режиме их непрерывного излучения. Высыпания детектировались с использованием аппаратуры ИСЗ DEMETER. Определены условия, когда наблюдались высыпания и установлены их характерные размеры. Проведено сравнение характеристик искусственных высыпаний в возмущенной области над стендом СУРА и в магнито-сопряженной области.

Ключевые слова: энергичные электроны; высыпания; магнито-сопряженная область

ARTIFICIAL PRECIPITATION OF ENERGETIC ELECTRONS IN THE MAGNETICALLY CONJUGATE REGION DURING STIMULATION OF THE EARTH'S IONOSPHERE POWERFUL HF RADIO WAVES STAND SURA

A. O. Ryabov, V. L. Frolov

Abstract. Based on the results of experiments carried out by the SURA-DEMETER program on the SURA heating stand in 2005–2010, the properties of the precipitation of energetic electrons in the magnetically conjugated region (relative to the region perturbed by the SURA stand) are analyzed. Artificial precipitation with energies $E \geq 100$ keV from the Earth's radiation belt are considered when the $F2$ -region of the ionosphere is modified by high-power HF radio waves of O -polarization in the mode of their continuous radiation. Precipitation are detected using the equipment of the satellite DEMETER. The conditions when precipitation were observed and their characteristic sizes were determined. Comparison of characteristics of artificial precipitation in the disturbed region above SURA and stand in magneto-conjugate region are made.

Keywords: energetic electrons; precipitation; magneto-conjugate region

Введение

Возмущение верхней ионосферы мощными КВ радиоволнами O -поляризации приводит к развитию в ней разного рода нелинейных явлений и плазменных неустойчивостей. Это вызывает генерацию вблизи высоты отражения мощной радиоволны высокочастотной и низкочастотной плазменной турбулентности. Как результат, в этой области наблюдается сильный разогрев плазмы, ускорение электронов до сверхтепловых энергий, генерация электрических полей и токов, изменение формы профиля плазмы и др., что также приводит к модификации ионосферно-магнитосферных связей.

Одной из интересных задач, связанных с модификацией $F2$ -области ионосферы, является анализ характеристик ионосферы в магнито-сопряженной области относительно области, возмущенной наземными передатчиками. Наиболее результативными были исследования, проведенные в 2004 году с помощью комплекса HAARP [1]. В рамках исследований были зафиксированы

случаи увеличения потоков электронов с энергиями $E \geq 40$ кэВ над магнито-сопряженной областью относительно комплекса. Стоит отметить, что в рамках данных экспериментов частота волны накачки варьировалась от 3.25 до 5.8 МГц, а мощность составляла 960 МВт, что примерно на порядок превосходит мощности волны накачки, излучаемой стендом СУРА.

В рамках данной работы демонстрируются результаты исследований по стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами O -поляризации, излучаемыми стендом СУРА [2], и влияние этих электронов на нижние слои ионосферы. Эти исследования основаны на выполненных в 2005–2010 гг. экспериментах по программе СУРА-DEMETER.

Инструментом для детектирования энергичных электронов в данных экспериментах являлся спектрометр IDP, расположенный на борту ИСЗ DEMETER, диапазон работы которого от 70 кэВ до 2.5 МэВ с разрешением 1 с при его включении в режиме burst mode [3]. Особенностью размещения этого прибора на корпусе ИСЗ являлось то, что он детектировал потоки электронов, ориентированные близко к ортогональному относительно плоскости его орбиты направлению (с питч углами, лежащими в области $90^\circ \pm 16^\circ$ по отношению к направлению геомагнитного поля) и не регистрировал электроны, которые двигались в направлении, близком к направлению геомагнитного поля.

При проведении экспериментов по генерации высыпаний в магнито-сопряженной области (МСО) использовались различные временные режимы по нагреву возмущенной области (ВО), однако обычно нагрев длился 30–45 минут, и включался за 25–40 минут до пролета ИСЗ над стендом через возмущенную магнитную силовую трубку, опирающуюся на область с сильно развитой турбулентностью вблизи высоты отражения волны накачки (ВН). Эти условия сильно отличались от экспериментов, где целью была модификация верхней ионосферы непосредственно над стендом, когда время нагрева составляло около 15 минут. Подобные временные режимы были опытно установлены в ходе экспериментов, и было обнаружено, что для создания заметных возмущений в МСО необходима значительно более длительная стимуляция ионосферы мощными КВ радиоволнами, чем в случае нагрева области над самим стендом.

Важным вопросом, связанным с анализом проведенных экспериментов, являлось определение местонахождения МСО. Существуют разные модели расчетов магнито-сопряженных точек (ИЗМИРАН, ИКИ, NASA). Для области, возмущенной радиоизлучением стенда СУРА, магнито-сопряженной является область с центром в точке с координатами 40.50° ю. ш., 61.50° в. д.

Выполненные эксперименты и полученные в них результаты

1. Высыпания в магнито-сопряженной области в естественных условиях

Для более результативного анализа высыпаний высокоэнергичных высыпаний в сопряженной точке, вызванного стимуляцией КВ радиоволнами, вначале рассмотрим случай естественных высыпаний в МСО, когда стенд СУРА не работал. В случаях повышенной геомагнитной активности ($AE \geq 400$ нТ) наблюдаются заметные высыпания с энергиями $E \geq 250$ кэВ и потоками $F \geq 10$ эл/ (см² · с · стер · кэВ) (далее будем записывать величину потока сокращенно как $F \geq 10$). В случаях же более спокойных геомагнитных условий ($AE \leq 400$ нТ) заметных высыпаний в МСО не наблюдается.

2. Характеристики искусственных высыпаний в магнито-сопряженной точке

Проведенные сеансы возбуждения верхней ионосферы стендом СУРА позволяют заключить, что стимулированные модификацией ионосферы искусственные высыпания энергичных электронов в магнито-сопряженной области не регистрировались, когда не выполнялись условия генерации интенсивных плазменных возмущений вблизи высоты отражения ВН:

- когда $f_{ВН} \geq f_o F2$;
- когда частота ВН была более чем на 1 МГц ниже $f_o F2$;
- при низких мощностях ВН $P_{эфф} \leq 40$ МВт;
- при коротких временах нагрева;
- при наличии спорадического E -слоя, экранирующего $F2$ -область ионосферы.

Эти требования полностью соответствуют условиям генерации интенсивной искусственной ионосферной турбулентности [2], однако их выполнение не является достаточным для стимуляции искусственных высыпаний, например, когда геомагнитные условия перед измерениями оставались длительное время спокойными и в радиационном поясе отсутствовали энергичные электроны.

Примеры искусственных высыпаний в МСО приведены слева на рис. 1. На панели показаны высыпания в случае работы стенда СУРА (сеанс за 19.05.2008) и можно наблюдать высокие значения энергии $E \geq 250$ кэВ и потока $F \geq 10$. Черным треугольником обозначен центр МСО. В представленном сеансе были достаточно большие значения геомагнитной активности ($AE = 400$ нТ). На панели справа представлен сеанс за 18.02.2010, когда стенд СУРА не работал, и были спокойные геомагнитные условия ($AE = 30$ нТ), следствием чего является значительно менее интенсивные высыпания энергичных частиц. На правой панели можно отметить характерный провал с центром в точке с широтой 50°). Стоит отметить, что приведенные результаты являются характерными и повторялись во многих сеансах.

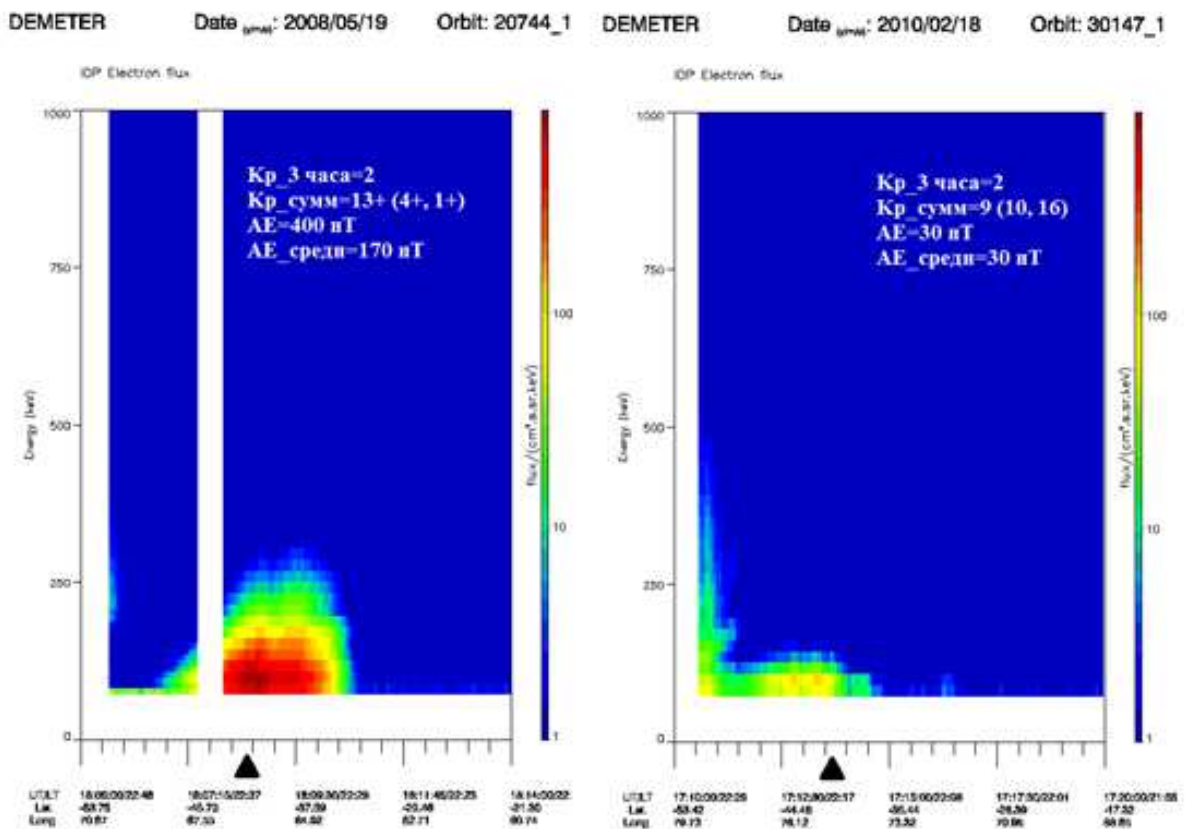


Рис. 1. Графики высыпаний во время сеансов пролета спутника над МСО: слева — сеанс за 19.05.2008 (СУРА работала), справа — сеанс за 18.02.2010 (СУРА не работала).

На основании проведенных экспериментов можно сформулировать критерии искусственно-го характера высыпаний высокоэнергичных электронов в МСО из радиационного пояса Земли, вызванного стимуляцией ионосферы мощными КВ радиоволнами. Итак, эти критерии:

- энергия высыпающихся электронов составляет $E \geq 250$ кэВ, а потоки $F \geq 10$, даже в случаях относительно спокойных геомагнитных условий;
- максимум интенсивности высыпаний наблюдается в центре МСО, то есть внутри возмущённой магнитной силовой трубки;

- наблюдается характерный провал высыпаний между авроральной областью и центром МСО (\sim от 46° до 53° южной широты);
- высыпания наблюдаются, когда эффективная мощность излучения ВН превышает 40 МВт и имеет место эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой F^2 -слоя ионосферы.

Выполненные исследования позволили установить, что зона стимулированных модификацией ионосферы высыпаний энергичных электронов в магнитно-сопряженной области может иметь пространственные размеры до 1450 км вдоль геомагнитного меридиана и до 500 км поперёк его с большей её протяжённостью на юг от МСО.

Стоит отметить, что в сравнении с экспериментами по стимуляции высыпаний энергичных электронов в области над стендом СУРА с экспериментами, посвященным высыпаниям в МСО, во втором случае наблюдается значительно больший разброс, как в значениях энергий, так и в значениях потоков: больше доля и очень результативных сеансов ($E \geq 300$ кэВ, $F \geq 50$), и неудачных, когда высыпания не отличаются от естественного уровня. Таким образом, стимуляция высыпаний энергичных электронов в МСО носит более непредсказуемый характер. В то же время, средние значения энергий и потоков в двух рассматриваемых случаях оказываются практически одинаковыми.

Заключение

Выполненные исследования показали, что искусственные высыпания энергичных электронов в ионосферу в магнито-сопряженной области появляются через 25–30 мин после включения ВН. Величина потоков энергичных электронов с $E \geq 100$ кэВ в среднем составляет $F \approx 20\text{--}100 \text{эл}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{кэВ})$, что в несколько раз превосходит значения этих величин в естественных условиях. Область высыпаний вдоль геомагнитного меридиана имеет размеры до 1150 км к югу от МСО и 300 км на север; размер области высыпаний в ортогональном к меридиану направлении может составлять до 500 км. В сравнении с высыпаниями в возмущенной области в случаях высыпаний в МСО значения энергии и потоков имеют больший разброс, что объясняется непредсказуемостью стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли в МСО. Интересным представляется, что значения энергии и потоков в наиболее результативные сеансы превосходят случаи высыпаний над стендом.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (грант № 3.1844.2017/4.6). Исследования Рябова А.О. выполнялись при поддержке РФФИ (грант № 17-05-00475).

Список литературы

1. Inan U. S., Golkowski M., Carpenter D. L., Reddell N., Moore R. C., Bell T. F. Paschal E., Kossey P., Kennedy E. and Meth S. Z. Multi-hop whistler-mode ELF/VLF signals and triggered emissions excited by the HAARP HF heater // *Geophys. Res. Letters*, 2004, V. 31, L24805.
2. Давыдов В.Е., Зинкина М.Д., Писанко Ю.В. Наблюдения с борта ИСЗ «Метеор-3м №1» высыпаний резонансных электронов из внешнего радиационного пояса во время эксперимента по нагреву ионосферы 19.04.2004-26.04.2004. // *Гелиогеофизические исследования*, 2015. Вып. 12, с. 11-20.
3. Белов А.С., Марков Г.А., Рябов А.О., Парро М. Возмущение ионосферно-магнитосферных связей мощным ОНЧ-излучением наземных передатчиков. *ЖЭТФ*, 2012. Том 142, вып. 6 (12).
C. Sauvaud J.A., Moreau T., Maggiolo R., et al. High-energy electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer, description and first results on the inner belt. // *Planetary and Space Science*, 2006. Vol. 54, No. 5, pp. 502-511.