

ИСКУССТВЕННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В МАГНИТО-СОПРЯЖЕННОЙ ОБЛАСТИ ПРИ СТИМУЛЯЦИИ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МОЩНЫМИ КВ-РАДИОВОЛНАМИ СТЕНДА «СУРА»

А.О. Рябов, В.Л. Фролов

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
RyabovAIOI@yandex.ru

ARTIFICIAL PRECIPITATION OF HIGH-ENERGY ELECTRONS IN THE MAGNETICALLY CONJUGATE REGION WHEN STIMULATING EARTH'S IONOSPHERE BY POWERFUL HF RADIO WAVES FROM THE SURА HEATING FACILITY

A.O. Ryabov, V.L. Frolov

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
RyabovAIOI@yandex.ru

Аннотация. На основе результатов экспериментов, выполненных по программе СУРА-DEMETER на нагревном стенде СУРА в 2005–2010 гг., проанализированы свойства выпадений энергичных электронов в магнито-сопряженной области относительно области, возмущенной стендом СУРА.

Ключевые слова: энергичные электроны; выпадения; магнито-сопряженная область.

Abstract. Based on the results of experiments carried out by the SURА-DEMETER program on the SURА 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 SURА stand) are analyzed.

Keywords: energetic electrons; precipitation; magneto-conjugate region

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие на верхнюю ионосферу мощными КВ-радиоволнами О-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. В итоге, 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.

Важной задачей, связанной с модификацией F_2 -области ионосферы, является анализ характеристик ионосферы в магнито-сопряженной области относительно области, возмущенной наземными передатчиками. Наиболее результативными были исследования, проведенные в 2004 г. с помощью комплекса HAARP [Inan et al., 2004]. В рамках исследований были зафиксированы случаи увеличения потоков электронов с энергиями $E \geq 30$ кэВ над магнито-сопряженной областью относительно комплекса.

В настоящей работе демонстрируются результаты исследований по стимуляции выпадений энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации среднеширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами О-поляризации, излучаемыми стендом СУРА [Давыдов и др., 2015], 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 1с при его включении в режиме burst mode [Sauvaud et al., 2006].

При проведении экспериментов по генерации выпадений в магнито-сопряженной области (МСО) использовались различные временные режимы по нагреву возмущенной области (ВО), однако обычно нагрев длился 30–45 мин, и включался за 25–40 мин 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 мин. 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 40.5° S, 61.5° E.

ВЫПОЛНЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ В НИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью более эффективного анализа выпадений высокоэнергичных выпадений в сопряженной точке, вызванного стимуляцией КВ-радиоволнами, вначале

рассмотрим случай естественных высыпаний в МСО, когда стэнд СУРА не работал. В случаях повышенной геомагнитной активности ($AE \geq 400$ нТл) 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 ($AE \leq 400$ нТл) заметных высыпаний в МСО не наблюдается.

Проведенные сеансы возбуждения верхней ионосферы стэндом 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:

- а) когда $f_{ВН} \geq f_{OF2}$;
- б) когда частота ВН была более чем на 1 МГц ниже f_{OF2} ;
- в) при низких мощностях ВН $P_{эфф} \leq 40$ МВт;
- г) при коротких временах нагрева;
- д) при наличии спорадического E-слоя, экранирующего F_2 -область ионосферы.

Эти требования полностью соответствуют условиям генерации интенсивной искусственной ионосферной турбулентности [Давыдов и др., 2015], 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 рисунке. На панели показаны высыпания в случае работы стэнда 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 ($AE = 400$ нТл). На панели справа представлен сеанс за 18.02.2010, когда стэнд СУРА не работал, и были спокойные геомагнитные условия ($AE = 30$ нТл), 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.

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

- а) энергия высыпающихся электронов составляет $E \geq 250$ кэВ, а потоки $F \geq 10$, даже в случаях относительно спокойных геомагнитных условий;
- б) максимум интенсивности высыпаний наблюдается в центре МСО, то есть внутри возмущенной магнитной силовой трубки;
- в) наблюдается характерный провал высыпаний между авроральной областью и центром МСО (\sim от 46° до 53° S);

DEMETER Date gymluj: 2008/05/19 Orbit: 20744_1

DEMETER Date gymluj: 2010/02/18 Orbit: 30147_1

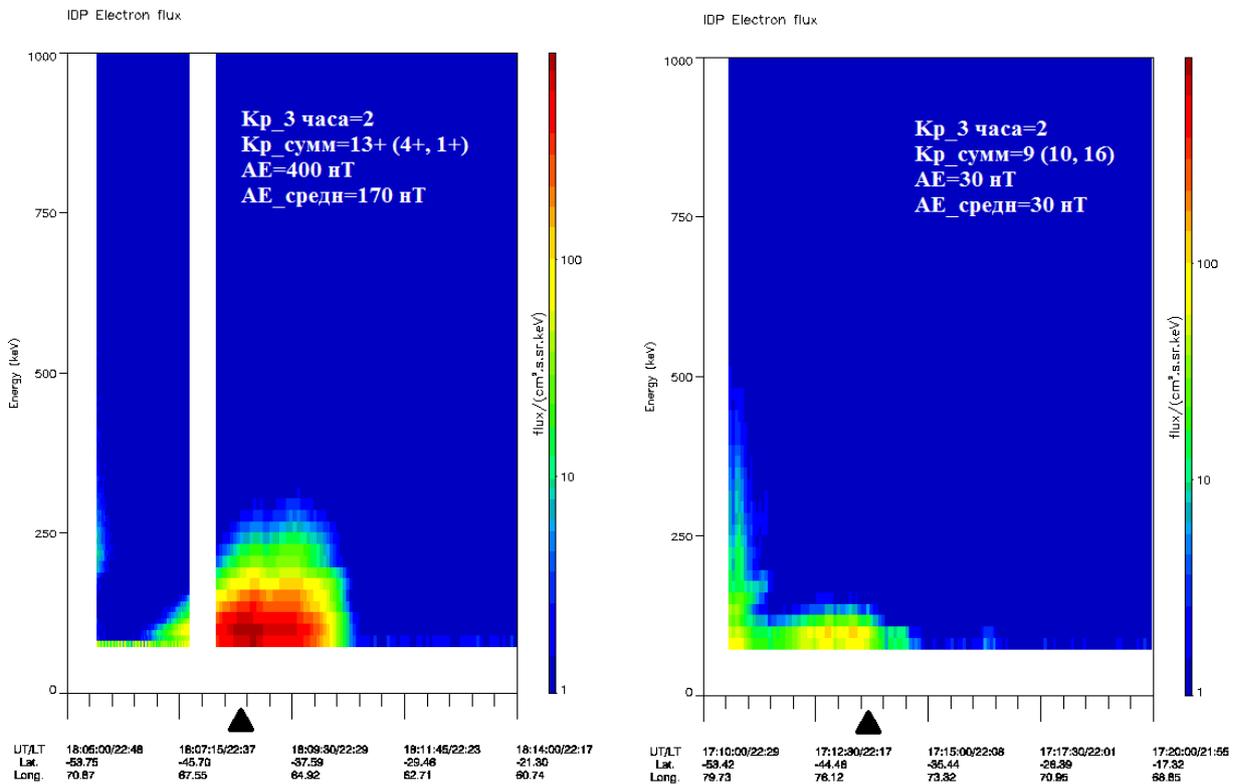


Рис. 1. Графики высыпаний во время сеансов пролета спутника над МСО: слева — сеанс за 19.05.2008 (СУРА работала), справа — сеанс за 18.02.2010 (СУРА не работала)

г) 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 магнито-сопряженной области может иметь пространственные размеры до 1450 км вдоль геомагнитного меридиана и до 500 км поперек его с большей ее протяженностью на юг от МСО.

Добавим, 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

Проведенные 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 $F \approx 20\text{--}100$ эл/(см²·с·стер·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.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (грант № 3.1844.2017/4.6). Исследования Рябова А.О. выполнялись при поддержке РФФИ (грант № 19-52-15007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Inan U.S., Golkowski M., Carpenter D.L., et al. Multi-hop whistler-mode ELF/VLF signals and triggered emissions excited by the HAARP HF heater // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L24805.

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.

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 Space Sci.* 2006. V. 54, N 5. P. 502–511.