

Том II, с. 96–99

УДК: 550.3 + 530.182 + 533.951

ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА

В. Л. Фролов^{1,2}, И. А. Болотин¹, А. О. Рябов¹, А. Д. Акчурин²

¹Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Б.-Печерская 25/12а

E-mail: frolov@nirfi.unn.ru

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

E-mail: Adel.Akchurin@kpfu.ru

Аннотация. Проанализированы свойства высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации $F2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами. Определены условия появления высыпаний. Установлено, что область высыпаний вытянута вдоль геомагнитного меридиана на расстояние до 1100 км; размеры области в поперечном направлении составляют до 400 км. Предполагается, что механизм стимуляции высыпаний определяется взаимодействием энергичных электронов с ОНЧ излучениями, которые генерируются в области взаимодействия волны накачки с плазмой через возбуждение нижнегибридных плазменных колебаний и их рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях плотности плазмы.

Ключевые слова: энергичные электроны; плазменные волны; модификация ионосферной плазмы мощными радиоволнами; взаимодействие электромагнитных волн с плазмой

PRECIPITATION OF ENERGETIC ELECTROS FROM THE EARTH' RADIATION BELT BY THE MODIFICATION OF THE IONOSPHERE USING POWERFUL RADIO WAVES RADIATED BY THE SURA HEATING FACILITY

V. L. Frolov, I. A. Bolotin, O. A. Ryabov, A. D. Akchurin

Abstract. Features of energetic electrons, precipitated from a Earth's radiation belt due to ionosphere $F2$ region modification by means of powerful radio waves radiated by the SURA heating facility, have been analyzed. The conditions for the appearance of such precipitations were determined. It has been established that the precipitation region is elongated along the geomagnetic meridian to a distance of up to 1100 km; dimension of the region in the transverse direction is up to 400 km. It is assumed that the mechanism of stimulation of precipitation is determined by the interaction of energetic electrons with VLF electromagnetic waves, which are generated in the region of interaction of the pump wave with ionospheric plasma by means of excitation of lower hybrid plasma oscillations and their scattering from small-scale plasma density irregularities.

Keywords: energetic electrons; plasma waves; modification of the ionosphere plasma by powerful radio waves; interaction of electromagnetic waves with plasma

Введение

Модификация $F2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной поляризации приводит к развитию в ней разного рода нелинейных явлений и плазменных неустойчивостей. Это вызывает генерацию вблизи высоты отражения волны накачки (ВН) высокочастотной и низкочастотной плазменной турбулентности, сильный разогрев плазмы, ускорение электронов до сверхтепловых энергий, генерация электрических полей и токов, изменение формы профиля плазмы и др. Также это приводит к модификации ионосферно-магнитосферных связей, вызывающая высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли. Первые результаты, прямо подтверждающие возможность стимуляции высыпаний энергичных электронов с энергиями $E \approx 100$ кэВ в среднеширотной ионосфере, были получены на стенде СУРА во время эксперимента, выполненного 12 мая 2008 г. [1]. В докладе представлены результаты исследований по стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации

среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами O -поляризации, непрерывно излучаемыми станцией СУРА, и влияние этих электронов на нижние слои ионосферы. Эти исследования основаны на выполненных в 2005–2010 гг. экспериментах по программе СУРА-DEMETER [2]. Модификация ионосферы выполнялась с помощью нагревного стенда СУРА, данные об энергичных электронах получались с помощью спектрометра IDP, установленного на борту французского ИСЗ DEMETER, который мог измерять энергию и поток электронов в диапазоне энергий 70 кэВ – 2.5 МэВ.

Выполненные эксперименты и полученные в них результаты

I. Характеристики естественных высыпаний на долготе стенда СУРА.

Для разделения искусственных и естественных высыпаний энергичных электронов вблизи стенда СУРА были отобраны и проанализированы результаты измерений потоков энергичных электронов в условиях отсутствия воздействия мощным КВ радиоизлучением на $F2$ -область ионосферы. Это позволило установить, что высыпания энергичных электронов вблизи стенда СУРА (широта на высоте измерений ~ 660 км составляет 54.6°N) регистрируются при повышенной геомагнитной активности с индексом $AE \geq 500$ нТ и не опускается ниже широт $62\text{--}65^\circ\text{N}$ при низком уровне активности с $AE \leq 200$ нТ.

II. Характеристики искусственных высыпаний на средних широтах.

Выполненные эксперименты позволяют заключить, что стимулированные модификацией ионосферы искусственные высыпания энергичных электронов не регистрировались, когда не выполнялись условия генерации интенсивных плазменных возмущений вблизи высоты отражения ВН (это: при нагреве «на просвет» или даже в условиях $f_{\text{ВН}} \cong f_oF2$, на частоте ВН более чем на 1 МГц ниже f_oF2 , при низких мощностях ВН $P_{\text{эфф}} \leq 40$ МВт, при коротких (несколько минут) временах нагрева, при наличии спорадического E -слоя, экранирующего $F2$ -область ионосферы). Эти условия полностью соответствуют требованиям генерации интенсивной

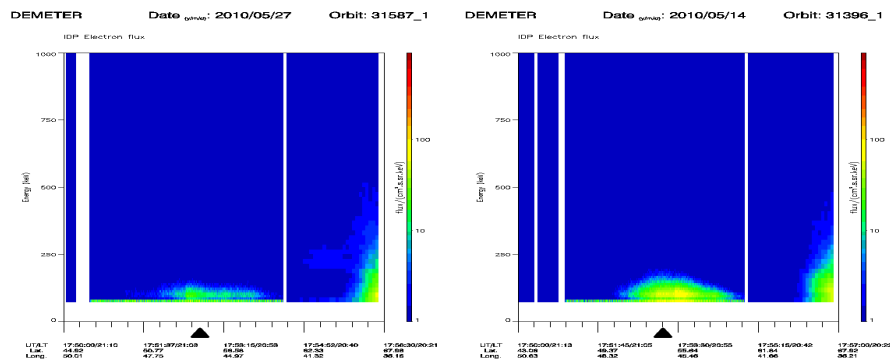


Рис. 1. Спектральные характеристики высыпающих энергичных электронов в присутствии дакта плотности плазмы (панель слева) и при его отсутствии (панель справа).

искусственной ионосферной турбулентности и генерации дактов с повышенной плотностью плазмы на высотах внешней ионосферы [2], хотя выполнение этих условий 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 приведены на рис. 1, где на панели слева показаны высыпания в присутствии дакта с увеличенной плотностью плазмы, а на панели справа — интенсивные высыпания, когда дакт плотности не регистрировался. Видно, что присутствие дакта приводит к увеличению как энергии высыпающих электронов, так и их потока.

Результаты выполненных измерений позволяют сформулировать признаки искусственного характера высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли, наблюдающихся при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами в поздние вечерние и предполуночные

ные часы. Это: 1) максимум интенсивности высыпаний наблюдается внутри возмущённой магнитной силовой трубки (особенно при наличии дакта с увеличенной плотностью плазмы) или вблизи неё; 2) в плоскости геомагнитного меридиана интенсивность высыпаний плавно уменьшается в направлении к северу, простираясь до области авроральных широт, и значительно более резко к югу; 3) энергия высыпающихся электронов в среднем составляет ~ 100 кэВ; 4) 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 имеет пространственные размеры ~ 1100 км вдоль геомагнитного меридиана до 400 км поперёк его с большей её протяжённостью на север от станда.

III. Ионизация ионосферной плазмы энергичными электронами.

Представленные в докладе результаты ясно демонстрируют, что модификация среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами в поздние вечерние и предполуночные часы в определённых условиях стимулирует интенсивные высыпания электронов с энергиями $E \approx 100$ кэВ из радиационного пояса Земли в большой зоне пространства около нагревного станда. Такие электроны способны вызывать дополнительную ионизацию плазмы на высотах её D - и E -областей ($h \approx 70$ – 130 км), что приводит к увеличению поглощения радиоволн на этих высотах. Изменение величины поглощения достаточно легко детектируется в экспериментах и может служить диагностическим признаком появления высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли. Ясно, что в отличие от спутниковых измерений, регистрация этого эффекта позволяет получить информацию об условиях появления высыпаний, характерных временах их роста и исчезновения и, следовательно, давать важные сведения о его природе.

Регистрация влияния стимулированных работой станда СУРА высыпаний на характеристики ионосферы была выполнена с помощью ионосферной станции вертикального зондирования, расположенной вблизи г. Казани на расстоянии 170 км от станда. Этот ионозонд имеет возможность получать ионограммы с периодичностью 1 мин. К сожалению, во время миссии ИСЗ DEMETER ионозонд в режиме 1 ионограмма в минуту не работал. Поэтому для демонстрации наблюдаемых вариаций характеристик ионограмм были взяты результаты экспериментов 19–28 марта 2014 г., когда измерения проводились в спокойных геомагнитных условиях в вечернее и предполуночное время суток, хорошо отвечающих условиям проведения экспериментов с ИСЗ DEMETER. На рис. 2 представлены результаты измерений интенсивности (I) отражённого от ионосферы сигнала ионозонда для X -моды зондирования на частоте ~ 1.7 МГц. Эксперимент выполнялся 24 марта 2014 г. с 19:58 мск до 20:57 мск. На рисунке показаны изменения I в течении двух циклов излучения ВН в режиме [15 мин — излучение, 15 мин — пауза] с интервалами нагрева 19:58–20:13 мск и 20:28–20:43 мск. Для этих измерений время $T = 19:58$ мск соответствует первому включению станда СУРА после длительного перерыва в его работе и отвечает времени $t = 0$ на рис. 2.

Из представленных на рис. 2 данных можно заключить, что характер изменения интенсивности зондирующего сигнала существенно зависит от предыстории модификации ионосферы:

- в первом импульсе нагрева после длительной паузы подавление интенсивности зондирующего сигнала появляется только через 12 мин после включения ВН, однако оно начинает развиваться практически сразу после включения второго её импульса;

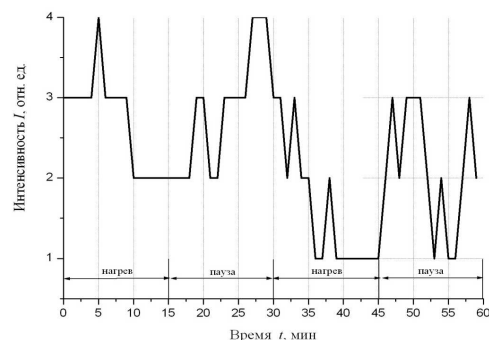


Рис. 2. Вариации интенсивности отражённого от ионосферы зондирующего сигнала ионозонда для X -моды зондирования на частоте ~ 1.7 МГц, зарегистрированные в двух первых циклах излучения ВН в режиме [15 мин — излучение, 15 мин — пауза].

- уменьшение интенсивности отражённого от ионосферы сигнала во время первого импульса заметно меньше, чем во время второго его включения;
- после первого импульса ВН восстановление интенсивности сигнала длилось около 5–10 мин и составляло только 2–4 мин для её второго импульса.

По другим результатам этой серии измерений можно заключить, что для 3-его, 4-ого и следующих импульсов включения мощной радиоволны такая чёткая корреляция подавления интенсивности зондирующего сигнала с включением мощной радиоволны чаще всего нарушается: сигнал мог иметь малую интенсивность или, наоборот, свой максимум как во время излучения мощной радиоволны, так и во время паузы нагрева. Это указывает на существование эффекта накопления от разных циклов воздействия, которое особенно сильно проявляется при коротких временах излучения ВН и временах паузы. Поэтому для подобного рода исследований пауза в 15 мин между импульсами излучения ВН может оказаться слишком короткой, чтобы избежать сложения эффектов последствия и накопления.

Заключение

Выполненные исследования показали, что искусственные высыпания энергичных электронов в ионосферу появляются через 5–10 мин после включения ВН и исчезают через 5–15 мин после её выключения, где большие времена отвечают условию «холодного старта» начала нагрева плазмы после длительной паузы её излучения. Величина потоков энергичных электронов с $E \approx 100$ кэВ в среднем составляет $F \approx 10\text{--}100$ эл/ (см² · с · стер · кэВ). Область высыпаний вдоль геомагнитного меридиана имеет размеры до 900 км к северу от стенда и до 400 км к югу от него; размер области высыпаний в ортогональном к меридиану направлении может составлять до 400 км. Полученные экспериментальные данные позволяют оценить полную мощность, вносимую высыпающимися электронами в ионосферу как (60–600) кВт, что сравнимо или даже несколько больше мощности, генерируемой передатчиками нагревного стенда.

Считается, что эффективным механизмом стимулирования высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли является их взаимодействие с ОНЧ радиоволнами (вистлерами). В случае излучения ВН в режиме «несущая», как в нашем случае, механизм генерации ОНЧ волн может быть следующим. Согласно [3], в области взаимодействия ВН с плазмой генерируются нижнегибридные волны. Рассеиваясь на мелкомасштабных неоднородностях, они могут трансформироваться в ОНЧ волны, занимающих диапазон частот от нескольких килогерц до 15–20 кГц, которые покидают область резонансного взаимодействия ВН с плазмой и вдоль силовых линий геомагнитного поля уходят в магнитосферу.

Благодарности

Исследования Фролова В. Л. выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки (грант № 3.1844.2017/4.6). Исследования Болотина И. А. выполнялись при поддержке РФФИ (грант № 17-05-00475). Исследования Рябова А. О. выполнялись при поддержке РФФИ (грант № 19-52-15007). Работа в части использования ионозонда «Циклон» выполнялась Акчуриным А. Д. и Фроловым В. Л. за счёт средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки КФУ в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Список литературы

1. Марков Г. А., Белов А. С., Фролов В. Л. и др. Возбуждение магнитосферного мазера воздействием на ионосферу Земли мощным КВ-радиоизлучением наземного передатчика // ЖЭТФ. — 2010. — Т. 138, вып. 6(12). — С. 1037–1042.
2. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F2-области мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. — 2016. — Т. 59, № 3. — С. 198–222.
3. Vartanyan A., Milikh G. M., Eliasson B. et al. Generation of whistler waves by continuous HF heating of the upper ionosphere. // Radio Sci. — 2016. — Vol. 51. — P. 1188–1198, doi:10.1002/2015RS005892.