

Возмущения внешней ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением нагревного стенда EISCAT

А.С. Белов¹, Г.А. Марков¹, В.Л. Фролов², В.О. Рапопорт², М. Парро³, М. Ритвельд⁴

¹Нижегородский государственный университет
603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

E-mail: alexis-belov@yandex.ru

²Научно-исследовательский радиофизический институт,
603950 Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, 25

E-mail: vf@nirfi.sci-nnov.ru

³Environment Physics and Chemistry Laboratory (LPCE), Orléans, France

⁴EISCAT Scientific Association, Ramfjordmoen, Norway

В работе представлены результаты измерений характеристик электромагнитных и плазменных возмущений на высотах ~ 700 км, выполненные с помощью бортовой аппаратуры французского микро ИСЗ DEMETER при его пролете через магнитную силовую трубку, опирающуюся на область интенсивного воздействия мощного КВ радиоизлучения нагревного стенда EISCAT. Рассматриваются физические механизмы, позволяющие объяснить наблюдаемые явления.

Введение

Изучение ионосферно-магнитосферных связей (ИМС) и возможностей воздействия на них с помощью существующих наземных радиотехнических средств является важной задачей современной радиофизики [1, 2]. Высокоширотная ионосфера наиболее тесным образом связана с магнитосферой, отражая протекающие в ней процессы, а через магнитосферу – и с солнечным ветром. Поэтому изучение процессов, связанных с высыпаниями энергичных частиц из радиационных поясов Земли и хвоста магнитосферы, существованием интенсивных электрических полей и токов магнитосферного происхождения, магнитными бурями и полярными сияниями вызывает повышенный научный и практический интерес [3].

Настоящая работа содержит результаты экспериментальных исследований характеристик плазменной турбулентности на высотах ~ 700 км, зарегистрированных бортовой аппаратурой французского микро ИСЗ DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions). DEMETER обладает уникальным набором высокочувствительных инструментов и позволяет регистрировать основные параметры плазмы: электронную и ионную концентрации плазмы и температуру ионов, скорость ионов, энергетический спектр электронов в диапазоне 70 кэВ – 2.5 МэВ, а также проводить измерения напряженности электрического поля в диапазоне частот от 0 Гц до 3.5 МГц и магнитного поля от 10 Гц до 20 кГц. Это позволяет решать задачи связанные с изучением ионосферно-магнитосферных связей, влияния мощных радиоизлучений существующих КВ радиостанций на ионосферу Земли, изучать механизмы распространения плазменных возмущений различной природы вдоль силовых линий геомагнитного поля, условия формирования спектра ионосферных неоднородностей плотности плазмы как искусственной, так и естественной природы и т.п. При проведении такого рода исследований наиболее адекватной методикой является многократно повторяемое создание искусственных плазменных возмущений с известными и контролируемыми параметрами, например, при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами, излучаемыми наземным передатчиком. В представленной работе для этой цели использовалось излучение нагревного стенда EISCAT (Тромсё, Сев. Норвегия).

Воздействие осуществлялось в вечерние часы мощной радиоволной Х-поляризации на частоте 4.04 МГц с эффективной мощностью излучения 183 МВт и было согласовано с пролетом ИСЗ DEMETER через магнитную силовую трубку, опирающуюся на возмущенную область ионосферы. Важно, что в этих измерениях был задействован режим *burst mode*, во время которого вся ре-

гистрирующая аппаратура работала с максимальной скоростью оцифровки данных.

Стенд включался на 10 минут за 5 минут до пролета ИСЗ через центр возмущенной силовой трубки. Излучение было промодулировано по амплитуде (глубина модуляции 100 %) в соответствии с циклограммой, представленной на рис. 1. Длительность одного цикла изменения частот модуляции составляла 30 с при длительности излучения с каждой частотой – 5 с.

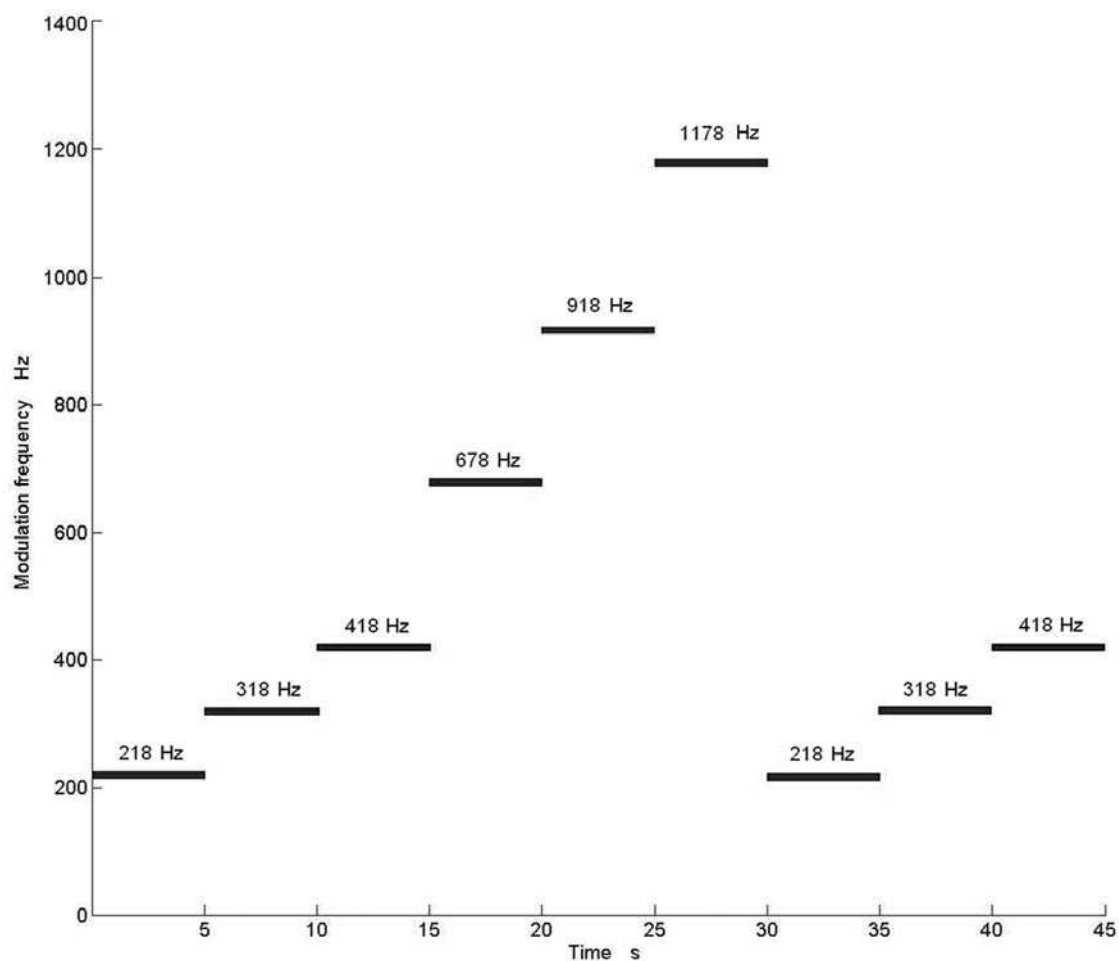


Рис. 1. Циклограмма переключения частоты модуляции.

Результаты измерений

Было проведено три нагревных сеанса (1 – 07.10.2006, 2 – 01.11.2007 и 3 – 14.11.2007) и один контрольный сеанс при пролете ИСЗ над выключенным стендом (4 – 26.10.2007).

Сеанс 1 выделялся достаточно высоким значением критической частоты в Е области ионосферы ($f_{X,E} = 4.8$ МГц, $h_{omp} \sim 120$ км) и характеризовался средним уровнем геомагнитной возмущенности ($K_p = 3^+$). Под действием модулированного излучения нагревного стенда возникала модуляция ионосферной проводимости в облучаемой области авроральной токовой струи на частотах модуляции и как следствие этого – нелинейный переменный ток, который являлся источником искусственного низкочастотного радиоизлучения («эффект Гетманцева» [4]). На верхней панели рис. 2 приведена спектрограмма интенсивности поперечной к направлению геомагнитного поля компоненты $E_x(t)$ электрического поля, зафиксированная инструментом ICE ИСЗ DEMETER в этом сеансе. На нижней панели рис. 2 приведена зависимость от времени расстояния $R(t)$ от ИСЗ до центра возмущенной трубки. Из представленной спектрограммы хорошо видно появление искусственного ОНЧ радиоизлучения в соответствии с циклограммой изменения частоты модуляции волны накачки. Излучение регистрировалось на расстояниях до 150 км от центра возмущен-

ной силовой трубки. Последнее позволяет заключить, что генерируемая низкочастотная волна распространялась вверх преимущественно вдоль силовых линий геомагнитного поля.

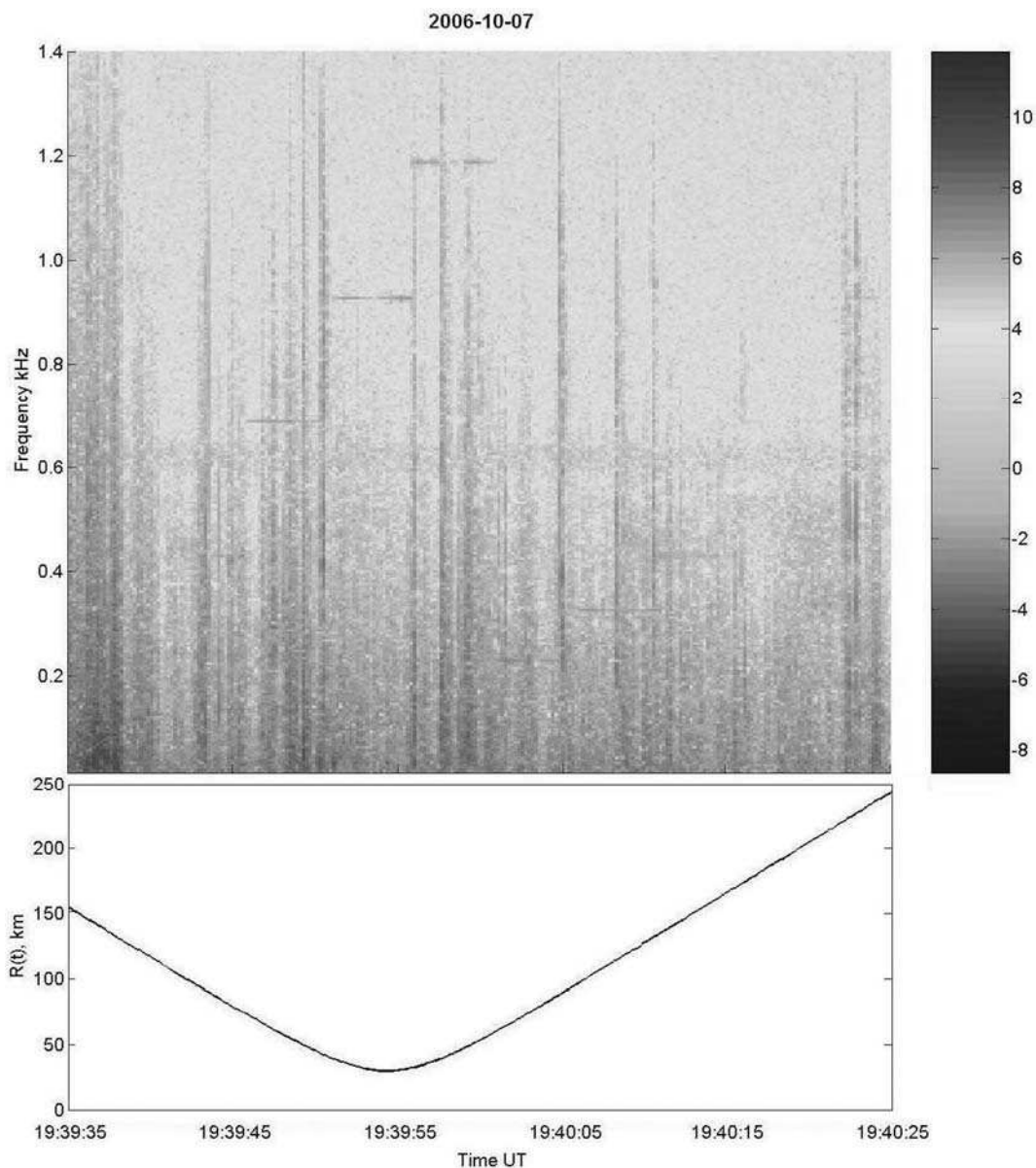


Рис. 2. Спектрограмма интенсивности компоненты $E_x(t)$ электрического поля. На нижней панели рисунка представлена зависимость от времени расстояния от ИСЗ до центра возмущенной трубки.

Измерения в сеансах 2 и 3 выполнялись в условиях, когда частота волны накачки была выше критических частот F и E слоев ионосферы. Особенностью авроральной нижней ионосферы являются резкие колебания во времени значений критической частоты E-области, что свидетельствует о существовании здесь крупномасштабных (с масштабами ≥ 100 км) неоднородностей плотности плазмы, на которых может рефрагировать излучение станда, распространяясь далее вдоль силовых линий геомагнитного поля. В этом случае на высотах $h \geq 200$ км нагревная нелинейность приводит к выталкиванию плазмы из прогретой области и в результате развития самофокусирующей неустойчивости – к образованию неоднородностей плотности плазмы, вытянутых вдоль силовых линий геомагнитного поля.

На левых панелях рис. 3 для сеанса 3 приведены зависимости от времени концентрации преобладающих на высотах пролета спутника ионов атомарного кислорода (N_{O^+}) и гелия (N_{He^+}),

зафиксированные ионным анализатором плазмы (IAP) ИСЗ DEMETER. На верхней правой панели рис. 3 для того же сеанса показана осциллограмма продольной компоненты электрического поля $E_z(t)$, зарегистрированная в диапазоне частот 10 Гц – 1.25 кГц. На нижней правой панели приведен график зависимости от времени расстояния $R(t)$ от ИСЗ до центра возмущенной трубки. Вертикальная затемненная полоса соответствует времени пролета спутника через область дакта с пониженной плотностью плазмы, который располагался в области возмущенной силовой трубки. К сожалению, автоматика ИСЗ в области аврорального овала отключала электрические цепи зонда Ленгмюра, поэтому в этих измерениях не было получено данных о концентрации и температуре электронов.

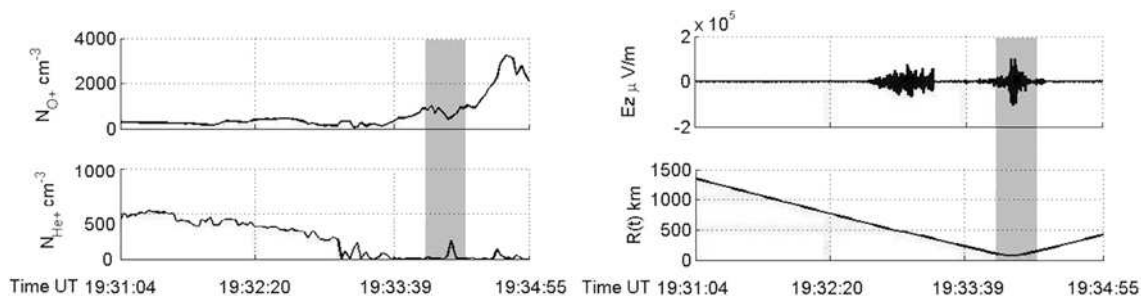


Рис. 3. На левых панелях рисунка представлены зависимости от времени для сеанса 3 концентрации ионов атомарного кислорода и гелия. С правой стороны: верхняя панель – осциллограмма $E_z(t)$, нижняя панель – зависимость от времени расстояния от ИСЗ до центра возмущенной трубки.

Из рис. 3 видно уменьшение плотности плазмы в дакте на величину $\sim 20\%$ с характерным поперечным масштабом ~ 100 км, изменение компонентного состава плазмы в нем (значительное уменьшение концентрации ионов атомарного кислорода и рост концентрации ионов гелия), а также сильное возрастание амплитуды флуктуаций электрических полей в диапазоне 10 Гц – 1.25 кГц в этой области, сравнимое с амплитудами флуктуаций полей в окрестности токовой струи на границе авроральной зоны, которую спутник пересекал несколько раньше, при $T \approx 19:32:50$ UT.

На рис. 4 (панель а) представлен спектр электрических флуктуаций в области частот $f \leq 20$ кГц. На оси времени выделено время пролета ИСЗ через область дакта, аналогично затемненной полосе на рис. 3. Отчетливо видно, что в области с пониженной плотностью плазмы повышался общий уровень шума в низкочастотной части диапазона ≤ 1 кГц. Также наблюдалась генерация широкополосного электромагнитного излучения типа авроральных шипений в диапазоне от нескольких килогерц до > 20 кГц с максимум интенсивности на частоте ~ 3 кГц, соответствующей в наших экспериментах частоте нижнегибридного резонанса на высоте пролета спутника. Последнее служит диагностическим признаком и позволяет определять эффективную массу ионов в области пролета спутника. Источником авроральных шипений на высотах ниже 1000 км считаются интенсивные нисходящие потоки электронов с энергией от 100 эВ до нескольких кэВ. V-образная форма излучения в спектрограммах электрического поля связана с особенностями распространения квазиэлектростатических вистлеровских волн, генерируемых этими потоками. Излучение на самой низкой частоте, близкой к частоте нижнегибридного резонанса, имеет групповую скорость вдоль силовой линии геомагнитного поля. Излучения на более высоких частотах имеют групповую скорость, направленную под углом к магнитному полю, причем большим частотам будет соответствовать больший угол наклона.

Замечательным фактом оказалась регистрация аврорального километрового радиоизлучения (АКР) в возмущенной силовой магнитной трубке на высоте пролета спутника, которая была существенно ниже области генерации АКР ($\sim 2000 - 6000$ км). Спектрограмма интенсивности электромагнитных возмущений в данном сеансе нагрева представлены на рис. 4 (панель б). В диапазоне частот 240 – 390 кГц наблюдается ветка восходящего тона с перескоком на следующую вет-

ку АКР. Регистрация АКР на высотах ~ 700 км возможна только в том случае, если имеет место каналированное распространение LO-моды АКР из области генерации (области электронного ги-рорезонанса) в сторону закритической плазмы ионосферы [5].

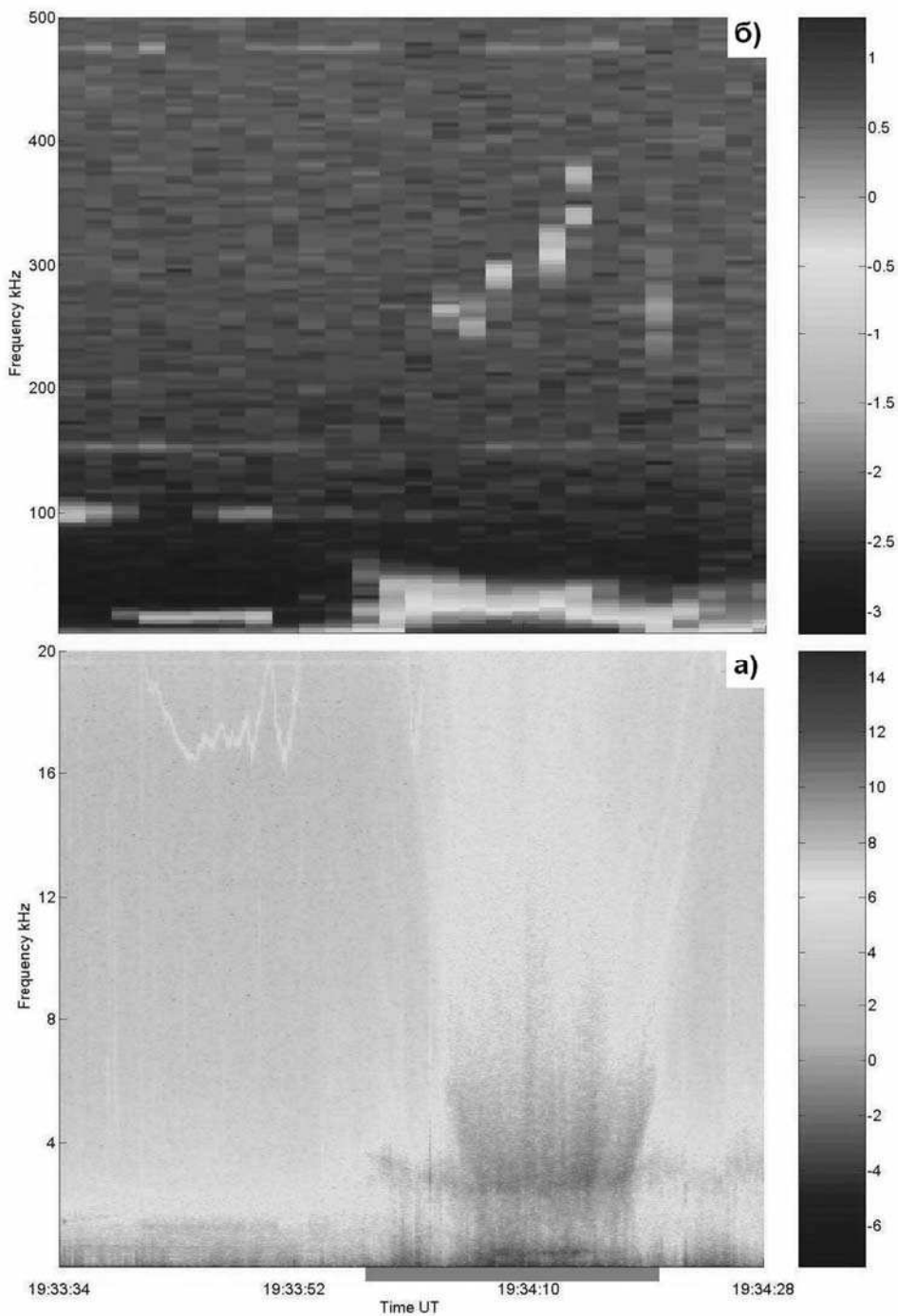


Рис. 4. Панель а) – спектрограмма интенсивности компоненты $E_x(t)$ электрического поля в диапазоне 10 Гц – 20 кГц; б) – спектрограмма электрического поля в диапазоне до 500 кГц.

Отметим, что аналогичная стимуляция АКР и широкополосного электромагнитного излучения типа авроральных шипений имела место и в сеансе 2, а при контрольном пролете DEMETER над выключенным стендом (сеанс 4) подобных эффектов не наблюдалось.

Важным результатом с точки зрения интерпретации наблюдаемых явлений является зарегистрированное увеличение интенсивности потоков энергичных частиц в возмущенной излучением

стенда силовой трубке. На рис. 5 приведены динамические спектры потоков высыпающихся электронов с энергиями $E_e \geq 70$ кэВ. На оси времени затемненной полосой (аналогично рис. 3 и 4) отмечено время пролета ИСЗ через возмущенную силовую трубку, где наиболее ярко выделено возрастание интенсивности потоков электронов с энергиями ≤ 100 кэВ.

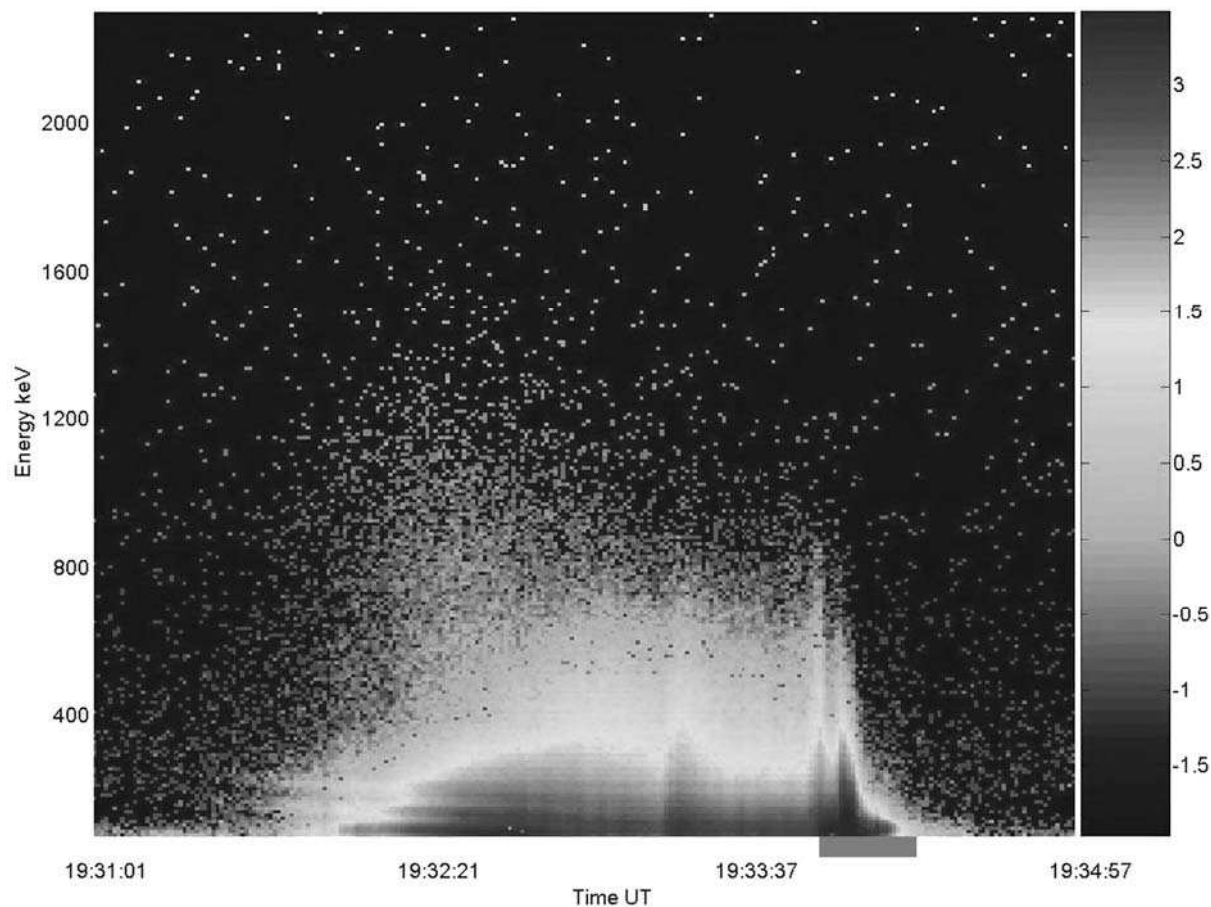


Рис. 5. Динамические спектры потоков высыпающихся электронов с энергиями $E_e \geq 70$ кэВ.

Заключение

В настоящей работе путем прямых *in situ* измерений бортовой аппаратурой ИСЗ DEMETER определены характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере Земли мощным КВ радиоизлучением нагревного стенда EISCAT.

Следует подчеркнуть, что представленные на рис. 2 и 3 результаты были получены в экспериментах с излучением мощных радиоволн Х-поляризации в условиях, когда частота волны накачки превышала критические частоты E- и F- областей ионосферы. Это исключало возможность ее резонансного взаимодействия с плазмой. Поэтому, совокупность представленных результатов может быть объяснена только в предположении о стимулированном возбуждении магнитосферного мазера [6]. В результате формирования волноводного канала и изменения коэффициента обратной связи из-за возмущения плотности плазмы на высотах ионосферного зеркала возможно существенное ослабление требований на интенсивности потоков энергичных электронов, способных возбудить мазерную генерацию в заданной силовой трубке. Следствием генерации являются высыпания вышедших из резонанса частиц, которые вызывают авроральные шипения и километровое излучение.

Работа проводилась при финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 06-05-64995, 07-02-00436, 08-02-00171 и программы «Ведущие научные школы» НШ-1244.2008.2.

Литература

1. *Robinson T.R.* The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // *Physics Reports (Review Section of Physics Letters)*, 1989. 179. Nos. 2 & 3. P. 79-209.
2. *Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kornienko V.A. et al.* Phenomena in the ionosphere-magnetosphere system induced by injection of powerful HF radio waves into nightside auroral ionosphere // *Annales Geophysicae*, 2005. 23. P. 87-100.
3. *Мизун Ю.Г.* Полярная ионосфера. Л.: Наука, 1982. 216 с.
4. *Гетманцев Г.Г., Зуйков Н.А., Котик Д.С. и др.* Обнаружение комбинационных частот при взаимодействии мощного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой // *Письма в ЖЭТФ*, 1974. Т. 20. Вып. 4. С. 229-232.
5. *Mellott M.M., Calvert W., Huff R.L., and Gurnett D.A.* DE-1 observations of ordinary mode and extraordinary mode auroral kilometric radiation // *Geophys. Res. Lett.*, 1984. Vol. 11. P. 1188-1191.
6. *Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю.* Альфвеновские мазеры. Горький: ИПФ АН СССР, 1986. 190 с.