УДК 550.388.2+520.6.05

КНЧ/ОНЧ ВОЗМУЩЕНИЯ НАД ПЕРЕДАТЧИКОМ НААRP, РЕГИСТРИРУЕМЫЕ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ НА СПУТНИКЕ DEMETER

Е. Е. Титова^{1,3}, А. Г. Демехов²*, А. А. Мочалов¹, Б. Б. Гвоздевский¹, М. М. Могилевский³, М. Парро⁴

¹ Полярный геофизический институт РАН, г. Апатиты;
² Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;
³ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия,
⁴ Лаборатория физики и химии окружающей среды и космического пространства

Национального центра научных исследований, г. Орлеан, Франция

При исследовании данных, полученных со спутника DEMETER (высота орбиты над Землёй около 700 км), нами впервые обнаружены электромагнитные возмущения одновременно в диапазонах крайне низких частот (КНЧ, ниже 1 200 Гц) и очень низких частот (ОНЧ, ниже 20 кГц), обусловленные воздействием на ионосферу мощного коротковолнового передатчика НААRP. Из 13 проанализированных пролётов спутника над зоной нагрева КНЧ/ОНЧ сигналы были зарегистрированы в трёх случаях в дневные часы (местное время $LT = 11 \div 12$ ч), когда минимальное расстояние между геомагнитными проекциями траектории спутника и центра зоны нагрева на земную поверхность не превышало 31 км. Во время ночных пролётов КНЧ/ОНЧ возмущения зарегистрированы не были. Размер возмущённой области составлял около 100 км. Проанализированы амплитуда, спектр и поляризация КНЧ возмущений, проведено их сравнение с характеристиками естественных КНЧ шумов над передатчиком HAARP. В частности, показано, что в дневные часы амплитуда КНЧ возмущений над зоной нагрева может в 3÷8 раз превышать амплитуду естественных КНЧ шумов. Отсутствие регистрации искусственных КНЧ/ОНЧ возмущений над зоной нагрева в ночные часы может быть связано как с более низкой частотой нагревного сигнала, при которой нагрев происходит в нижней ионосфере, так и с повышенным уровнем естественных шумов. В спектрах ОНЧ сигналов, связанных с работой передатчика HAARP, регистрировались два максимума: на частотах 8÷10 кГц и 15÷18 кГц, которые близки к первой и второй гармоникам частоты нижнего гибридного резонанса в области нагрева. Для этих сигналов продемонстрировано влияние эффектов распространения свистовых волн вблизи области нижнего гибридного резонанса на спектр возмущений, регистрируемых в верхней ионосфере. В частности, ряд особенностей спектра удаётся объяснить в предположении, что ОНЧ сигналы распространяются в квазирезонансном режиме, а не в квазипродольном. Отмечено, что профиль и динамика частотного спектра КНЧ возмущений согласуются с предположением об их связи с квазистатическими мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации, возникающими в области нагрева и имеющими времена жизни от нескольких секунд и больше. Обсуждаются возможные механизмы формирования КНЧ/ОНЧ возмущений в ионосферной плазме над высокоширотным стендом HAARP на высотах пролёта спутника DEMETER.

ВВЕДЕНИЕ

Основные экспериментальные результаты по взаимодействию мощного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой были получены с использованием наземных методов диагностики. Вместе с тем значительный интерес представляют характеристики плазменных и волновых возмущений, индуцированных в верхней ионосфере при её нагреве мощным радиоизлучением. Поэтому в последнее время возросла роль спутниковых наблюдений эффектов воздействия мощных радиоволн на ионосферу. Наиболее сильные возмущения в верхней ионосфере можно ожидать при нагреве *F*-области, поскольку в этом случае столкновительное затухание возмущений меньше, чем при нагреве нижележащих областей.

^{*} andrei@appl.sci-nnov.ru

Электромагнитные возмущения в КНЧ/ОНЧ диапазонах, вызванные воздействием на ионосферу среднеширотного коротковолнового передатчика «Сура» (координаты 56,15° с. ш., 46,11° в. д.) [1–5] и высокоширотного нагревного стенда EISCAT (координаты 69,87° с. ш., 19,23° в. д.) [6], были зарегистрированы на спутниках «Интеркосмос-24» и DEMETER на высотах 600÷1000 км. При пролёте спутника DEMETER над стендами «Сура» и EISCAT наряду с электростатическими КНЧ шумами регистрировались возмущения и в ОНЧ диапазоне [3–6]. При этом наблюдались волны на частотах 6÷10 кГц, близких к частоте нижнего гибридного резонанса и к нижней частоте обрезания естественных шумовых ОНЧ излучений. Кроме того, регистрировалось уширение спектра сигналов ОНЧ передатчиков в диапазоне 11÷20 кГц, коррелировавшее с уровнем КНЧ возмущений.

В работе [7] была предпринята попытка выявить электромагнитные КНЧ возмущения над самым мощным нагревным стендом HAARP по данным спутника DEMETER. Авторы пришли к выводу, что в области ионосферного провала, где расположен передатчик HAARP, естественные вариации волновых и плазменных параметров настолько велики, что не представляется возможным выделить возмущения, связанные с работой передатчика. Однако мы считаем, что этот вывод не является окончательным.

В данной статье приведены примеры КНЧ/ОНЧ возмущений, обусловленных воздействием на верхнюю ионосферу нагревного коротковолнового стенда HAARP и зарегистрированных на спутнике DEMETER, проанализированы свойства этих возмущений и условия, при которых они возникают, обсуждаются возможные механизмы их генерации.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ХАРАКТЕРИСТИКА ДАННЫХ

Спутник DEMETER имел круговую солнечно-синхронную полярную орбиту с наклонением 98,3° и высотой 660÷710 км. Для измерения постоянных и переменных электрических полей на спутнике DEMETER был установлен прибор ICE [8]. В состав прибора входили четыре датчика, которые представляли собой сферические алюминиевые электроды с диаметром 60 мм, размещённые на концах развёрнутых штанг с длиной 4 м. Сигналы с четырёх датчиков комбинировались, обеспечивая измерение трёх ортогональных компонент электрического поля **E**. В полосе частот от 10 Гц до 1,25 кГц измерялись три взаимно ортогональные компоненты поля E_x , E_y , E_z (ось z направлена вдоль магнитного поля Земли, оси x и y — перпендикулярны магнитному полю). В диапазоне до 20 кГц измерялась одна компонента поля. Измерения магнитного поля в КНЧ и ОНЧ диапазонах проводились прибором IMSL, регистрировались три ортогональные компоненты магнитного поля в диапазоне от 10 Гц до 1,25 кГц и одна компонента в полосе до 20 кГц.

Были проанализированы данные, полученные при 13 пролётах спутника DEMETER в районе стенда HAARP (координаты 62,39° с. ш., 145,15° з. д., магнитная оболочка L = 4,9). Информацию о 9 сеансах работы стенда HAARP с октября 2009 года по ноябрь 2010 года мы взяли из статьи [9], данные по остальным сеансам взяты из работ [10, 11]. Были рассмотрены 7 дневных (LT = $10\div11$ ч) и 6 ночных (LT = $22\div23$ ч) пролётов спутника DEMETER над стендом HAARP. Во всех этих событиях передатчик HAARP работал с максимальной мощностью 3,6 МВт и излучал волны обыкновенной поляризации (О-поляризации) в магнитный зенит. Для дневных сеансов нагрева частота высокочастотного передатчика была близка к критической частоте F-слоя ионосферы и составляла 4÷7 МГц. Для ночных сеансов частота передатчика была заметно ниже критической частоты F-области и находилась вблизи второй гармоники электронной гирочастоты (2,8 МГц). Передатчик HAARP начинал работу за 15÷25 минут до рассмотренных пролётов спутника DEMETER.

Из 13 пролётов спутника DEMETER эффекты в КНЧ/ОНЧ диапазоне, связанные с рабо-

той передатчика HAARP, были зарегистрированы во время трёх пролётов: 16.10.2009, 10.02.2010 и 07.11.2010. Все три события соответствуют дневным сеансам нагрева и сравнительно небольшим расстояниям от спутника до оси возмущённой геомагнитной силовой трубки¹ (менее 35 км), причём во всех трёх событиях регистрировались возмущения как в КНЧ, так и ОНЧ диапазонах. Дальнейший анализ показал подобие спектральных и поляризационных характеристик КНЧ/ОНЧ сигналов для событий 16.10.2009 и 10.02.2010, которые и будут подробно проанализированы в данной статье. Свойства КНЧ/ОНЧ сигналов, зарегистрированных 07.11.2010, заметно отличались от двух других событий. К сожалению, малое количество пролётов спутника DEMETER над стендом НААRP не позволило нам на данном этапе выявить причины наблюдаемых отличий. Отметим только большую магнитную активность и высокий уровень естественных КНЧ/ОНЧ излучений, а также высокие значения критической частоты *F*-слоя (около 7 МГц) и частоты передатчика НААRP (6,5 МГц) в событии 07.11.2010. Исследование этого события мы предполагаем провести в отдельной работе.

В разделах 2 и 3 данной работы изложены свойства КНЧ и ОНЧ сигналов, наблюдавшихся при пролётах спутника DEMETER над стендом HAARP. В разделе 4 эти результаты кратко суммируются. Раздел 5 содержит обсуждение полученных результатов наблюдений, в разделе 6 приведены основные выводы работы.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ КНЧ СИГНАЛОВ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ НАД СТЕНДОМ НААRP

2.1. Амплитуда и поляризация КНЧ сигналов над передатчиком HAARP по данным спутника DEMETER

Пример регистрации КНЧ возмущений, обусловленных воздействием передатчика HAARP, на спутнике DEMETER для события 16.10.2009 показан на рис. 1. На верхней панели приведена осциллограмма компоненты E_x электрического поля в полосе частот f < 1,25 кГц, а на нижней панели — спектрограмма указанной компоненты. Во время события 16.10.2009 спутник пролетал практически над передатчиком HAARP, минимальное расстояние от спутника до оси возмущённой геомагнитной силовой трубки составляло около 3 км. Стрелки на рис. 1 указывают время максимального приближения спутника DEMETER к оси возмущённой геомагнитной силовой трубки, а вертикальные прямые ограничивают 10-секундные интервалы до и после наименьшего удаления спутника от оси трубки. На осциллограмме видно возмущение электрического поля при пролёте спутника вблизи передатчика; скорость спутника составляла около 7 км/с, что на высоте спутника DEMETER соответствует горизонтальному размеру области КНЧ возмущений около 140 км. Отметим, что ширина пятна засветки ионосферы мощным коротковолновым излучением на высоте 210 км, соответствующей отражению волны накачки с частотой 5,1 МГц по данным работы [9], составляет примерно 40 км по уровню половинной мощности в направлении север—юг (вдоль орбиты спутника). Спектрограмма демонстрирует, что наблюдаемое возмущение представляет собой широкополосный сигнал, занимающий всю полосу регистрируемых частот (10÷1 250 Гц). Аналогичные по спектральным свойствам КНЧ возмущения регистрировались при измерении компонент E_u и E_z ; магнитными антеннами возмущения в КНЧ диапазоне, связанные с работой передатчика HAARP, не регистрировались. Максимальные амплитуды КНЧ сигналов регистрировались для компоненты E_x и в отдельные моменты достигали 10^3 мкВ/м, средняя амплитуда КНЧ сигналов для компоненты E_x в зоне возмущения (начиная с 10 с до и в

Е.Е. Титова, А.Г. Демехов, А.А. Мочалов и др.

¹ Здесь и далее возмущённой геомагнитной силовой трубкой будем для краткости называть геомагнитную силовую трубку, опирающуюся на область возмущения.



Рис. 1. Осциллограмма (a) и спектрограмма (δ) компоненты E_x электрического поля, зарегистрированного 16.10.2009 на спутнике DEMETER при пролёте над передатчиком HAARP; стрелки указывают время максимального приближения спутника DEMETER к передатчику HAARP, вертикальные прямые ограничивают 10-секундные интервалы до и после наименьшего удаления спутника от передатчика

течение 10 с после максимального приближения спутника к центру области нагрева) составляла 225 мкВ/м.

Во время события 10.02.2010, в ходе которого регистрировались возмущения в КНЧ диапазоне над передатчиком HAARP, минимальное расстояние между геомагнитными проекциями спутника DEMETER и оси возмущённой магнитной силовой трубки составляло 31 км. При этом по данным работы [9] ширина области засветки ионосферы волной накачки с частотой 4,25 МГц на высоте отражения (210 км) по уровню половинной мощности была около 40 км в направлении

Е.Е. Титова, А.Г. Демехов, А.А. Мочалов и др.

Дата	Средняя амплитуда КНЧ компоненты			
пролёта	электрического поля			
	\overline{E}_x , мк $\mathrm{B/m}$	\overline{E}_y , мк $\mathrm{B/m}$	\overline{E}_z , мк $\mathrm{B/m}$	
16.10.2009	225,4	199,0	78,5	
10.02.2010	$65,\!5$	66,2	38,3	

Габлипа	1
- coorriged	_

восток—запад (поперёк траектории спутника). Вид спектра зарегистрированных КНЧ сигналов был подобен спектру сигналов, наблюдавшихся 16.10.2009, средняя амплитуда компоненты E_x в полосе частот 10÷1250 Гц в зоне возмущения составляла 65 мкВ/м, а размер области возмущений — около 70 км.

Данные о поляризации КНЧ сигналов, регистрируемых над передатчиком HAARP, приведены в табл. 1, где показаны средние амплитуды компонент E_x , E_y и E_z электрического поля в КНЧ диапазоне в области возмущений для пролётов спутника DEMETER 16.10.2009 и 10.02.2010. Из табл. 1 видно, что средние амплитуды перпендикулярных к геомагнитному полю компонент E_x и E_y в полосе частот f < 1,25 кГц всегда больше продольной компоненты E_z . Отметим, что для естественных КНЧ сигналов вне зоны нагрева, свойства которых будут рассмотрены ниже, также характерно превышение амплитуды перпендикулярных компонент электрического поля над амплитудой его продольной компоненты.

2.2. Амплитуда естественных КНЧ шумов по данным спутника DEMETER в верхней ионосфере

Возможность регистрации воздействия высокочастотных передатчиков в верхней ионосфере зависит от уровня естественных КНЧ шумов. На рис. 2 приведена зависимость амплитуды компонент КНЧ шума в верхней ионосфере от планетарного индекса геомагнитной активности K_p для дневных и ночных пролётов спутника DEMETER в окрестности нагревного стенда HAARP для анализируемых событий. Приведены средние амплитуды КНЧ шумов компонент E_x , E_y и E_z на частотах ниже 1 250 Гц для временны́х интервалов от 30 до 10 с до момента максимального сближения спутника с центром области нагрева и от 10 до 30 с после максимального сближения, т. е. заведомо вне зоны возмущения. Из рис. 2 видно:

1) уровень естественных КНЧ шумов в ночные часы может на порядок превышать соответствующие дневные значения, причём амплитуда КНЧ шумов днём практически всегда ниже 100 мкВ/м, а ночью выше этого значения;

2) амплитуды компонент E_x и E_y электрического поля естественных КНЧ шумов превышают амплитуду компоненты E_z как для дневных, так и для ночных условий;

3) для дневных пролётов характеристики естественных КНЧ сигналов не зависят от геомагнитной активности, а для ночных часов амплитуда естественного КНЧ шума возрастает с ростом индекса $K_{\rm p}$.

Сравним характеристики естественных и возмущённых КНЧ сигналов над передатчиком HAARP. Подобно естественным сигналам, амплитуды компонент E_x и E_y возмущённых КНЧ сигналов над передатчиком HAARP превышают амплитуду компоненты E_z (см. табл. 1). Максимальная и минимальная средние амплитуды возмущённых КНЧ сигналов в зоне нагрева для компонент E_x и E_y обозначены на рис. 2 пунктиром. Видно, что максимальная амплитуда возмущённых КНЧ сигналов в зоне нагрева может почти на порядок превосходить уровень есте-



Рис. 2. Амплитуды естественных КНЧ шумов (f < 1250 Гц) в верхней ионосфере в зависимости от планетарного индекса геомагнитной активности K_p для дневных (светлые символы) и ночных (тёмные символы) пролётов спутника DEMETER в окрестности нагревного стенда HAARP. Квадраты соответствуют компоненте E_x , ромбы — E_y , круги — E_z . Максимальная и минимальная средние амплитуды КНЧ возмущений компонент E_x и E_y , зарегистрированные на спутнике DEMETER над передатчиком HAARP, обозначены пунктирными прямыми

ственных КНЧ шумов в дневные часы. Вместе с тем амплитуда наблюдавшихся в дневное время возмущённых КНЧ сигналов была сравнима с уровнем естественных КНЧ шумов, характерным для ночных пролётов, либо была ниже этого уровня. Таким образом, высокий уровень КНЧ шумов в авроральных широтах в ночные часы, который может на порядок превышать соответствующие дневные значения, существенно затрудняет возможность регистрации КНЧ сигналов, генерируемых в ночной ионосфере при воздействии стенда НААRP и, вероятно, других высокоширотных коротковолновых нагревных стендов.

2.3. Тонкая структура КНЧ сигналов над передатчиком HAARP

Подобно естественным КНЧ сигналам, возмущения, регистрируемые над передатчиком HAARP, являются нестационарными и могут представлять собой последовательность импульсов, иногда с характерным квазипериодом. В частности, импульсный характер сигналов зарегистрирован во время пролёта спутника над передатчиком HAARP 16.10.2009 (см. рис. 3). Квазипериодическая структура осциллограммы регистрировалась для всех трёх компонент поля. При этом 10 импульсов электрического поля, зарегистрированных в интервале 20:32:55–30:32:59 UT (см. рис. 36), следуют с шагом около 0,4 с. Спектрограмма компоненты E_x , содержащая этот временной отрезок, показана на рис. 36. Отметим, что наблюдаемая импульсная структура в КНЧ сигналах не связана с модуляцией сигналов передатчика НААRP, поскольку во время сеанса 16.10.2009 он работал в непрерывном режиме. Если предположить, что временная модуляция интенсивности КНЧ возмущений обусловлена эффектами пространственной модуляции, то характерное время около 0,4 с между КНЧ импульсами на рис. 36 соответствует пространственному масштабу около 3 км.

Анализ осциллограмм КНЧ компонент поля во время второго события (10.02.2010) не выявил интервалов с подобной импульсной структурой. Детальный анализ осциллограмм и статистических характеристик КНЧ возмущений над зоной нагрева (характерных масштабов, признаков самоподобия и др.) выходит за рамки данной работы.



Рис. 3. Характеристики КНЧ сигналов в полосе частот $10\div1250$ Гц, зарегистрированные 16.10.2009 на спутнике DEMETER при пролёте через возмущённую магнитную силовую трубку, связанную с передатчиком HAARP: осциллограмма компоненты E_x электрического поля в интервале 20:32:50–20:33:05 UT (*a*); осциллограмма (*б*) и спектрограмма (*в*) той же компоненты электрического поля в интервале 20:32:55–20:32:59 UT

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОНЧ СИГНАЛОВ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ НАД СТЕНДОМ НААRP

Рассмотрим эффекты, регистрируемые в ОНЧ диапазоне при пролётах спутника DEMETER над нагревным стендом HAARP. Как сказано выше, возмущения ОНЧ сигналов наблюдались в тех же пролётах спутника DEMETER вблизи передатчика HAARP в дневных условиях, во время которых регистрировались и возмущения в КНЧ диапазоне.

На рис. 4*a* показаны спектрограммы КНЧ/ОНЧ сигналов, зарегистрированных электрической антенной, при пролёте спутника DEMETER над стендом HAARP для события 16.10.2009. Напомним, что в это время передатчик HAARP излучал волны О-поляризации с максимальной мощностью 3,6 МВт на частоте 5,1 МГц, близкой к критической частоте слоя $F: f_{oF_2} = 5.0 \div 5.1$ МГц. Спутник пролетал над передатчиком через 17 минут после начала нагрева в 20:15 UT. Минимальное удаление геомагнитной проекции спутника DEMETER от проекции оси



Рис. 4. Спектрограммы КНЧ/ОНЧ сигналов в полосе ниже 20 кГц, зарегистрированные 16.10.2009 (*a*) и 10.02.2010 (*б*) на спутнике DEMETER при пролёте над передатчиком HAARP: время максимального приближения спутника DEMETER к силовой линии, связанной с передатчиком HAARP, указано вертикальной прямой. Видно, что в обоих событиях над передатчиком HAARP одновременно регистрировались интенсивные возмущения как в КНЧ, так и в ОНЧ диапазонах (на частотах выше 7 кГц)

возмущённой магнитной силовой трубки составляло приблизительно 3 км. Вертикальная линия на рис. 4*a* соответствует времени 20:33:02 UT максимального приближения спутника к магнитной силовой линии, связанной с передатчиком HAARP. Из рис. 4*a* видно, что наряду с КНЧ возмущениями в зоне над передатчиком усиливаются ОНЧ шумы в частотных диапазонах $8\div10$ кГц и $15\div18$ кГц. Отметим, что частоты $8\div10$ кГц близки к характерным частотам нижнего гибридного резонанса в дневной ионосфере в промежутке от высот максимума слоя *F* до высот спутника DEMETER. Спектральная плотность мощности сигналов в КНЧ диапазоне на частотах ниже 200 Гц составляла $100\div300$ мкВ²/(м²·Гц) и значительно превосходила мощность сигналов в ОНЧ диапазоне, которая не превышала 0.02 мкВ²/(м²·Гц) на частотах $8\div10$ кГц.

На частотах $15 \div 18 \text{ к}\Gamma$ ц, примерно вдвое превышающих характерные частоты нижнего гибридного резонанса в верхней ионосфере для дневных условий, ОНЧ возмущения наиболее отчётливо регистрировались в событии 10.02.2010 (рис. 4δ). Во время этого события передатчик HAARP излучал сигналы О-поляризации с максимальной мощностью 3,6 МВт на частоте 4,25 МГц, а критическая частота слоя F составляла 5,5 МГц. Спутник DEMETER пролетал над стендом HAARP через 13 мин после начала работы передатчика в 20:15 UT, минимальное расстояние между геомагнитной проекцией спутника и проекцией оси возмущённой магнитной силовой трубки составляло 31 км. Как в КНЧ, так и в ОНЧ диапазонах возмущения, связанные с работой передатчика HAARP, зарегистрированы только электрической антенной.

Во время сеанса 10.02.2010 передатчик НААRР излучал в модулированном режиме с частотой модуляции 0,7 Гц (период 1,4 с). На рис. 5 показаны спектры ОНЧ сигналов на частотах $10\div20$ кГц (панель *a*) и КНЧ сигналов на частотах ниже 600 Гц (панель *б*), зарегистрированных на спутнике DEMETER при пролёте над стендом HAARP. Из рис. 5 видно, что над передатчиком максимальную интенсивность имели КНЧ возмущения на частотах ниже 600 Гц, в которых модуляция нагревного высокочастотного излучения никак не проявлялась. В то же время отчётливая модуляция с периодом 1,4 с видна в ОНЧ диапазоне на частотах выше 14 кГц. Из

175



Рис. 5. Спектрограммы ОНЧ сигналов в диапазоне $10\div 20$ кГц (*a*) и КНЧ сигналов на частотах ниже 600 Гц (*б*), зарегистрированные на спутнике DEMETER при пролёте над стендом HAARP 10.02.2010

рис. 5*а* также видно, что минимальная частота ОНЧ возмущений изменялась по мере движения спутника: уменьшалась от 18 кГц, достигала минимума (примерно 15,5 кГц) при максимальном приближении к возмущённой магнитной силовой трубке, а затем вновь увеличивалась.

На рис. 6 показаны спектры мощности ОНЧ сигналов в полосе 5÷20 кГц, зарегистрированных на спутнике DEMETER в области максимального приближения к возмущённой магнитной силовой трубке для событий 16.10.2009 и 10.02.2010. На рис. 6*a*, соответствующем событию 16.10.2009, видны два максимума интенсивности ОНЧ возмущений: один — в области частот 7÷10 кГц в диапазоне нижнего гибридного резонанса слоя F_2 , второй — на частотах 15÷18 кГц. В отличие от события 16.10.2009, в событии 10.02.2010 (рис. 6*6*) усиление ОНЧ шумов над передатчиком НААRP зарегистрировано только на частотах 16÷18 кГц, значительно превышающих частоты нижнего гибридного резонанса как на высоте спутника DEMETER, так и в области нагрева на высотах *F*-слоя. Небольшой по амплитуде спектральный максимум на частоте около 7 кГц, видимый на рис. 6*6*, представляет собой естественные шумы в нижнем гибридном диапазоне на высоте спутника DEMETER, которые наблюдаются также вне зоны возмущения передатчика НААRP и не усиливаются над передатчиком; последнее отчётливо видно на рис. 4*6*.

Таким образом, в событиях 16.10.2009 и 10.02.2010 в области с размером около 100 км над передатчиком HAARP наблюдались возмущения в ОНЧ диапазоне на частотах около 8÷10 кГц (16.10.2009) и на частотах 15÷18 кГц (16.10.2009 и 10.02.2010), причём в событии 10.02.2010 наблюдалась периодическая модуляция уровня ОНЧ возмущений с частотой модуляции нагревного излучения; последний факт непосредственно доказывает, что эти ОНЧ возмущения были обусловлены работой стенда HAARP.



Рис. 6. Спектры ОНЧ сигналов в полосе 5÷20 кГц, зарегистрированные на спутнике DEMETER 16.10.2009 (a) и 10.02.2010 (б) в области возбуждения КНЧ/ОНЧ сигналов над передатчиком НААRP

Отметим, что в области регистрации КНЧ и модулированных ОНЧ возмущений в событии 10.02.2010 по обе стороны от основной зоны возмущения явно выделяются провалы интенсивности сигнала с длительностью 2÷3 с (около 20:27:42 UT и 20:27:55 UT, см. рис. 5), что может быть связано с наличием боковых лепестков диаграммы направленности передатчика HAARP. Аналогичные провалы в интенсивности КНЧ возмущений наблюдались и для события 16.10.2009 (см. рис. 1).

4. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Для удобства дальнейшего обсуждения суммируем приведённые выше результаты, полученные на спутнике DEMETER, по анализу КНЧ/ОНЧ возмущений, обусловленных воздействием на ионосферу коротковолнового передатчика HAARP.

1) КНЧ/ОНЧ возмущения были зарегистрированы электрическими антеннами в дневные часы (LT = $11\div12$ ч) при максимальной мощности передатчика 3,6 МВт, излучавшего на частотах 4,25÷6,5 МГц, близких к критической частоте ионосферного слоя F; время работы стенда до пролёта спутника DEMETER над областью нагрева составляло 10÷15 мин. В ночные часы, когда передатчик HAARP излучал на частоте 2,8 МГц, близкой к второй гармонике электронной гирочастоты в области нагрева, возмущения в КНЧ/ОНЧ диапазонах не наблюдались.

2) Горизонтальный размер области, в которой спутник DEMETER зарегистрировал возмущения в КНЧ/ОНЧ диапазонах, составлял около 140 км при пролёте вблизи оси возмущённой геомагнитной силовой трубки и около 70 км при пролёте на расстоянии 30 км от центра зоны нагрева (проецирование на область нагрева осуществлялось вдоль геомагнитных силовых линий).

3) Характерные амплитуды возмущений в КНЧ диапазоне над передатчиком HAARP в полосе частот от 10 до 1 250 Гц составляли 70÷200 мкВ/м для поперечных к геомагнитному полю компонент электрического поля и 30÷80 мкВ/м для продольной компоненты. Указанные амплитуды возмущений в КНЧ диапазоне заметно превышали амплитуды ОНЧ возмущений в полосе

Е.Е. Титова, А.Г. Демехов, А.А. Мочалов и др.

6÷20 кГц: последние составляли менее 10 мкВ/м.

4) Анализ КНЧ возмущений, связанных с работой стенда НААRP, показал, что они поляризованы преимущественно перпендикулярно к геомагнитному полю.

5) Амплитуда КНЧ возмущений, которые были зарегистрированы над зоной нагрева в дневные часы, в 3÷8 раз превышала уровень естественных КНЧ шумов в это время суток. Уровень естественных КНЧ шумов в ночные часы может на порядок превышать дневные значения; он также превышает амплитуду КНЧ возмущений, зарегистрированных над зоной нагрева в дневное время.

6) В спектрах ОНЧ сигналов над областью нагрева регистрировались два максимума: в окрестности частоты нижнего гибридного резонанса максимума F-области, на частотах $8\div10$ кГц, и вблизи удвоенной частоты нижнего гибридного резонанса, на частотах $15\div18$ кГц. Возмущения, обусловленные работой стенда HAAARP, наблюдались в окрестности низкочастотного максимума лишь в одном из двух анализируемых событий, когда область нагрева располагалась практически в максимума F-области, усиление ОНЧ шумов над этой областью зарегистрировано только в диапазоне частот $15\div18$ кГц.

7) При модулированном нагреве с периодом модуляции мощности нагревного высокочастотного передатчика 1,4 с вариации уровня искусственных низкочастотных возмущений с этим же периодом в зоне над передатчиком регистрировались только в ОНЧ диапазоне (на частотах 15÷18 кГц), в то время как в КНЧ диапазоне такие периодические вариации не наблюдались.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения [3–5], выполненные на спутнике DEMETER при пролётах над областью нагрева среднеширотного стенда «Сура», показали, что плазменные и электромагнитные возмущения регистрировались в верхней ионосфере преимущественно при нагреве области F_2 короткими радиоволнами О-поляризации с частотами, близкими к критической частоте f_{0F_2} , но не превышающими её. В рассмотренных нами событиях КНЧ/ОНЧ возмущения над передатчиком НААRР также были зарегистрированы спутником DEMETER при высокочастотном нагреве области F_2 , но только во время дневных пролётов, когда критическая частота ионосферы была около 4÷5 МГц. Во время ночных пролётов, когда передатчик работал на частоте 2,8 МГц, КНЧ возмущения, обусловленные работой стенда, на спутнике не наблюдались (хотя в одном из пяти таких случаев частота нагревной волны также была близка к частоте f_{0F_2}). Это согласуется с выводами работы [7], в которой в данных спутника DEMETER не были обнаружены плазменные и электромагнитные возмущения при работе передатчика НААRР на частотах 2,75÷3,25 МГц.

Однако причиной отсутствия искусственных КНЧ возмущений в данных спутника в ночные часы может быть не только низкая частота передатчика, но и высокий уровень естественных шумов в высоких широтах, который может на порядок превышать амплитуду естественных КНЧ шумов в дневные часы (см. рис. 3). В средних широтах, где уровень естественных шумов намного ниже, чем в авроральных широтах, КНЧ возмущения над областью нагрева стенда «Сура» многократно регистрировались на спутниках именно в ночные часы. Возможно, отсутствие подобных событий для дневного времени в случае стенда «Сура» связано с гораздо меньшей мошностью передатчика, которая не позволяла возбудить заметную искусственных КНЧ шумов и низкая частота передатчика могут быть причинами отсутствия КНЧ возмущений над передатчиком НААRР в ночные часы. Анализ возможности регистрации КНЧ возмущений на спутниках в ночные часы над высокоширотными нагревными стендами требует специальных экспериментов.

Е.Е. Титова, А.Г. Демехов, А.А. Мочалов и др.

Обсудим теперь возможную природу изложенных в разделе 4 особенностей спектров ОНЧ и КНЧ возмущений. При взаимодействии с ионосферой мощной короткой радиоволны с обыкновенной поляризацией и частотой, ниже критической частоты *F*-слоя ионосферы, за счёт целого комплекса нелинейных процессов возникает искусственная ионосферная турбулентность [2, 12]. На первой стадии, длящейся $0,05\div0,2$ с после включения передатчика, вблизи высоты отражения волны накачки происходит развитие стрикционной параметрической неустойчивости [13, 14], в результате чего наблюдается генерация ленгмюровской плазменной турбулентности и ускорение электронов до сверхтепловых энергий.

На временах порядка 0,5÷5 с после включения коротковолнового передатчика, в F-слое ионосферы развивается тепловая параметрическая неустойчивость [15, 16], проявляющаяся в формировании вытянутых вдоль геомагнитного поля мелкомасштабных неоднородностей концентрации плазмы с характерными размерами поперёк магнитного поля $l_{\perp} < 0,5\div50$ м. При этом наиболее эффективно искусственная ионосферная турбулентность развивается ниже точки отражения — в области, где частота накачки передатчика приближается к частоте верхнего гибридного резонанса $f_{\rm BFP} = (f_{\rm p}^2 + f_{\rm ce}^2)^{1/2}$, где $f_{\rm p}$ и $f_{\rm ce}$ — плазменная и электронная циклотронная частоты соответственно. Затем, на временах 30÷60 с после включения передатчика, развиваются искусственные плазменные неоднородности с километровыми масштабами, возбуждение которых связывают с тепловой самофокусировочной неустойчивостью электромагнитных волн в магнитоактивной плазме [17, 18].

Нелинейное взаимодействие искусственной ионосферной турбулентности с волной накачки приводит к генерации различных типов плазменных волн, наиболее интенсивными из которых, по-видимому, являются верхнегибридные и нижнегибридные волны. При этом частоты верхнегибридных колебаний близки к частоте волны накачки, а частота нижнегибридных колебаний близка к частоте нижнего гибридного резонанса $f_{\rm H\Gamma P}$ и лежит в ОНЧ диапазоне. Нижнегибридные волны генерируются в области нагрева в результате распада верхнегибридной волны с циклической частотой $\omega_{\rm B\Gamma}$ на другую верхнегибридную волну с частотой $\omega'_{\rm B\Gamma}$ и нижнегибридную волну с частотой $\omega_{\rm H\Gamma}$, при этом должны быть выполнены условия фазового и пространственного синхронизма: $\omega_{\rm B\Gamma} = \omega'_{\rm B\Gamma} + \omega_{\rm H\Gamma}$ и $\mathbf{k}_{\rm B\Gamma} = \mathbf{k}'_{\rm B\Gamma} + \mathbf{k}_{\rm H\Gamma}$.

Об эффективности генерации нижнегибридных волн в области нагрева свидетельствует тот факт, что самый интенсивный (главный) спектральный максимум (downshifted maximum, DM) в искусственном радиоизлучении ионосферы смещён от несущей частоты вниз на 8÷20 кГц [19], т. е. на часто́ты, близкие к частотам нижнегибридных волн в области нагрева. Пиковая интенсивность компоненты DM при полосе приёма 300 Гц на 60÷70 дБ ниже интенсивности принимаемого сигнала волны накачки. Помимо компоненты DM, в спектрах искусственного радиоизлучения ионосферы часто присутствует так называемый второй максимум (2DM), сдвиг частоты которого от частоты волны накачки в два раза больше сдвига главного максимума, т.е. порядка удвоенной частоты нижнегибридных волн [20]. Это указывает на генерацию второй гармоники нижнегибридных волн.

Как отмечено выше, часто́ты ОНЧ возмущений над передатчиком HAARP близки к частотам нижнего гибридного резонанса $f_{\rm HFP}$ в верхней ионосфере. Рассмотрим этот факт подробнее. Частота $f_{\rm HFP}$ определяется выражением

$$f_{\rm H\Gamma P}^2 = \frac{1}{M_{\rm eff}} \frac{f_{\rm ce}^2 f_{\rm p}^2}{f_{\rm p}^2 + f_{\rm ce}^2},\tag{1}$$

где $f_{\rm ce}$ — электронная гирочастота, $f_{\rm p}$ — плазменная частота, $M_{\rm eff}$ — безразмерная эффективная

Е.Е. Титова, А.Г. Демехов, А.А. Мочалов и др.

масса иона:

$$\frac{1}{M_{\rm eff}} = \frac{m_{\rm e}}{n_{\rm e}} \sum_{\alpha} \frac{n_{\alpha}}{M_{\alpha}},\tag{2}$$

где $n_{\rm e}$ и n_{α} — концентрация электронов и ионов сорта α соответственно, $m_{\rm e}$ и M_{α} — масса электрона и иона сорта α соответственно, суммирование проводится по всем сортам ионов; считается, что все ионы однократно ионизированы.

В области максимума *F*-слоя выполнено неравенство $f_p^2 \gg f_{ce}^2$ и преобладает ион кислорода, вследствие чего над передатчиком НААRP в области нагрева частота $f_{\rm HFP} = f_{ce}/M_{\rm eff}^{1/2} \approx 8$ кГц. ОНЧ возмущения регистрировались над передатчиком НААRP в событии 16.10.2009 на частотах $8\div10$ кГц и $15\div18$ кГц, а в событии 10.02.2010 регистрировался только высокочастотный максимум на частотах $15\div18$ кГц. Таким образом, частоты ОНЧ возмущений над передатчиком НААRP были близки к первой и второй гармоникам частоты нижнего гибридного резонанса в области нагрева. Это совпадение даёт основание предполагать, что ОНЧ возмущения над передатчиком НААRP генерируются в области нагрева в результате распада верхнегибридной волны на другую верхнегибридную волну и нижнегибридную волну с последующей трансформацией нижнегибридной волны в квазиэлектростатическую (резонансную) и/или электромагнитную свистовую волну.

ОНЧ возмущения на частотах 8÷15 кГц, обусловленные воздействием мощного коротковолнового излучения на ионосферу, впервые наблюдались над передатчиком «Сура» на спутнике «Интеркосмос-24» на высотах 600÷1000 км. В работе [1] обсуждалась возможность генерации ОНЧ возмущений в области нагрева в результате рассеяния нижнегибридных коротковолновых колебаний с отношением $k^2c^2/\omega_p^2 \gg 1$ на вытянутых вдоль геомагнитного поля мелкомасштабных неоднородностях концентрации плазмы с последующей трансформацией в поперечные электромагнитные волны свистовой моды с показателем $k^2c^2/\omega_p^2 \ll 1$. Здесь k — волновое число, c — скорость света, $\omega_p = 2\pi f_p$. Волновые векторы этих волн имеют малые углы наклона к геомагнитному полю, поэтому свистовые волны распространяются преимущественно вдоль силовых линий и могут быть захвачены в дакты концентрации, формирующиеся над мощными коротковолновых передатчиками.

Однако спектральные характеристики ОНЧ возмущений, зарегистрированных над передатчиком HAARP 10.02.2010, могут быть объяснены в рамках предположения, что волновые векторы ОНЧ сигналов, распространяющихся из области нагрева, направлены не вдоль геомагнитного поля, а под большими углами к нему, близкими к углам резонансного конуса свистовых волн. Эти квазирезонансные волны существуют только на частотах $f > f_{\rm HFP}$ и, распространяясь в направлении увеличения частоты нижнего гибридного резонанса, отражаются на высотах, где их частота f приблизительно равна $f_{\rm HFP}$ [21]. Рассмотрим это предположение более подробно.

На рис. 7 показаны зависимости от высоты h концентрации электронов $N_{\rm e}$, эффективной ионной массы $M_{\rm eff}$ и частоты нижнего гибридного резонанса $f_{\rm HFP}$, рассчитанные с использованием модели ионосферы SAMI2 [22] для координат стенда HAARP и условий, отвечающих рассматриваемым событиям. Во время работы стенда HAARP и пролёта над ним спутника DEMETER 16.10.2009 критическая частота ионосферного слоя F была равна 5,15 МГц, во время события 10.02.2010 частота $f_{\rm oF_2} = 5,5$ МГц. В области максимума электронной концентрации F-слоя отчётливо выделяется максимум частоты́ $f_{\rm HFP}$, который формируется за счёт резкого уменьшения массы $M_{\rm eff}$ в области максимума F-слоя при плавном спадании гирочастоты $f_{\rm ce}$ (см. формулу (1)).

Наиболее эффективное взаимодействие радиоволн с ионосферой имеет место в области, где частота волны накачки приближается к частоте верхнего гибридного резонанса, т.е. несколько ниже высоты максимума *F*-слоя. Таким образом, если частота волны накачки близка к критиче-



Рис. 7. Высотные профили (*a*, электронной концентрации $N_{\rm e}$ (*a*), эффективной ионной массы $\dot{M}_{\rm eff} = M_{\rm eff}m_{\rm e}/m_{\rm p}$ (*b*), где $m_{\rm p}$ — масса протона, часто́ты нижнего гибридного резонанса $f_{\rm HFP}$ в разном масштабе по высоте (*b*, *c*). На более крупномасштабной панели *c* показано положение областей нагрева (серые прямоугольники) для событий 16.10.2009 и 10.02.2010. Профили рассчитаны по модели ионосферы SAMI2 для событий 16.10.2009 (толстые линии) и 10.02.2010 (тонкие линии). Горизонтальные пунктирные прямые на панелях *a*-*b* отмечают высоту спутника DEMETER

ской частоте f_{0F_2} , то часто́ты нижнегибридных волн близки к максимальным частотам нижнего гибридного резонанса в области максимума электронной концентрации *F*-слоя и область, в которой генерируются нижнегибридные волны, находится вблизи максимума *F*-слоя. Такие волны могут свободно распространяться вверх — в направлении уменьшения частоты $f_{\rm HFP}$.

Напротив, если частота волны накачки заметно ниже критической частоты f_{0F_2} , то и область нагрева сдвигается на высоты ниже максимума F-слоя — соответственно, частоты нижнегибридных волн, генерируемых в области нагрева, ниже максимальных частот нижнего гибридного резонанса над этой областью. В таком случае волны с частотой, близкой к $f_{\rm H\Gamma P}$, и большими углами между волновым вектором и магнитным полем вблизи резонансного конуса не могут распространяться вверх, где частота $f_{\rm H\Gamma P}$ возрастает. Вероятно, именно такая ситуация имела место

Е.Е. Титова, А.Г. Демехов, А.А. Мочалов и др.

во время события 10.02.2010, когда передатчик излучал на частоте 4,25 МГц, которая была заметно ниже критической частоты $f_{0F_2} = 5,5$ МГц: в этом случае область нагрева была смещена на $30 \div 40$ км вниз.

На рис. 7г прямоугольниками схематически показаны положения областей нагрева для событий 16.10.2009 и 10.02.2010. Из этой схемы ясно, что если из области нагрева распространяются резонансные волны, то во время события 16.10.2009 на спутнике DEMETER могут регистрироваться волны с частотами вблизи максимальной частоты $f_{\rm HFP}$. Более того, в работе [23] рассматривается возможность волноводного распространения свистовых ОНЧ волн 16.10.2009 в дакте электронной концентрации над областью нагрева, который регистрировался на спутнике DEMETER.

Для события 10.02.2010 волны с частотами вблизи максимальной частоты $f_{\rm HFP}$ регистрироваться не будут, поскольку они отразятся ниже максимума *F*-слоя. В то же время резонансные волны с частотами $2f_{\rm HFP}$ (соответствующие компоненте 2DM) будут беспрепятственно распространяться от области нагрева вверх, поскольку их часто́ты выше максимальной частоты́ $f_{\rm HFP}$ над областью нагрева. По-видимому, именно меньшим значением частоты́ передатчика HAARP и, соответственно, высоты области нагрева по отношению к максимуму *F*-слоя объясняется наличие только возмущений с частотами вблизи $2f_{\rm HFP}$ в событии 10.02.2010.

Как показывают расчёты на основе модели SAMI2 для события 10.02.2010, когда область нагрева располагалась на относительно малых высотах $h \approx 200$ км, в области достаточно сильных межчастичных столкновений, дакт концентрации над областью нагрева не образуется, что подтверждают измерения концентрации холодной плазмы на спутнике DEMETER. В таком случае ОНЧ волны будут распространяться в неканализированном режиме, и, поскольку угол между групповой скоростью резонансных волн и геомагнитным полем увеличивается с частотой, волны с минимальными частотами будут наблюдаться ближе к центру области нагрева, в то время как волны с более высокими частотами будут отклоняться от центра области нагрева на большее расстояние. Этим обстоятельством можно объяснить уменьшение нижней границы частотного интервала возмущений при приближении к центру области, которое наблюдалось 10.02.2010 (см. рис. 5*a*).

Отметим, что подобное поведение динамического спектра (уменьшение характерной частоты с приближением спутника к силовой трубке, опирающейся на локальный источник, и обратная эволюция при удалении спутника от источника) имеет место для естественных ОНЧ излучений типа «saucers» (с динамическим спектром в форме блюдца или буквы V [24]) и авроральных шипений на больших высотах [25]. Указанное поведение спектров естественых ОНЧ излучений аналогично объясняется особенностями распространения квазирезонансных ОНЧ волн.

Отметим, что в наблюдениях [3–5] над стендом «Сура» КНЧ/ОНЧ возмущения во всех случаях коррелировали с наличием дакта электронной концентрации на высоте спутника DEMETER и наблюдались внутри дакта.

Перейдём к обсуждению свойств КНЧ возмущений. По-видимому, следует выделить два основных возможных сценария их генерации: 1) возникновение плазменных возмущений в результате нелинейных процессов в области нагрева и их последующее распространение к точке регистрации; 2) генерация плазменных возмущений вне области нагрева за счёт модификации функции распределения заряженных частиц.

В предыдущих работах в основном обсуждался второй сценарий: генерация КНЧ возмущений связывалась с образованием в области высокочастотного нагрева ускоренных электронов, их последующим движением вверх вдоль геомагнитных силовых линий и возбуждением потоковых неустойчивостей. В частности, в работе [1] рассматривалась локальная (вблизи точки наблюдения) генерация квазиэлектростатических КНЧ возмущений пучком ускоренных электронов,

формирующимся за счёт зависимости времени прихода электронов в точку генерации от их скорости. В работе [26] также предлагается объяснить наблюдавшиеся КНЧ возмущения порождаемой быстрыми электронами неустойчивостью быстрой магнитозвуковой моды.

Отметим, что в работах [1, 26] обсуждаются наблюдения КНЧ возмущений в верхней ионосфере в ночные часы, в то время как рассмотренные в настоящей статье КНЧ сигналы, связанные с работой передатчика НААRP, наблюдались в дневное время, т.е. при высокой концентрации плазмы, что существенно сужает область развития пучковой неустойчивости. Такой сценарий трудно применить к анализируемым нами наблюдениям (событие 10.02.2010), поскольку КНЧ возмущения имеют практически неизменную интенсивность и в паузах во время модулированного нагрева (период модуляции 1,4 с). Длительность пауз составляла 0,7 с, что примерно равно времени движения электронов с типичными надтепловыми энергиями (порядка 1 эВ) от области нагрева до высот спутника DEMETER (расстояние около 400 км). В этих условиях можно было бы ожидать заметной, пусть и не полной, модуляции КНЧ возмущений с тем же периодом. Отсутствие такой модуляции позволяет предположить, что КНЧ возмущения порождаются непосредственно в области искусственной ионосферной турбулентности, характеристики которой мало меняются в течение паузы между импульсами нагревного излучения, т. к. времена релаксации плазменных неоднородностей составляют несколько секунд [2]. Рассмотрим это предположение более подробно.

Если считать КНЧ возмущения квазистатическими, т. е. предполагать, что частота возмущения ω' в собственной системе отсчёта ионосферной плазмы много меньше доплеровского слагаемого $k_{\perp}V$, где k_{\perp} — модуль проекции волнового вектора на траекторию спутника, V — скорость спутника, то наблюдаемый диапазон частот возмущений $10\div1250$ Гц соответствует поперечным к геомагнитному полю пространственным масштабам электрических полей $6\div800$ м. Таким образом, в данном предположении масштабы неоднородностей электронной концентрации, соответствующие наблюдаемым КНЧ возмущениям, совпадают с известными характерными масштабами искусственной ионосферной турбулентности в области нагрева $1\div10^3$ м [2].

Существование больши́х масштабов в пространственном спектре ионосферной турбулентности продемонстрировал, в частности, ракетный эксперимент [27], согласно результатам которого мелкомасштабные неоднородности с характерным размером 7÷10 м объединены в группы с поперечными размерами около 100 м и больши́е зоны с масштабами 1÷3 км. Формирование таких групп плазменных неоднородностей описывает теория стационарного режима тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости [28], согласно которой процесс возбуждения волной накачки группы стационарных неоднородностей оказывается более эффективным, чем возбуждение отдельных неоднородностей.

Напомним, что КНЧ возмущения над нагревным стендом иногда представляли собой последовательность импульсов с характерным квазипериодом: на рис. 3 показан пример, когда характерное время между импульсами КНЧ возмущений составляет около 0,4 с, что соответствует пространственной модуляции возмущений с масштабами как раз около 3 км. Таким образом, спектральные характеристики КНЧ возмущений могут быть объяснены наличием на высотах спутника DEMETER квазистатических неоднородностей электронной концентрации с характерными пространственными масштабами, наблюдаемыми в области искусственной ионосферной турбулентности.

Нетрудно получить оценку амплитуды возмущений электронной концентрации (относительно концентрации ионов) исходя из напряжённости измеренного электрического поля и равенства $\omega = k_{\perp}V$. Используя уравнение Пуассона в системе СГСЭ, получаем

$$\Delta N_{\rm e} = E\omega/(4\pi eV),$$

Е.Е. Титова, А.Г. Демехов, А.А. Мочалов и др.

где e — элементарный заряд. Для измеренных в событии 10.02.2010 полей $E \approx 100$ мкВ/м на частоте $f = \omega/(2\pi) = 100$ Гц имеем $\Delta N_{\rm e} \approx 4.5 \cdot 10^{-4}$ см⁻³. Поскольку плазменные возмущения предполагаются стационарными, то поперечное к геомагнитной силовой линии электрическое поле на высоте спутника можно считать практически равным полю в *F*-области ионосферы, т.е. аналогичные оценки применимы и для области нагрева (изменением диаметра магнитной трубки в этих оценках можно пренебречь). Как видим, речь идёт об очень небольших изменениях концентрации электронов по сравнению с обычными для области нагрева значениями $\Delta N_{\rm e}/N_{\rm e} \approx 1\div10$ %. Однако в последнем случае речь идёт о неоднородностях концентрации квазинейтральной плазмы (продольные к геомагнитному полю масштабы таких неоднородностей не превышают 15÷20 км), в то время как приведённая выше оценка по напряжённости электрического поля соответствует именно нарушению квазинейтральности.

Следует отметить, что квазистатические возмущения электрического поля, в силу высокой проводимости плазмы вдоль магнитного поля, должны быть привязаны к геомагнитным силовым линиям. В то же время зона КНЧ возмущений на высоте спутника DEMETER, как указано в разделе 2.1, была примерно в 3,5 раза шире, чем пятно засветки ионосферы нагревной волной на высоте отражения по уровню половинной мощности. Однако высокая мощность передатчика НААRP могла обеспечить генерацию ионосферной турбулентности как на далёкой периферии пятна засветки (где плотность потока энергии нагревного излучения падала в 30÷50 раз по сравнению с центром пятна), так и в боковых лепестках диаграммы направленности стенда. Поэтому, на наш взгляд, большой размер области возмущений не даёт оснований для отклонения гипотезы об их квазистатическом характере.

Вообще говоря, наблюдениям не противоречит и переменный характер возмущений. В этом случае их поперечные к геомагнитному полю масштабы надо оценивать по формуле $l_{\perp} \sim V/|f - f'|$, где f' и f — частота возмущения в собственной системе отсчёта ионосферной плазмы и частота, измеренная на спутнике. Эксперимент говорит о наличии в спектре искусственной ионосферной турбулентности как ионно-звуковых компонент с характерными частотами порядка 10 Гц, так и ионных циклотронных гармоник в диапазоне ниже 700 Гц [29, 30].

Ионные циклотронные гармоники в спектре искусственного радиоизлучения ионосферы наблюдались лишь при нагреве на частотах, очень близких (с точностью до 3 кГц) ко второй и третьей гармоникам электронной гирочастоты. В событии 10.02.2010 частота нагревного излучения 4,25 МГц была близка к третьей гармонике гирочастоты, в то время как в сеансе 16.09.2009 частота нагревной волны (5,1 МГц) не совпадала ни с одной из гирогармоник, но при этом была близка к критической частоте слоя F_2 .

Отметим, что гирочастота ионов кислорода на ионосферных высотах составляет около 50 Гц, и в наземных наблюдениях искусственного радиоизлучения ионосферы этот частотный масштаб проявляется в виде чётко выраженных спектральных максимумов (более 10 гармоник) с глубиной модуляции до 10 дБ [30]. В наблюдениях КНЧ возмущений на спутнике DEMETER такой чёткой спектральной структуры не наблюдается, но это не исключает связи плазменных возмущений с ионно-циклотронной турбулентностью в зоне нагрева, поскольку при некотором разбросе значений k_{\perp} доплеровский сдвиг вполне может «размыть» эти максимумы. Действительно, характерные пространственные масштабы возбуждаемых при параметрической неустойчивости ионно-циклотронных бернштейновских мод по порядку величины соответствуют ионному гирорадиусу, т. е. $l_{\perp} \sim 20$ м. Аналогичные оценки имеют место и для ионно-звуковых мод.

Таким образом, наблюдаемые на спутнике DEMETER КНЧ возмущения над зоной нагрева могут быть обусловлены как ионно-звуковой (вплоть до квазистатических возмущений), так и ионно-циклотронной ионосферной турбулентностью. Что касается возможности распространения КНЧ возмущений от области нагрева (высота $h \approx 250$ км) до области наблюдения ($h \approx 700$ км),

то этот вопрос заслуживает отдельного рассмотрения с учётом рефракции и поглощения низкочастотных волн, что выходит за рамки данной работы. Отметим, что ионно-звуковые волны возбуждаются с достаточно большими продольными компонентами k_{\parallel} волнового вектора по отношению к геомагнитному полю (см., например, результаты моделирования [31]), т.е. $k_{\parallel} \gtrsim k_{\perp}$, в то время как для ионно-циклотронных волн $k_{\parallel} \approx (0,2\div0,3) k_{\perp}$. Подчеркнём ещё раз, что для объяснения отсутствия сколько-нибудь заметной модуляции КНЧ возмущений при модулированном нагреве ионосферы необходимо предположить, что время жизни таких колебаний составляет не менее 1 с.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты измерений характеристик электромагнитных возмущений в КНЧ ($f < 1,25 \ \kappa\Gamma \mu$) и ОНЧ ($f < 20 \ \kappa\Gamma \mu$) диапазонах над мощным высокоширотным коротковолновым стендом НААRР, выполненных на спутнике DEMETER (высота орбиты над Землёй около 700 км). Проанализированы 13 событий (7 дневных, $LT = 11 \div 12 \ v$, и 6 ночных, $LT = 22 \div 23 \ v$), в которых нагрев ионосферы осуществлялся высокочастотными волнами О-поляризации при максимальной мощности излучения стенда 3,6 МВт. Во время дневных пролётов передатчик излучал на частотах 4÷7 МГц, близких к критической частоте ионосферного слоя F, но не превышающих её; в ночные часы частота передатчика НААRР лежала вблизи второй гармоники электронной гирочастоты (2,8 МГц); время нагрева до пролёта спутника DEMETER составляло 10÷15 минут.

КНЧ/ОНЧ возмущения, обусловленные воздействием передатчика HAARP, зарегистрированы только для трёх дневных (LT = $11\div12$ ч) событий при нагреве *F*-области ионосферы. Эти возмущения наблюдались в электрических компонентах электромагнитного поля в зоне с характерным размером около 100 км. Амплитуда КНЧ возмущений увеличивалась над областью нагрева в $2\div8$ раз по сравнению с фоновым уровнем шумов. КНЧ возмущения, обусловленные воздействием передатчика НААRP на *F*-область ионосферы, имели преимущественно перпендикулярную по отношению к геомагнитному полю поляризацию. В ОНЧ диапазоне возмущения, обусловленные работой стенда НААRP, регистрировались на частотах $8\div10$ кГц, близких к частоте нижнего гибридного резонанса $f_{\rm HFP}$ в области нагрева, а также в диапазоне $15\div18$ кГц, лежащем вблизи частоты $2f_{\rm HFP}$.

При работе нагревного стенда в импульсном режиме с периодом 1,4 с (наблюдения 10.02.2010) в ОНЧ диапазоне регистрировалась модуляция амплитуды возмущений с этим же периодом, в то время как в электростатических КНЧ возмущениях модуляция не наблюдалась.

ОНЧ возмущения над передатчиком HAARP на частотах, близких к гармоникам $f_{\rm HFP}$ и $2f_{\rm HFP}$ в области нагрева, генерируются, по-видимому, в этой области в результате распада верхнегибридной волны на другую верхнегибридную волну и нижнегибридную волну с последующим распространением нижнегибридной волны в квазиэлектростатическом (резонансном) режиме и/или её трансформацией в электромагнитную свистовую волну. В частности, спектральные особенности ОНЧ возмущений, зарегистрированные над передатчиком HAARP 10.02.2010, можно объяснить спецификой распространения ОНЧ волн с волновыми векторами, лежащими вблизи резонансного конуса, от области нагрева до спутника DEMETER. Спектральные особенности ОНЧ волн вблизи частоты $2f_{\rm HFP}$ объясняются частотной зависимостью угла между вектором их групповой скорости и геомагнитным полем, а отсутствие максимума амплитуды возмущений вблизи частоты $f_{\rm HFP}$ — отражением этих резонансных волн от вышележащих областей ионосферы.

К сожалению, данные не позволяют однозначно определить механизм, ответственный за генерацию КНЧ возмущений на высотах спутника DEMETER при работе передатчика HAARP. Отсутствие периодической модуляции КНЧ шумов при модулированном нагреве ионосферы с пе-

риодом 1,4 с позволяет предположить, что обсуждаемые сигналы связаны с мелкомасштабными неоднородностями, формируемыми в области нагрева и имеющими времена жизни от нескольких секунд и дольше. В предположении квазистатического характера данных полей, т.е. связи их частоты с эффектом Доплера, их пространственные масштабы хорошо соответствуют известным масштабам искусственной ионосферной турбулентности, включая и группы неоднородностей с километровыми размерами. В принципе, нельзя исключить наличие в верхней ионосфере над мощным передатчиком различных типов КНЧ возмущений, обусловленных как нелинейными процессами в области нагрева, так и возбуждением пучками электронов. Однако ответы на эти вопросы требуют специальных спутниковых экспериментов и более детальной обработки данных, которая может позволить разделить КНЧ возмущения, обусловленные различными механизмами.

Авторы выражают благодарность Г.М. Милиху и А.Б. Пашину за полезные обсуждения, а также рецензенту за важные замечания по содержанию статьи. Работа частично поддержана программой № 22 Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследования и освоения Солнечной системы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Vas'kov V. V., Bud'ko N. I., Kapustina O. V. // J. Atmos. Solar.-Terr. Phys. 1998. V. 60. P. 1261.
- Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. С. 330.
- Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51. С. 915
- 4. Рапопорт В. О., Фролов В. Л., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. С. 709.
- Rapoport V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V., et al. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. no. A10322.
- 6. Марков Г. А., Белов А. С., Фролов В. Л. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51. С. 925.
- 7. Piddyachiy D., Bell T. F., Berthelier J. J., et al. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art. no. A06304.
- 8. Berthelier J. J., Godefroy M., Leblanc F., et al. // Planet. Space Sci. 2006. V. 54. P. 456.
- Vartanyan A., Milikh G.M., Papadopoulos K., et al. // J. Geophys. Res. 2012. V.117. Art. no. A10307.
- 10. Milikh G. M., Papadopoulos K., Shroff H., et al. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. Art. no. L07803.
- Milikh G. M., Vartanyan A., Papadopoulos K., et al. // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2011. V.73. P. 1674.
- 12. Гуревич А. В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177. С. 1145.
- 13. Perkins F. W., Oberman C., Valeo E. J. // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 1478.
- 14. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. С. 188.
- 15. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Журн. экспер. теор. физ. 1975. Т. 69. С. 176.
- 16. Грач С. М., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. С. 1288.
- 17. Васьков В. В., Гуревич А. В. // Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 81.
- 18. Литвак А. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11. С. 1433.
- 19. Leyser T. B. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98, No. 3–4. P. 223.
- 20. Sergeev E. N., Frolov V. L., Grach S. M., Kotov P. V. // Adv. Space Res. 2006. V. 38. P. 2518.
- 21. Boshkova Ja., Jricek F., Shklyar D., et al. // Adv. Space Res. 1988. V. 8, No. 8. P. 133.

- 22. Huba J. D., Joyce G., Fedder J. A. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, No. A10. P. 23035.
- Woodroffe R., Streltsov A. V., Vartanyan A., et al.// J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. P. 7011.
- 24. James H. G. // J. Geophys. Res. 1976. V. 81, No. 4. P. 501.
- 25. Titova E. E., Yahnin A. G., Santolik O., et al. // Annales Geophysicae. V. 23, No. 6. P. 2117.
- Markov G. A., Belov A. S., Komrakov G. P., et al. // Plasma Phys. Reports. 2012. V. 38, No. 3. P. 219.
- 27. Kelley M. C., Arce T. L., Salowey J., et al. // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, No. A9. P. 17367.
- 28. Gurevich A. V., Hagfors T., Carlson H., et al. // Phys. Lett. A. 1998. V. 239. P. 385.
- 29. Samimi A., Scales W. A., Fu H., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. P. 502.
- Mahmoudian A., Scales W.A., Bernhardt P.A., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. P. 1 270.
- Samimi A., Scales W. A., Bernhardt P. A., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. P. 462.

Поступила в редакцию 15 августа 2014 г.; принята в печать 12 января 2015 г.

ELF/VLF PERTURBATIONS ABOVE THE HAARP TRANSMITTER RECORDED BY THE DEMETER SATELLITE IN THE UPPER IONOSPHERE

E. E. Titova, A. G. Demekhov, A. A. Mochalov, B. B. Gvozdevsky, M. M. Mogilevsky, and M. Parrot

In the studies of the data received from DEMETER (orbit altitude above the Earth is about 700 km), we detected for the first time electromagnetic perturbations, which are due to the ionospheric modification by HAARP, a high-power high-frequency transmitter, simultaneously in the extremely low-frequency (ELF, below 1200 Hz) and very low-frequency (VLF, below 20 kHz) ranges. Of the thirteen analyzed flybys of the satellite above the ELF/VLF heating area, the signals were detected in three cases in the daytime (LT = 11-12 h), when the minimum distance between the geomagnetic projections of the satellite and the heating area center on the Earth's surface did not exceed 31 km. During the nighttime flybys, the ELF/VLF perturbations were not detected. The size of the perturbed region was about 100 km. The amplitude, spectrum, and polarization of the ELF perturbations were analyzed, and their comparison with the characteristics of natural ELF noise above the HAARP transmitter was performed. In particular, it was shown that in the daytime the ELF perturbation amplitude above the heating area can exceed by a factor of 3–8 the amplitude of natural ELF noise. The absence of the nighttime records of artificial ELF/VLF perturbations above the heating area can be due to both the lower frequency of the heating signal, at which the heating occurs in the lower ionosphere, and the higher level of natural noise. The spectrum of the VLF signals related to the HAARP transmitter operation had two peaks at frequencies of 8–10 kHz and 15–18 kHz, which are close to the first and second harmonics of the lower-hybrid resonance in the heating area. The effect of the whistler wave propagation near the lower-hybrid resonance region on the perturbation spectrum recorded in the upper ionosphere for these signals has been demonstrated. In particular, some of the spectrum features can be explained by assuming that the VLF signals propagate in quasiresonance, rather than quasilongitudinal, regime. It is noted that the profile and dynamics of the ELF perturbation frequency spectrum conform to the assumption of their connection with quasistatic small-scale electrondensity inhomogeneities occurring in the heating region and having lifetimes of a few seconds or more. The possible mechanisms of the ELF/VLF perturbation formation in the ionospheric plasma above the high-latitude HAARP facility at the DEMETER flyby altitudes are discussed.

Е.Е. Титова, А.Г. Демехов, А.А. Мочалов и др.