

УДК 533.951.7

## ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИОНОСФЕРУ КАЧАЮЩИМСЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ЛУЧОМ, ПО ДАННЫМ IN SITU ИЗМЕРЕНИЙ

© 2022 г. А. С. Белов\*

Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова,  
г. Нижний Новгород, Россия

\*e-mail: alexis-belov@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.06.2021 г.

После доработки 21.09.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик низкочастотных излучений, возбуждаемых при воздействии на ионосферу Земли двух немодулированных волн накачки с расстройкой по частоте, излучаемых пространственно-разделенными антенными подрешетками высокоширотного нагревного стенда EISCAT-heating. In situ измерения характеристик генерируемых низкочастотных сигналов проведены на высотах ~660 км с помощью бортовой аппаратуры микроспутника DEMETER. В работе определены пространственные и амплитудные характеристики низкочастотных излучений. Показано, что зарегистрированные значения напряженности электрического поля возбуждаемых излучений (~3 мкВ/м днем и ~50 мкВ/м для ночных условий) при данной схеме генерации даже в условиях далеко неоптимальной комбинации параметров воздействия сопоставимы с уровнями сигналов при нагреве с помощью промодулированного по амплитуде мощного высокочастотного излучения, что открывает потенциальные возможности для значительного увеличения эффективности излучения низкочастотных волн.

DOI: 10.31857/S0016794022020031

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение ионосферно-магнитосферных связей и возможностей воздействия на них с помощью существующих радиотехнических средств является важной задачей современной радиофизики [Благовещенская, 2001; Гуревич, 2007; Robinson, 1989]. Высокоширотная ионосфера наиболее тесным образом связана с магнитосферой, отражая протекающие в ней процессы. Поэтому исследования явлений, связанных с потоками энергичных частиц, существованием интенсивных электрических полей и токов магнитосферного происхождения, магнитными бурями и полярными сияниями, вызывают повышенный научный и практический интерес [Мизун, 1980]. Особое место здесь занимает возможность активного волнового воздействия на указанные процессы. В качестве такого способа воздействия может рассматриваться инжекция во внешнюю ионосферу и магнитосферу Земли искусственно генерируемых низкочастотных радиоволн, которые способны взаимодействовать с высокоэнергичными частицами радиационных поясов, сти-

мулируя их высыпания [Беспалов и Трахтенгерц, 1986; Ковражкин и др., 1983; Inan et al., 2003].

Традиционная схема генерации низкочастотных волн реализуется при нагреве  $D$ - и  $E$ -областей ионосферы (высоты 90–110 км) с помощью промодулированного по амплитуде низкой частотой  $F_{\text{mod}}$  высокочастотного (ВЧ) излучения нагревного стенда. Воздействие мощного радиоизлучения на нижнюю ионосферу вызывает колебания температуры электронов  $\Delta T_e$ , которые модулируют частоту столкновений электронов, а следовательно и проводимость ионосферной плазмы  $\sigma_e$ . Как следствие этого, появляется нелинейный переменный ток, который является искусственным ионосферным источником радиоизлучения на частоте модуляции. Данное явление нелинейного детектирования в ионосфере известно как “эффект Гетманцева” [Гетманцев и др., 1974]. Зависимость интенсивности генерируемых по данной схеме низкочастотных сигналов, принимаемых наземными средствами регистрации, от геофизических условий исследовалась во многих работах (см., например, [Капустин и др., 1977; Jin et al., 2009; Rietveld et al., 1987]).

В них было установлено, что в полярных широтах интенсивность излучения на частотах модуляции зависит от силы ионосферного тока и расстояния между электроструей и центром области воздействия. Высокие значения амплитуды генерируемых низкочастотных сигналов, в основном, наблюдаются при усилении тока электроструи во время геомагнитных возмущений. При этом эффективность излучения (отношение эффективной мощности излучения ВЧ-волны накачки к уровню излучаемой мощности низкочастотного сигнала) остается сравнительно низкой и составляет  $\sim 0.001\%$  [Moore et al., 2007].

Другая схема, позволяющая значительно (на 10–20 дБ) увеличить уровень возбуждаемых низкочастотных сигналов [Cohen et al., 2012], основана на одновременном излучении разнесенными в пространстве источниками двух немодулированных волн накачки, имеющих расстройку по частоте. Взаимодействие высокочастотных радиоволн за счет тепловой [Гуревич и Шварцбург, 1973] нелинейности создает движущуюся, поляризованную электростатическим полем, неоднородность проводимости нижней ионосферы, вызывающую возмущения ионосферного тока  $\delta J_e$ . При этом двигаться она (“качающийся луч”) будет со скоростью  $v$ , определяющейся расстройкой частот  $F$  и отношением расстояния между фазовыми центрами источников  $d$  и высоты  $h$ . Возмущения тока  $\delta J_e$  будут двигаться со сверхсветовой скоростью, а сам ток являться виртуальным источником излучения на разностной частоте  $F$  в случае выполнения условия

$$F/f_{\text{pump}} > d/h, \quad (1)$$

где  $f_{\text{pump}}$  – частота ВЧ-волны накачки.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик излучений сверхнизкочастотного (СНЧ) диапазона, индуцируемых на высотах внешней ионосферы при воздействии высокоширотного нагревного стенда EISCAT-heating ( $69.58^\circ \text{N}$ ,  $19.22^\circ \text{E}$ ) [Rietveld et al., 1993] в режиме качающегося луча. Исследования выполнялись в рамках нагревных кампаний, проводимых на стенде EISCAT-heating с участием Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) в марте и ноябре 2010 г.

В этих исследованиях характеристики электромагнитных и плазменных возмущений измерялись на высоте  $\sim 660$  км с помощью бортовой аппаратуры микроспутника DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) [Cussac et al., 2006].

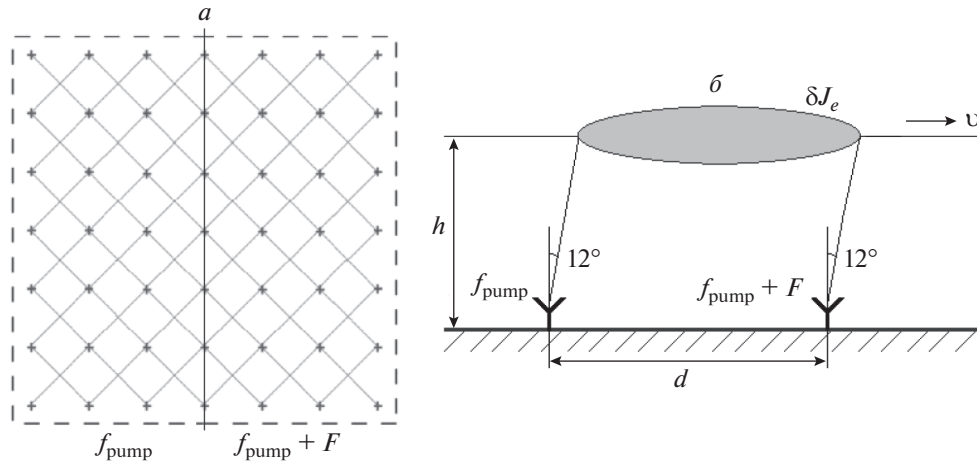
## 2. СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Впервые эксперименты по исследованию пространственных и амплитудных характеристик низкочастотных излучений, возбуждаемых двумя немодулированными волнами накачки, имеющих расстройку по частоте, были проведены на среднеширотном нагревном стенде “Сура” [Котик и др., 1986; Мироненко и др., 1998]. Кроме этого, аналогичные экспериментальные работы выполнялись на стендах Arecibo [Werner and Ferraro, 1987], EISCAT-heating [Barr et al., 1987; Barr and Stubbe, 1997], HIPAS [Villaseñor et al., 1996] и HAARP [Kuo et al., 2012; Moore et al., 2012]. В проведенных исследованиях пространственные и амплитудные параметры низкочастотных излучений регистрировались с использованием наземных средств.

Достоверность результатов наземных измерений характеристик низкочастотных излучений при наличии крайне интенсивных ВЧ-сигналов, содержащих эти же частоты, может вызвать сомнения. In situ измерения СНЧ-полей в экспериментах, в которых мощные ВЧ-радиоволны отражаются от ионосферы и не проходят до спутниковых высот, являются более корректными.

Для традиционной схемы генерации низкочастотных волн при нагреве нижней ионосферы ВЧ-излучением нагревного стенда одними из первых in situ измерения были выполнены с помощью спутников ISIS 1 [James et al., 1984] и AUREOL-3 [Lefeuvre et al., 1985]. Полномасштабные спутниковые измерения были выполнены в серии экспериментов “HAARP-DEMETER” [Pidyachiy, 2012]. При этом, характеристики НЧ-сигналов, возбуждаемых двумя немодулированными волнами накачки, имеющих расстройку по частоте, на высотах внешней ионосферы Земли остаются неизученными.

В представленных исследованиях воздействие осуществлялось с помощью нагревного стенда EISCAT-heating. На рис. 1 представлена схема проведения экспериментальных исследований. При проведении экспериментов антенная решетка стенда разделялась на две подрешетки (панель  $a$  рис. 1). Одна из антенных подрешеток запитывалась от шести передатчиков на одной несущей частоте  $f_{\text{pump}}$ , другая – от шести других коротковолновых радиопередатчиков на частоте  $f_{\text{pump}} + F$ . Каждая из подрешеток состояла из 3 рядов по 6 скрещенных диполей. Подрешетка, излучающая на частоте  $f_{\text{pump}}$ , пространственно была смещена в северном направлении относительно второй подрешетки. Расстояние между фазовыми центрами излучающих подрешеток  $d = 135$  м. Значения расстройки частот  $F$  в выполненных экспериментах составляло 1000 и 1178 Гц.



**Рис. 1.** Схема проведения экспериментальных исследований характеристик низкочастотных излучений при воздействии высокоширотного нагревного стенда EISCAT-heating в режиме качающегося луча.

Интерференционная картина высокочастотных радиоволн двух подрешеток формировала возмущения ионосферного тока  $\delta J_e$ , которые являлись источником низкочастотного излучения на разностной частоте  $F$  (панель б рис. 1).

К сожалению, представленная комбинация параметров воздействия является неоптимальной (условие (1) не выполнено) для постановки экспериментов со сверхсветовым источником. В то же время, скорость перемещения максимумов интерференционного поля  $v$  (скорость сканирования ВЧ-луча) близка к скорости света, когда период допустимой расстройки  $F$  сравним со временем установления возмущений температуры электронов на высотах генерации НЧ-излучений  $(\delta v_e)^{-1}$ , что реализуется в проводимых экспериментах и обеспечивает близкий к максимальному коэффициент взаимодействия волн.

In situ измерения характеристик генерируемых низкочастотных излучений на высоте  $\sim 660$  км проводились с помощью бортовой аппаратуры микроспутника DEMETER, позволявшей регистрировать значения напряженности электрического поля в диапазоне частот от 0 до 3.5 МГц, а магнитного поля – от 10 Гц до 20 кГц. В измерениях использовался режим регистрации “burst mode”, во время которого функционировали все приборы микроспутника, и приемная аппаратура работала с максимальной скоростью оцифровки данных.

Следует отметить, что по договоренности с центром управления микроспутником DEMETER его измерительная аппаратура специально включалась на короткое время, когда спутник пролетал над нагревным стендом EISCAT-heating, хотя в стандартном режиме функционирования она была выключена на широтах выше  $60^\circ$  N.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ IN SITU ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЧАСТОТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Из всего объема экспериментов по программе “EISCAT-heating – DEMETER” схема воздействия на ионосферу Земли с использованием двух немодулированных волн накачки с расстройкой по частоте в СНЧ-диапазоне, излучаемых пространственно разделенными антенными подрешетками высокоширотного стенда, была реализована только в 4 сеансах нагрева.

В таблице 1 представлены экспериментальные данные по проведенным сеансам нагрева. В первом столбце приведен порядковый номер сеанса. Дата проведения эксперимента, время  $T_{\min}$  (UT), соответствующее минимальному значению расстояния  $D_{\min}$  от траектории движения микроспутника DEMETER до центра области нагрева, представлены во втором столбце таблицы. В третьем столбце приведены параметры мощного КВ-радиоизлучения: значение несущей частоты  $f_{\text{pump}}$ , расстройка частот  $F$ , поляризация и направление излучения волн накачки. Данные о геофизических условиях указаны в столбце 4, где представлены значения индексов геомагнитной возмущенности  $K_p$  и  $AE$ , а также значения критической частоты для  $E$ -области ионосферы ( $f_{X-E}$  или  $f_{O-E}$ ). В пятом столбце приведены основные характеристики наблюдаемых на высоте  $\sim 660$  км низкочастотных излучений, а именно: максимальное значение напряженности электрического поля  $E_{\max}$  на частоте  $F$  и пространственные характеристики области регистрации в виде интервала времени, когда интенсивность СНЧ-излучения была выше шумового уровня и положения зоны с уровнем сигнала, соответствующим  $E_{\max}$ .

**Таблица 1.** Экспериментальные данные по проведенным сеансам нагрева

№	Дата сеанса; время $T_{\min}$ , UT; расстояние $D_{\min}$ , км	$f_{\text{pump}}$ , кГц; $F$ , Гц; направление излучения волн накачки	$K_p$ ; $AE$ , нТл; $f_{X-E}$ или $f_{O-E}$ , МГц	Характеристики СНЧ-излучений: $E_{\max}$ , мкВ/м; область регистрации
1	13.03.2010 г.; 09:51:58; 17	4299.9; 1000; вдоль геомагнитного поля	0+; 40; 2.3 ( $f_{O-F2} = 4.8$ МГц)	3; 09:51:37–09:52:09 (протяженность 240 км), максимум смещен в северном направлении на 85 км
2	06.11.2010 г.; 09:58:47; 181	5423; 1178; вдоль геомагнитного поля	0; 30; 2.2	СНЧ-излучение не зарегистрировано
3	08.11.2010 г.; 18:58:03; 15	4040; 1178; вдоль геомагнитного поля	1+; 145; 5 ( $E$ -слой диффузный)	50; 18:57:36–18:58:55 (протяженность 600 км), максимум смещен в северном направлении на 110 км
4	12.11.2010 г.; 09:43:10; 22	4040; 1178; вдоль геомагнитного поля	4-; 661; 4	СНЧ-излучение не зарегистрировано

В проведенных экспериментах для дневных сеансов использовалась  $O$ -поляризация излучения волн накачки, для вечернего сеанса 08.11.2010 г. —  $X$ -поляризация. Это было обусловлено программой работ “EISCAT-heating — DEMETER”, где дневные сеансы были нацелены на изучение свойств искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемой за счет развития параметрических неустойчивостей вблизи уровня отражения мощного высокочастотного радиоизлучения, а вечерние — на изучение свойств генерации низкочастотных сигналов.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты наблюдения генерации искусственных СНЧ-излучений на частоте расстройки двух немодулированных волн накачки  $F = 1000$  Гц для дневного сеанса № 1, проведенного 13.03.2010 г.

На рисунке 2а приведена в диапазоне частот до 1500 Гц для сеанса № 1 спектральная плотность сигнала  $E_x$  с электрической антенны прибора ICE микроспутника DEMETER, ортогональной к направлению геомагнитного поля. Фрагмент спектрограммы в диапазоне частот 980–1020 Гц представлен на рис. 2б.

Вариации величины напряженности электрического поля, выделенной в полосе  $\Delta f = 4.9$  Гц на частоте расстройки  $F$ , приведены на рис. 3а. Кроме того, на рис. 3в построена траектория движения микроспутника DEMETER для  $h = 100$  км, полученная путем параллельного переноса вдоль геомагнитного поля с высоты орбиты 660 км

(звездочкой на рисунке отмечено положение центра области нагрева). Зависимость от времени его расстояния  $D$  до центра области нагрева показана на рис. 3б.

В данном сеансе нагрева микроспутник DEMETER пересекал возмущенную область ионосферы двигаясь с северо-западного направления на юго-восток.

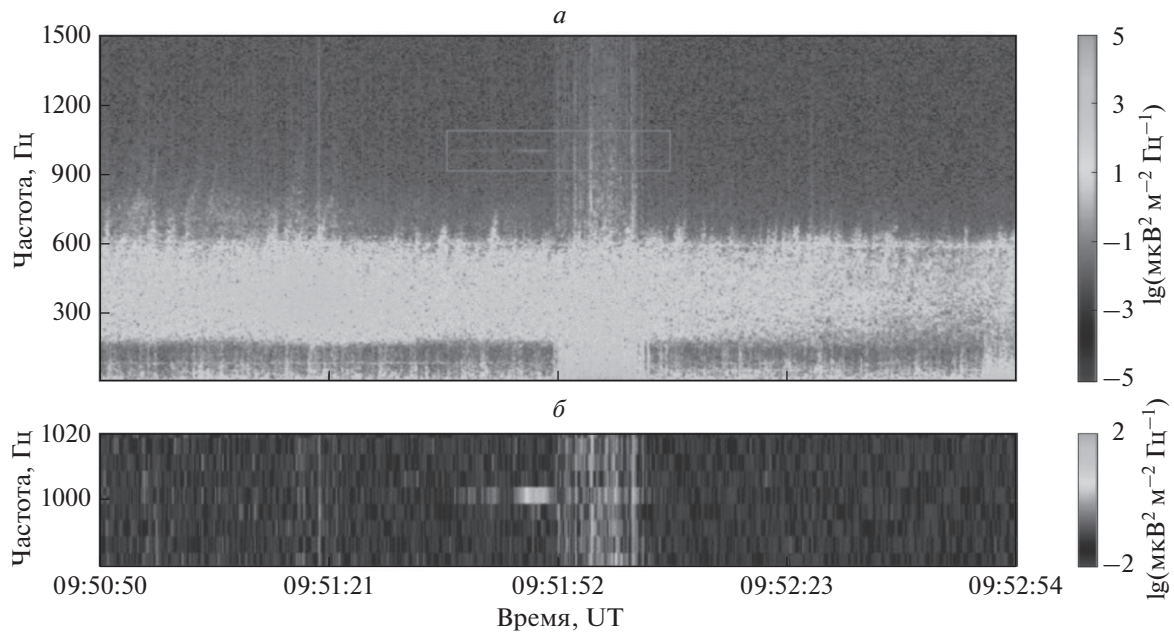
На представленной на рис. 2 динамической спектрограмме четко видна генерация искусственного СНЧ-излучения на частоте расстройки  $F = 1000$  Гц.

Амплитуда напряженности электрического поля низкочастотного сигнала по данным, представленным на рис. 3а, составила ~3 мкВ/м. СНЧ-излучение регистрировалось в течение ~30 с на расстояниях от центра области нагрева до 170 км в северном направлении и до 70 км в направлении на юг.

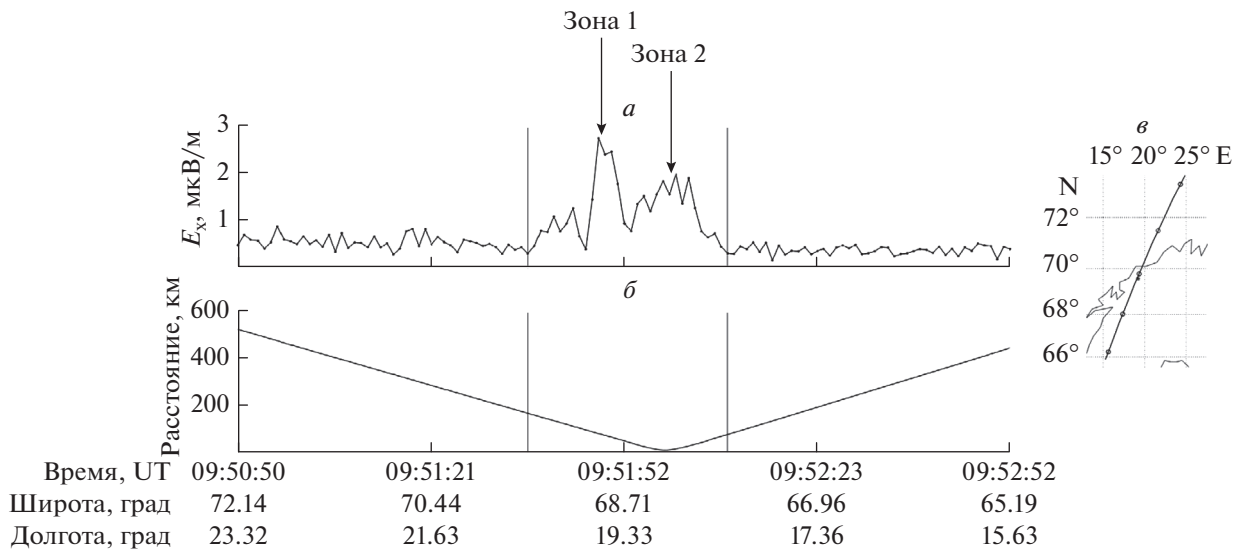
Область регистрации стимулированного низкочастотного излучения имеет существенно неоднородную пространственную структуру. В ней можно выделить две характерные области:

— зона с наибольшей интенсивностью излучения (“зона 1”) с поперечным масштабом 30 км, смещенная относительно центра области нагрева на север на расстояние порядка 85 км;

— зона с интенсивностью сигнала до 2 мкВ/м (“зона 2”), имеющая протяженность вдоль траектории движения микроспутника DEMETER 80 км и зарегистрированная пространственно



**Рис. 2.** Динамическая спектрограмма сигнала  $E_x$  с электрической антенны микроспутника DEMETER, ортогональной к направлению геомагнитного поля, для дневного сеанса нагрева № 1, проведенного 13.03.2010 г.

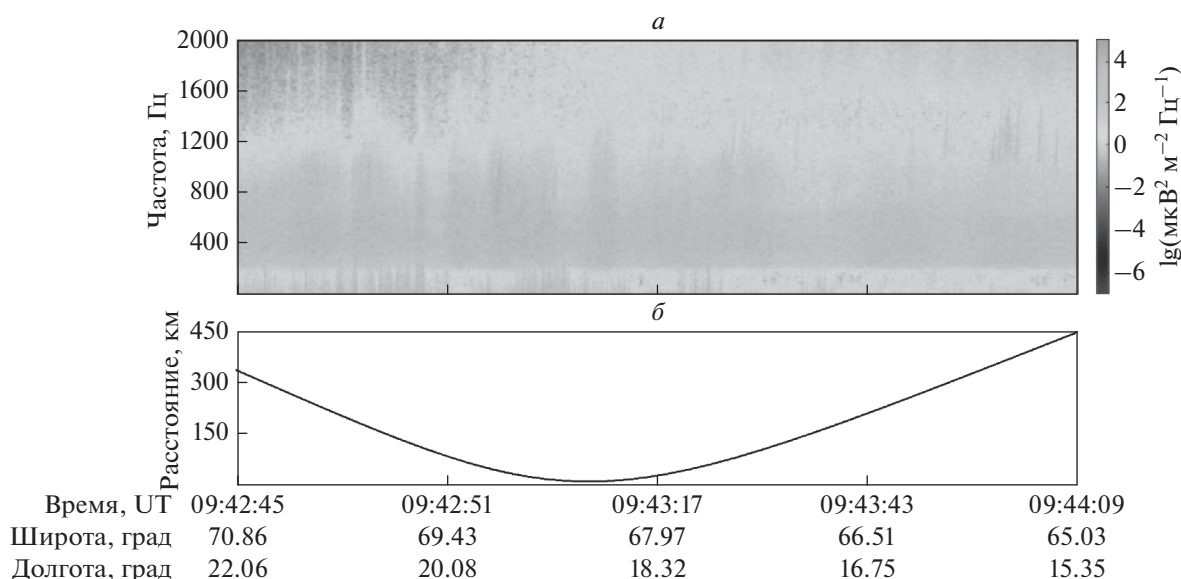


**Рис. 3.** Вариации величины напряженности электрического поля, выделенной в полосе  $\Delta f = 4.9$  Гц на частоте расстройки двух немодулированных волн накачки  $F = 1000$  Гц ( $a$ ), и параметры траектории пролета микроспутника DEMETER ( $b$  и  $\theta$ ) для сеанса № 1.

симметрично относительно центра области нагрева.

Представленные в табл. 1 данные показывают, что для двух других дневных сеансов нагрева (сеансы № 2 и 4) генерация СНЧ-излучений на комбинационных частотах не обнаружена. Для сеанса № 2 это обусловлено в первую очередь тем, что траектория пролета микроспутника DEMETER

проходила на значительном удалении от центра области нагрева ( $D_{\min} = 181$  км, что превышает размер области регистрации СНЧ-излучений для сеанса № 1). Для сеанса же № 4, в котором расстояние  $D_{\min}$  было оптимальным для обнаружения низкочастотных излучений и геомагнитная активность высокой, отсутствие регистрации, вероятно, обусловлено положением аврорального



**Рис. 4.** Динамическая спектрограмма сигнала  $E_x$  (а) с электрической антенны микроспутника DEMETER, ортогональной к направлению геомагнитного поля, а также зависимость от времени расстояния от траектории движения микроспутника до центра области нагрева (б) для сеанса № 4.

электроджета во время проведения измерений. Для иллюстрации этого, на рис. 4 и 5 представлена динамическая спектрограмма  $E_x$  для дневного сеанса 12.11.2010 г. (см. рис. 4а), а также динамика и положение эквивалентного ионосферного тока по данным сети MIRACLE (рис. 5).

На рисунке 4 виден высокий уровень естественных шумовых излучений в диапазоне частот ниже 1200 Гц, что свидетельствует о высоком уровне геомагнитной активности. В то же время, рис. 5 показывает, что в течение времени, соответствующего сеансу воздействия, электроджет был смещен в область полярных широт, что снижало эффективность генерации СНЧ-излучений.

Для вечернего сеанса № 3, проведенного 08.11.2010 г., на рис. 6 приведена в диапазоне частот до 2500 Гц динамическая спектрограмма сигнала  $E_x$  с электрической антенны, ортогональной к направлению геомагнитного поля. Фрагменты спектрограммы в диапазонах частот 1160–1200 Гц и 2340–2380 Гц представлены на панелях б и в рис. 6 соответственно.

На рисунке 6 выделены области регистрации искусственного СНЧ-излучения на частоте расстройки двух немодулированных волн накачки  $F = 1178$  Гц и ее второй гармоники на  $2F = 2356$  Гц. Кроме этого, на рис. 6 в диапазоне частот 1300–1600 Гц четко выделяются естественные электростатические сигналы на гармониках ионно-циклотронной частоты.

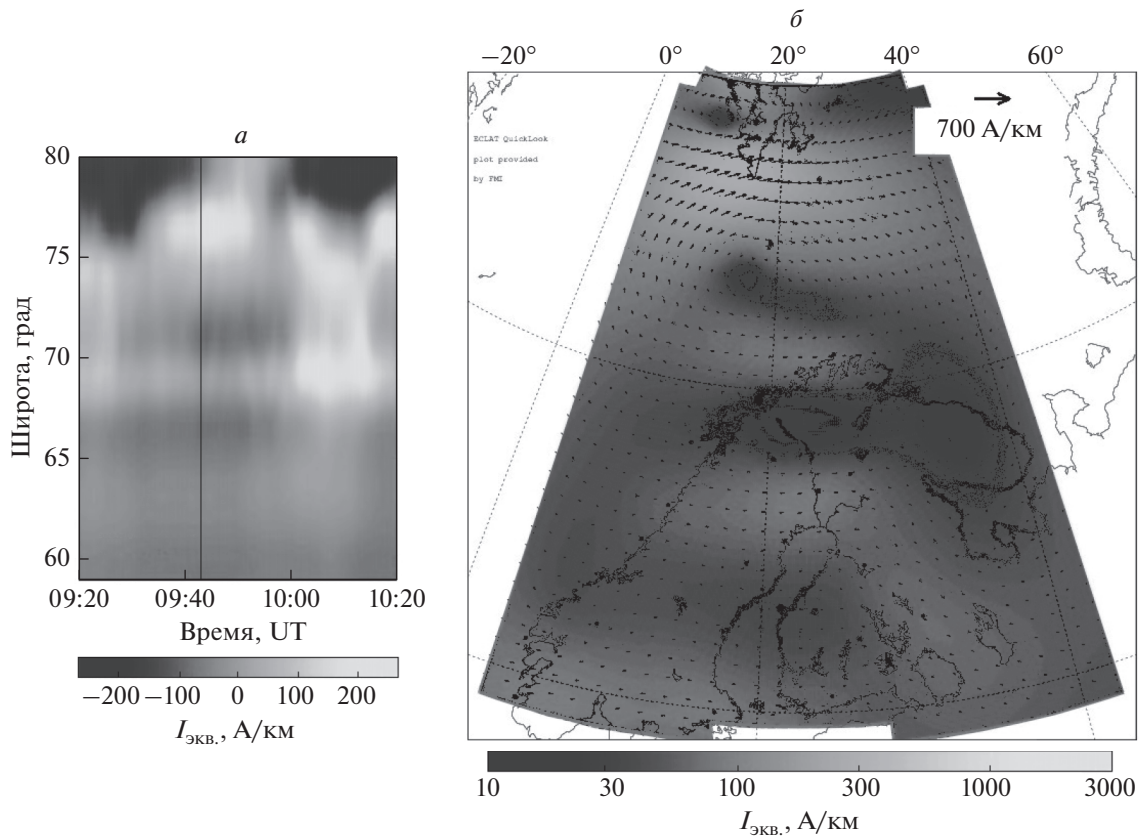
Вариации величины напряженности электрического поля, выделенной в полосе  $\Delta f = 4.9$  Гц

на частоте  $F$ , приведены на рис. 7а. Кроме того, на рис. 7 (панели б и в) приведены данные для сеанса № 3 о траектории пролета микроспутника DEMETER аналогично рис. 3. В данном сеансе нагрева микроспутник DEMETER пересекал возмущенную область ионосферы, двигаясь с юго-восточного направления на северо-запад.

Амплитуда напряженности электрического поля  $E_x$  на частоте  $F$  составила  $\sim 50$  мкВ/м. Данный уровень  $E_x$  находится в пределах динамического диапазона детектора электрического поля ICE микроспутника DEMETER, поэтому зарегистрированное излучение на  $2F$  с амплитудой до 5 мкВ/м не является результатом обработки или фантомным сигналом.

СНЧ-излучение на основной гармонике регистрировалось в течение 80 с на расстояниях от центра области нагрева до 200 км в южном направлении и до 400 км в направлении на север. Зона с наибольшей интенсивностью излучения (“зона 1”) с поперечным размером  $\sim 60$  км смещена в северном направлении на 110 км относительно центра области нагрева. Кроме того, аналогично сеансу № 1, наблюдается зона (“зона 2”) с интенсивностью в два раза меньше, чем в максимуме, имеющая протяженность вдоль траектории движения микроспутника DEMETER  $\sim 85$  км и регистрируемая пространственно симметрично относительно центра области нагрева.

Сигнал на второй гармонике низкочастотного излучения регистрируется в области, фактически совпадающей с зоной максимальной интенсивности СНЧ-излучения на частоте 1178 Гц.



**Рис. 5.** Эквивалентный ионосферный ток по данным сети MIRACLE, соответствующий сеансу 12.11.2010 г.: (а) – диаграмма широта/время, представляющая динамику электроджета для значения долготы  $22.061^\circ$  E; (б) – положение электроджета для времени пролета микроспутника DEMETER (отмечено на (а) – вертикальной линией).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Представленные в работе эксперименты по генерации низкочастотных излучений с помощью двух немодулированных волн накачки, имеющих расстройку по частоте и излучаемых пространственно разделенными антенными подрешетками высокоширотного нагревного стенда EISCAT-heating, проводились для условий дневной и ночной ионосферы при достаточно спокойной геомагнитной обстановке. Полученные результаты *in situ* измерений характеристик искусственных СНЧ-излучений позволяют сформулировать следующие выводы.

– Размер области регистрации СНЧ-излучений вдоль траектории движения микроспутника DEMETER составляет от 240 км (день) до 600 км (ночь).

– Область регистрации стимулированного низкочастотного излучения имеет существенно неоднородную пространственную структуру. В ней можно выделить зону с наибольшей интенсивностью излучения, смещенную относительно

центра области нагрева в северном направлении на расстояние  $\sim 100$  км, и более протяженную область с характерным уровнем напряженности электрического поля в два раза меньше, чем в максимуме, регистрируемую пространственно симметрично относительно центра области нагрева.

– Амплитуда напряженности электрического поля  $E_x$  на частоте расстройки двух немодулированных волн накачки составляет  $\sim 3$  мкВ/м для дневного сеанса и  $\sim 50$  мкВ/м в ночных условиях.

Результаты моделирования пространственной структуры возбуждаемых в режиме качания луча нагревного стенда HAARP СНЧ-излучений представлены в работе [Cohen et al., 2012]. Полученные в настоящей работе пространственные характеристики области регистрации в целом соответствуют результатам этого численного моделирования (см. рис. 3 для частоты  $F = 1000$  Гц в работе [Cohen et al., 2012]). А именно, пространственное распределение возбуждаемых СНЧ-излучений имеет неоднородную структуру, более вытянутую в северном направлении, с зоной с

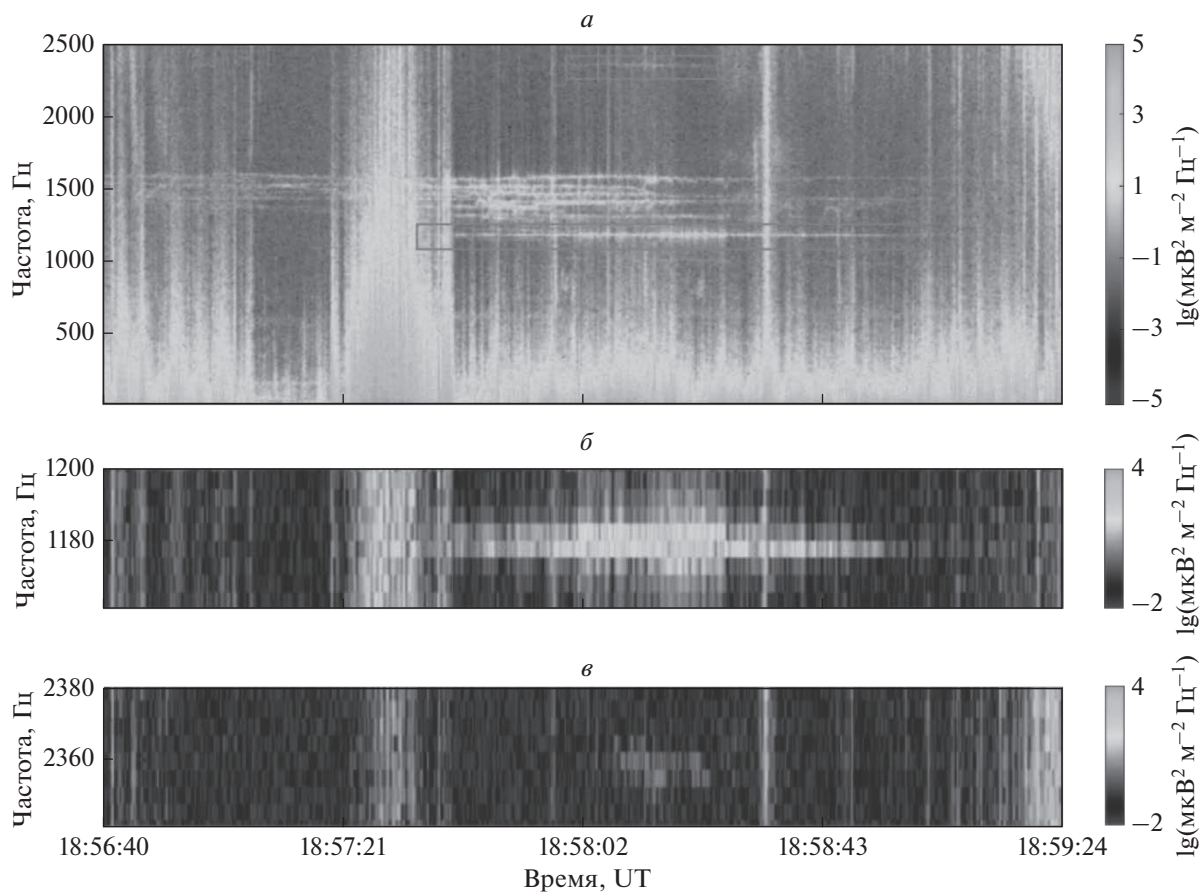


Рис. 6. Динамическая спектрограмма сигнала  $E_x$  для вечернего сеанса нагрева № 3, проведенного 08.11.2010 г.

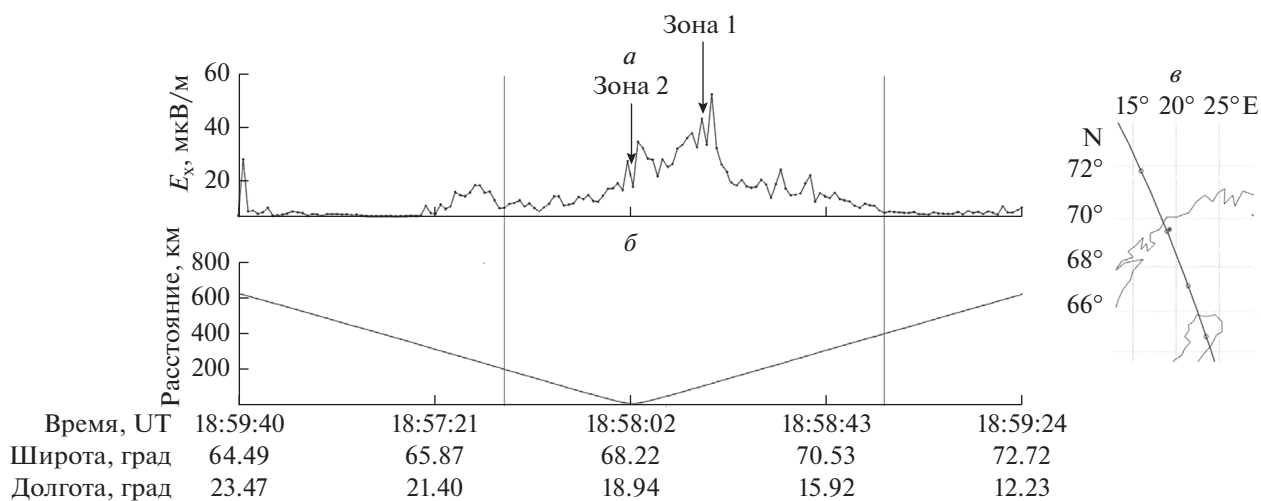


Рис. 7. Вариации величины напряженности электрического поля, выделенной в полосе  $\Delta f = 4.9$  Гц на частоте  $F = 1178$  Гц (а), а также параметры траектории пролета микроспутника DEMETER (б и в) для сеанса № 3.

наибольшей интенсивностью сигнала, смещенной также на север на расстояние 50–100 км от центра области нагрева. Данная структура реали-

зуется при условии, что подрешетка, излучающая на частоте  $f_{\text{pump}}$ , пространственно смещена на север относительно второй подрешетки, работаю-



шей на частоте  $f_{\text{pump}} + F$ , что и было осуществлено в серии натуральных экспериментов “EISCAT-heating – DEMETER”.

Амплитуда возбуждаемых в режиме качания луча СНЧ-излучений на частотах 1–2 кГц при имеющихся параметрах нагревных стендов согласно работам [Мироненко и др., 1998; Cohen et al., 2012] меньше значений, соответствующих традиционной схеме генерации низкочастотных волн с помощью промодулированного по амплитуде излучения нагревного стенда. Усредненные уровни напряженности электрического поля низкочастотных излучений с  $F_{\text{mod}} = 2$  кГц, зарегистрированных на высоте ~660 км с помощью бортовой аппаратуры микроспутника DEMETER по результатам более чем 100 сеансов нагрева высокоширотного стенда HAARP, составляют для дневных условий 13–14 мкВ/м и ~100 мкВ/м ночью [Pidyachiy, 2012], что превышает полученные в настоящей работе значения, составляющие 3 мкВ/м для дневного сеанса и 50 мкВ/м в ночных условиях. Наблюдаемое различие между значениями может быть обусловлено как самим механизмом генерации низкочастотных волн, так и значительно меньшей эффективной мощностью излучения стенда EISCAT-heating по сравнению с HAARP. Большая разница для дневных сеансов вызвана тем, что в данной работе для этих условий использовалась *O*-поляризация излучения волн накачки, которая менее эффективна для генерации СНЧ-излучений [Капустин и др., 1977; Stubbe et al., 1982]. Следует отметить, что для получения полной достоверной картины генерации и распространения этих низкочастотных сигналов требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований и набор статических данных.

Таким образом, представленные впервые данные *in situ* измерений характеристик СНЧ-излучений, возбуждаемых при воздействии на ионосферу качающимся ВЧ-лучом, в целом соответствуют результатам численного моделирования и ранее выполненных наземных измерений. В экспериментах мощные ВЧ-радиоволны отражались от ионосферы и не доходили до спутниковых высот, что делает их результаты более достоверными. Зарегистрированные значения напряженности электрического поля СНЧ-излучений сопоставимы с величинами по традиционной схеме генерации даже в условиях далеко неоптимальной комбинации параметров воздействия, что открывает потенциальные возможности для значительного увеличения эффективности излучения низкочастотных волн и использования их в целях диагностики и управления состоянием магнитосферной плазмы, а также сверхдальней радиосвязи.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Благовещенской Н.Ф. за содействие при выполнении программ исследований на стенде EISCAT-heating и Фролову В.Л. за предоставленные исходные данные, полезные дискуссии и замечания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Альфвеновские мазеры. Горький: ИПФ АН СССР, 190 с. 1986.
- Благовещенская Н.Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 288 с. 2001.
- Гетманцев Г.Г., Зуйков Н.А., Котик Д.С., Мироненко Л.Ф., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Сазонов Ю.А., Трахтенгерц В.Ю., Эйрман В.Я. Обнаружение комбинационных частот при взаимодействии мощного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой // Письма в ЖЭТФ. Т. 20. № 4. С. 229–232. 1974.
- Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физ. наук. Т. 177. № 11. С. 1145–1177. 2007. <https://doi.org/10.3367/UFN.0177.200711a.1145>
- Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 272 с. 1973.
- Капустин И.Н., Перцовский Р.А., Васильев А.Н., Смирнов В.С., Распопов О.М., Соловьева Л.Е., Ульяновко А.А., Арыков А.А., Галахова Н.В. Генерация излучения на комбинационных частотах в области авроральной электроструи // Письма в ЖЭТФ. Т. 25. № 5. С. 248–251. 1977.
- Ковражкин Р.А., Могилевский М.М., Боске Ж.М., Гальперин Ю.И., Джорджио Н.В., Лисаков Ш.Е., Молчанов О.А., Рэм А. Обнаружение высыпаний частиц из пояса кольцевого тока, стимулированных мощным наземным ОНЧ излучателем // Письма в ЖЭТФ. Т. 38. № 7. С. 332–333. 1983.
- Котик Д.С., Мироненко Л.Ф., Митяков С.Н., Рапопорт В.О., Солянин В.А., Тамойкин В.В. О возможности формирования сверхсветового источника черенковского излучения с помощью эффекта Гетманцева / Тр. Международного симпозиума “Модификация ионосферы мощным радиоизлучением”, Суздаль, сентябрь 1986. Ред. Л.А. Лобачевский. М.: ИЗМИРАН. С. 91–92. 1986.
- Мизун Ю.Г. Полярная ионосфера. Л.: Наука, 216 с. 1980.
- Мироненко Л.Ф., Рапопорт В.О., Котик Д.С., Митяков С.Н. Излучение искусственных сверхсветовых неоднородностей нижней ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 41. № 3. С. 298–309. 1998.
- Barr R., Rietveld M.T., Stubbe P., Kopka H. Ionospheric heater beam scanning: a mobile source of ELF radiation // Radio Sci. V. 22. № 6. P. 1073–1083. 1987. <https://doi.org/10.1029/RS022i006p01073>
- Barr R., Stubbe P. ELF and VLF wave generation by HF heating: a comparison of AM and CW techniques // J. Atmos. Terr. Phys. V. 59. № 18. P. 2265–2279. 1997. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(96\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00121-6)

- *Cohen M.B., Moore R.C., Golkowski M., Lehtinen N.G.* ELF/VLF wave generation from the beating of two HF ionospheric heating sources // *J. Geophys. Res.* V. 117. № A12, 310. P. 1–8. 2012.  
<https://doi.org/10.1029/2012JA018140>
- *Cussac T., Clair M.-A., Ultré-Guerard P., Buisson F., Las-salle-Balier G., Ledu M., Elisabelar C., Passot X., Rey N.* The Demeter microsatellite and ground segment // *Planet. Space Sci.* V. 54. № 5. P. 413–427. 2006.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.10.013>
- *Inan U.S., Bell T.F., Bortnik J., Albert J.M.* Controlled precipitation of radiation belt electrons // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A5, 1186. P. 1–6. 2003.  
<https://doi.org/10.1029/2002JA009580>
- *James H.G., Dowden R.L., Rietveld M.T., Stubbe P., Kopka H.* Simultaneous observations of ELF waves from an artificially modulated auroral electrojet in space and on the ground // *J. Geophys. Res.* V. 89. № A3. P. 1655–1666. 1984.  
<https://doi.org/10.1029/JA089iA03p01655>
- *Jin G., Spasojevic M., Inan U.S.* Relationship between electrojet current strength and ELF signal intensity in modulated heating experiments // *J. Geophys. Res.* V. 114. № A08, 301. P. 1–9. 2009.  
<https://doi.org/10.1029/2009JA014122>
- *Lefevvre F., Rauch J.L., Dee V.I., Titova E.E., Yurov V.E., Molchanov O.A., Mogilevsky M.M., Maltseva O.A., Zinin L.V., Kopka H.* Detection from AUREOL-3 of the modulation of auroral electrojet by HF-heating from ELF signals in the upper ionosphere above Tromsø (Norway) / Results of the ARCAD 3 project and of recent programs in magnetospheric and ionospheric physics / CNES. Toulouse, France: Cepedues-Editions. P. 609–619. 1985.
- *Kuo S.P., Snyder A., Kossey P., Chang C.-L., Labenski J.* Beating HF waves to generate VLF waves in the ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 117. № A03, 318. P. 1–9. 2012.  
<https://doi.org/10.1029/2011JA017076>
- *Moore R.C., Inan U.S., Bell T.F., Kennedy E.J.* ELF waves generated by modulated HF heating of the auroral electrojet and observed at a ground distance of ~4400 km // *J. Geophys. Res.* V. 112. № A05, 309. P. 1–7. 2007.  
<https://doi.org/10.1029/2006JA012063>
- *Moore R.C., Fujimaru S., Cohen M., Golkowski M., McCarrick M.J.* On the altitude of the ELF/VLF source region generated during “beat-wave” HF heating experiments // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. № L18, 101. P. 1–5. 2012.  
<https://doi.org/10.1029/2012GL053210>
- *Piddyachiy D.* Propagation of ELF waves generated by an HF ionospheric heater in the Earth’s plasma environment. Dissertation Ph. D. Stanford University, 160 p. 2012.  
[https://vlfstanford.ku.edu.tr/wp-content/uploads/2012/12/piddyachiy\\_thesis\\_online\\_1-sided.pdf](https://vlfstanford.ku.edu.tr/wp-content/uploads/2012/12/piddyachiy_thesis_online_1-sided.pdf)
- *Rietveld M.T., Mauelshagen H.-P., Stubbe P., Kopka H., Nielsen E.* The characteristics of ionospheric heating-produced ELF/VLF waves over 32 hours // *J. Geophys. Res.* V. 92. № A8. P. 8707–8722. 1987.  
<https://doi.org/10.1029/JA092iA08p08707>
- *Rietveld M.T., Kohl H., Kopka H., Stubbe P.* Introduction to ionospheric heating at Tromsø – I. Experimental overview // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 55. № 4–5. P. 577–599. 1993.  
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(93\)90007-L](https://doi.org/10.1016/0021-9169(93)90007-L)
- *Robinson T.R.* The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // *Phys. Reports.* V. 179. № 2–3. P. 79–209. 1989.  
[https://doi.org/10.1016/0370-1573\(89\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0370-1573(89)90005-7)
- *Stubbe P., Kopka H., Rietveld M.T., Dowden R.L.* ELF and VLF wave generation by modulated HF heating of the current carrying lower ionosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 44. № 12. P. 1123–1131. 1982.  
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(82\)90023-X](https://doi.org/10.1016/0021-9169(82)90023-X)
- *Villaseñor J., Wong A.Y., Song B., Pau J., McCarrick M., Sentman D.* Comparison of ELF/VLF generation modes in the ionosphere by the HIPAS heater array // *Radio Sci.* V. 31. № 1. P. 211–226. 1996.  
<https://doi.org/10.1029/95RS01993>
- *Werner D.H., Ferraro A.J.* Steerable ELF/VLF radiation produced by an array of ionospheric dipoles generated from HF heating // *IEEE Trans. Ant. Prop.* V. 35. № 9. P. 1022–1030. 1987.  
<https://doi.org/10.1109/TAP.1987.1144214>