

## ВОЗМУЩЕНИЯ В КНЧ СИГНАЛАХ, ВЫЗВАННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ИОНОСФЕРУ КВ ПЕРЕДАТЧИКА НААРП, И РЕГИСТРИРУЕМЫЕ НА СПУТНИКЕ DEMETER

Е.Е. Титова<sup>1</sup>, А.Г. Демехов<sup>2</sup>, А.А. Мочалов<sup>1</sup>, А.Б. Пашин<sup>1</sup>, М.М. Могилевский<sup>3</sup>, Г.М. Милих<sup>4</sup>, М. Парро<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ПГИ КНЦ РАН, Апатиты, Россия

<sup>2</sup>ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>ИКИ РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Университет Мэриленда, Колледж-Парк, США

<sup>5</sup>LPCE/CNRS, Орлеан, Франция

**Аннотация.** Представлены результаты измерений характеристик электромагнитных возмущений в КНЧ диапазоне ( $< 1.25$  кГц) над мощным КВ станцией НААРП, выполненные на спутнике DEMETER для дневных и ночных пролетов. Показано, что возмущения в КНЧ сигналах, вызванные передатчиком НААРП, регистрировались только для дневных событий, в которых воздействие осуществлялось ВЧ волнами О-поляризации при максимальной мощности станция 3,6 МВт на частотах близких к критической частоте F слоя ионосферы 4,5 - 5,5 МГц. Возмущения в КНЧ сигналах над передатчиком НААРП наблюдались в электрических компонентах в зоне с характерным размером около 150 км. Максимальные амплитуды возмущенных КНЧ сигналов регистрировались в перпендикулярных (по отношению к магнитному полю) компонентах и превышали уровень естественных КНЧ шумов вне зоны воздействия до 8 раз. В спектрах КНЧ сигналов в зоне нагрева над передатчиком НААРП отсутствовало резкое увеличение интенсивности сигналов в области низких частот  $< 50$  Гц, которое наблюдается в спектрах естественных КНЧ шумов и связано с альфвеновской турбулентностью.

### Введение

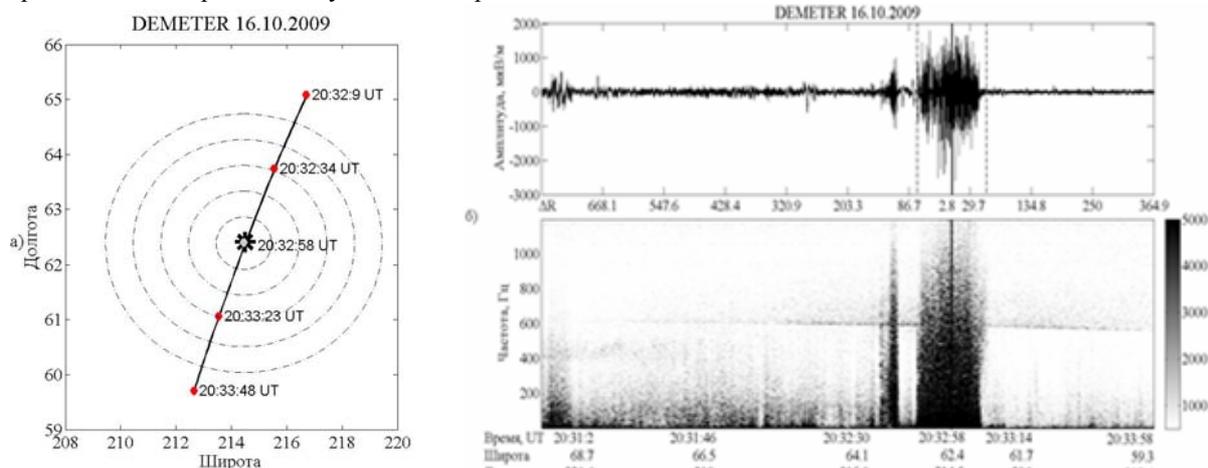
Основные экспериментальные результаты по взаимодействию мощного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой преимущественно были получены с поверхности Земли с использованием наземных методов диагностики. Эти результаты несут преимущественно информацию о процессах, происходящих в нижней части ионосферы, ниже максимума F-слоя. Вместе с тем значительный интерес представляют характеристики плазменных и волновых возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере при нагреве ее F-области мощным радиоизлучением. Поэтому в последнее время возросла роль наблюдений на искусственных спутниках за эффектами воздействия мощных радиоволн на ионосферу.

Электромагнитные возмущения в КНЧ/ОНЧ диапазоне, вызванные воздействием на ионосферу среднеширотного КВ передатчика Сура [Фролов, и др., 2007, 2008; *Rapport, et al.*, 2007, 2010] и высокоширотного нагревного станция EISCAT [Белов и др., 2008] были обнаружены на спутнике DEMETER (высота 700 км). В работе [Piddyachiy, et al., 2011] была предпринята попытка по данным спутника DEMETER выявить КНЧ/ОНЧ электромагнитные возмущения над самым мощным нагревным станция НААРП. Авторы пришли к выводу, что в области ионосферного провала, где расположен передатчик НААРП, естественные вариации волновых и плазменных параметров столь велики, что не представляется возможным выделить возмущения связанные с работой передатчика. Однако мы считаем, что этот вывод не является окончательным, и ниже приводим примеры возбуждения КНЧ сигналов над передатчиком НААРП, зарегистрированные на спутнике DEMETER.

### Характеристики КНЧ шумов во внешней ионосфере над мощным КВ станцией НААРП

Мы проанализировали 13 пролетов спутника DEMETER в районе станция НААРП ( $62.39^{\circ}\text{N}$ ,  $145.15^{\circ}\text{W}$ ,  $L=4.9$ ). Информацию о 9 сеансах работы НААРП с октября 2009 г. по ноябрь 2010 г. мы взяли из статьи [Vartanyan et al., 2012], остальные события взяты из работ [Milikh, 2008, 2011, Kennedy et al., 2008]. Было рассмотрено 7 дневных и 6 ночных пролетов спутника DEMETER. Во всех этих событиях передатчик НААРП работал с максимальной мощностью 3,6 МВт и О-поляризации. Для дневных нагревных сеансов частота ВЧ передатчика была близка к критической частоте F слоя ионосферы 5-7 МГц. Для ночных сеансов частота ВЧ передатчика была заметно ниже и часто вблизи второй гармоники электронной гирочастоты (2,8 МГц). Передатчик НААРП начинал работу за 15-25 минут до рассмотренных пролетов спутника DEMETER. Для измерения КНЧ электрических полей на спутнике DEMETER были использованы данные прибора ICE [Berthelier et al., 2006], измерявшего на частотах  $< 1.25$  кГц три взаимно ортогональные электрические компоненты в КНЧ сигналах  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  (ось z вдоль магнитного поля Земли, x y – перпендикулярны магнитному полю).

Пример регистрации на спутнике DEMETER КНЧ шумов, вызванных воздействием передатчика HAARP, показан на рис. 1. Карта пролета спутника DEMETER вблизи установки HAARP для дневного события 16.10.2009 изображена на рисунке 1а, звездочкой показано положение установки HAARP на Земле. Сплошной линией обозначена траектория пролета спутника, координаты которого проецируются на высоту 110 км вдоль магнитных силовых линий; окружности показывают расстояние от передатчика с шагом 50 км. Видно, что для события 16.10.2009 спутник пролетал практически над передатчиком HAARP, минимальное расстояние от проекции спутника до передатчика составляло около 3 км.



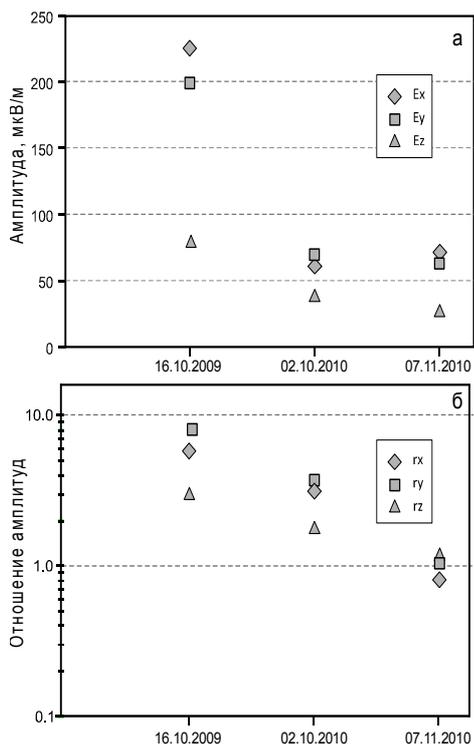
**Рис. 1 (а)** Проекция орбиты спутника DEMETER для события 16.10.2009, положение станда HAARP на Земле показано звездочкой. **(б)** Волновая форма и спектрограмма Ex компоненты электрического поля, зарегистрированные на спутнике DEMETER для события 16.10.2009

На рисунке 1б показана регистрируемая на спутнике Ex-компонента переменного электрического поля для события 16.10.2009. В верхней части рисунка расположен график волновой формы Ex-компоненты. По оси абсцисс отложено расстояние до установки HAARP, по оси ординат – амплитуда в мкВ/м. Черной вертикальной линией отмечено положение спутника при наименьшем расстоянии до передатчика, пунктирными линиями положение за 10 с до и 10 с после передатчика. В нижней части рисунка расположена спектрограмма Ex-компоненты электрического поля в диапазоне частот до 1250 Гц. По оси абсцисс отложено время и координаты спутника в проекции на 110 км, по оси ординат – частота. На графике волновой формы видно возмущение электрического поля при пролете спутника вблизи передатчика в интервале  $\pm 10$  с, что соответствует размеру области нагрева около 150 км на высоте спутника DEMETER. В то же время на спектрограмме вблизи передатчика также отчетливо наблюдается широкополосный сигнал во всем диапазоне регистрируемых частот  $< 1250$  Гц. Аналогичное возбуждение КНЧ шумов регистрировалось на Ey и Ez антеннах. Максимальные амплитуды КНЧ сигналов регистрировалась в X компоненте и в отдельные моменты достигали  $\sim 10^3$  мкВ/м, средняя амплитуда КНЧ сигналов в X компоненте в зоне возмущения ( $\pm 10$  с от передатчика) составляла 225 мкВ/м.

В таблице 1 суммированы результаты наблюдения КНЧ сигналов для дневных пролетов спутника DEMETER вблизи передатчика HAARP. В таблице для трех компонент электрического поля в полосе частот  $< 1.2$  кГц даны: средние интенсивности КНЧ излучения за временной интервал  $\pm 10$  сек от минимального удаления от передатчика HAARP, Amp X, Y, Z, мкВ/м, ( $\pm 10$ с); средние интенсивности за временной интервал  $\pm (10 - 30)$  с от минимального удаления от передатчика HAARP Amp X, Y, Z,  $\pm (10 - 30)$  с, мкВ/м; отношения этих величин Amp X, Y, Z ( $\pm 10$  с)/ Amp X, Y, Z  $\pm (10 - 30)$  с, обозначенные gx, gy, gz. Величины gx, gy, gz характеризуют превышение КНЧ сигнала в зоне нагрева HAARP к уровню естественных КНЧ шумов вне зоны воздействия. Из таблицы 1 видно, что превышение КНЧ сигналов над стандом HAARP к фоновому уровню КНЧ шумов вне зоны воздействия регистрировалось во всех 3 пролетах, которые были близки к HAARP ( $< 35$  км). В остальных 4 случаях, в которых спутник DEMETER пролетал на расстояниях более 70 км от передатчика, возмущения в КНЧ сигналах не наблюдались.

**Таблица 1**

N	дата	$\Delta R$ , км	Amp X, ( $\pm 10$ ) с мкВ/м	Amp X, $\pm(10-30)$ с мкВ/м	gx	Amp Y, ( $\pm 10$ ) с мкВ/м	Amp Y, $\pm(10-30)$ с мкВ/м	gy	Amp Z, ( $\pm 10$ ) с мкВ/м	Amp Z, $\pm(10-30)$ с мкВ/м	gz
1	2009.10.16	2,8	225,4	39,2	5,7	199,0	24,8	8,0	78,5	26,2	3,0
2	2010.11.07	14,0	71,4	82,8	0,9	64,4	63,4	1,0	27,2	23,1	1,2
3	2010.02.10	31,5	65,5	20,9	3,1	66,2	18,0	3,7	38,3	21,6	1,8

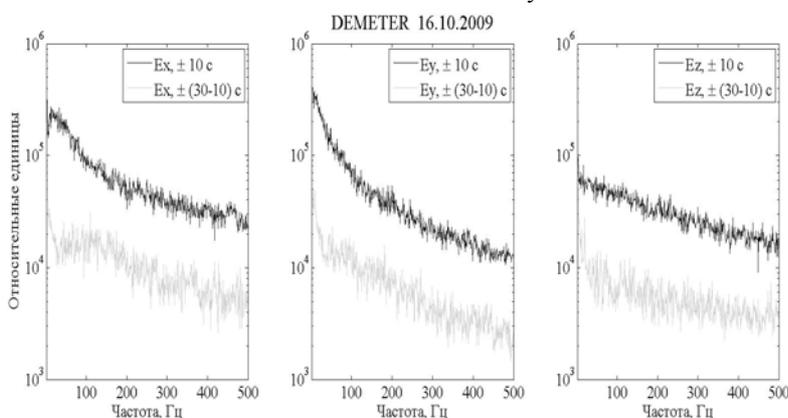


**Рис. 2** (а) Амплитуды КНЧ сигналов над передатчиком HAARP для  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  компонент электрического поля. (б) Отношения амплитуд КНЧ сигналов в полосе частот  $f < 1250$  Гц для различных компонент  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$  в зоне над передатчиком HAARP и вне зоны.

Для ночных событий было всего два пролета спутника вблизи передатчика ( $< 35$  км), однако увеличение КНЧ сигналов в зоне над передатчиком наблюдалось только в одном из них, то есть наши данные не позволяют уверенно говорить о наличии возмущений в КНЧ диапазоне над передатчиком HAARP для ночных пролетов.

Рассмотрим поляризацию и спектры КНЧ сигналов, регистрируемых над передатчиком HAARP. На рис. 2а показаны амплитуды КНЧ сигналов для  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  компонент электрического поля для 3-х пролетов спутника DEMETER, в которых были зарегистрированы возмущения в КНЧ сигналах, связанные с работой нагревного стенда HAARP. Из рис.2а видно, что средние амплитуды перпендикулярных компонент  $E_x$  и  $E_y$  в полосе частот  $< 1.2$  кГц всегда больше продольной  $E_z$  компоненты. Для естественных КНЧ сигналов вне зоны нагрева также характерно превышение перпендикулярных компонент над продольной.

На рис. 2б показаны отношения амплитуд КНЧ сигналов в полосе частот  $f < 1250$  Гц для различных компонент  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$  в зоне над передатчиком и вне зоны  $Amp X, Y, Z (\pm 10 \text{ с}) / Amp X, Y, Z (\pm 10 - 30) \text{ с}$ . Отношения  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z > 1$  являются признаком возбуждения КНЧ шумов в области нагрева. Видно, что максимальные значения  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$  регистрировались в событии 16.10.2009 в компонентах, перпендикулярных магнитному полю  $g_y = 8,0$ ,  $g_x = 5,8$ ; это больше чем в два раза превосходит отношение продольных компонент  $g_z = 3,0$ . Подобная ситуация наблюдалась и в событии 10.02.2010, в котором отношения амплитуд были равны  $g_x = 3,1$ ,  $g_y = 3,7$ ,  $g_z = 1,8$  соответственно. Однако для события 07.11.2010 отношения  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$  были заметно меньше и превышали 1 только для продольной компоненты  $E_z$  и  $g_z = 1,2$ . К сожалению, малое количество случаев не позволяет нам определить условия



**Рис. 3** Спектры  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  компонент КНЧ сигналов, зарегистрированные над передатчиком HAARP (показаны черным цветом) и вне зоны нагрева (показаны серым) на частотах  $< 500$  Гц для события 16.10.2009.

компонент на частотах до 500 Гц над передатчиком HAARP в зоне нагрева  $\pm 10$  с (показаны черным цветом) и вне зоны нагрева  $\pm (30-10)$  с (серым цветом).

Из рис. 3 видно, что спектральная плотность КНЧ сигналов в зоне нагрева может почти на порядок превосходить уровень естественных КНЧ шумов. При этом спектры КНЧ сигналов над передатчиком HAARP ( $\pm 10$  сек) могут существенно отличаться от спектров КНЧ сигналов вне зоны нагрева  $\pm (30-10)$ с. Особенно это отличие выражено в области низких частот, где в спектрах естественных КНЧ шумов всегда наблюдается резкое увеличение сигналов на частотах  $< 50$  Гц, отсутствующее в спектрах возмущенных КНЧ сигналов.

Спектры естественных КНЧ шумов, показанные на рис. 3, являются типичными для высокоширотных

преимущественной генерации поперечной или продольной компонент КНЧ возмущений над передатчиком HAARP.

По данным спутника DEMETER были проанализированы спектры КНЧ сигналов в зоне нагрева над передатчиком HAARP и вне этой зоны. Напомним, что размер зоны регистрации КНЧ шумов в области воздействия передатчика HAARP на высоте спутника DEMETER составлял 150 км (время пролета ИСЗ около 20 с, т.е.  $\pm 10$  с от момента пролета точки проекции на передатчик вдоль геомагнитной силовой линии). На рис. 3 для события 16.10.2009 показаны спектры КНЧ шумов  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$

широкополосных возмущений, которые состоят из альфвеновской турбулентности и электростатического шума. Альфвеновская турбулентность представляет собой низкочастотную часть спектра (<50 Гц) и наблюдается в авроральной зоне до масштабов порядка локальных значений инерционной длины электрона  $\lambda_e = c/\omega_{pe}$ , составляющую первые сотни метров, а отдельных событиях до меньших масштабов [Головчанская и др., 2012]. В свою очередь, альфвеновская турбулентность сопровождается развитием электростатического шума [Головчанская, 2011], который становится преобладающим в сигнале на частотах > 30-50 Гц и различим на спектрограммах вплоть до частот 1 кГц, а иногда и более высоких частот [Bonnell et al., 1996]. Таким образом, отсутствие на частотах < 50 Гц выраженного максимума интенсивности в спектрах КНЧ сигналов над передатчиком HAARP свидетельствует, что низкочастотная и/или крупномасштабная альфвеновская турбулентность в возмущенных КНЧ сигналах генерируется намного менее эффективно, чем в естественных КНЧ сигналах.

## Заключение

Суммируем результаты, полученные на спутнике DEMETER (высота 700 км), по анализу возмущений в КНЧ/ОНЧ сигналах, вызванных воздействием на ионосферу КВ передатчика HAARP (62.39°N, 145.15°W, L = 4.9). По данным спутника DEMETER нами впервые обнаружены возмущения в КНЧ (<1.25 кГц) диапазоне, обусловленные воздействием передатчика HAARP на ионосферу. КНЧ/ОНЧ сигналы были зарегистрированы на электрических антеннах в дневные часы (LT=11-12) при максимальной мощности передатчика (3.6 МВт), излучавшего на частотах 4.5-5. МГц близких к критической частоте ионосферного слоя F, время нагрева до пролета ИСЗ составляло 10-15 минут. Область возмущений в КНЧ/ОНЧ диапазонах имеет размеры около  $\approx 10^2$  км и средние амплитуды КНЧ волн в зоне нагрева были  $A_x, A_y \approx (70 - 200)$  мкВ/м и  $A_z \approx (30 - 80)$  мкВ/м. Анализ поляризации КНЧ сигналов, связанных с работой HAARP, показал, что они имеют как перпендикулярные (по отношению к магнитному полю) компоненты  $E_x, E_y$ , так и продольную составляющую  $E_z$ . Сравнение спектров КНЧ сигналов в зоне нагрева над передатчиком HAARP и вне ее показало отсутствие в возмущенных сигналах характерного для естественных шумов резкого увеличения интенсивности сигналов в области низких частот < 50 Гц, которое связывают с альфвеновской турбулентностью.

Работа частично поддержана грантами РФФИ-11-02-00654, 11-02-00397, 12-02-92614 и программой Президиума РАН 22 “Фундаментальные проблемы исследования и освоения Солнечной системы”.

## Список литературы

- Белов, Г.А. Марков, В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, М. Парро, М. Ритвельд, Возмущения внешней ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением нагревного стэнда EISCAT A.C. // Сб. Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Издательство: Институт космических исследований РАН (Москва) Т. 5 № 1 С. 539-545. 2008
- Головчанская И.В. Широкополосная ULF-ELF турбулентность в магнитосферно-ионосферной системе высоких широт: текущее состояние эксперимента и теории. // Тр. XXXIV ежегодного семинара “Физика авроральных явлений”. С. 61-70. 2011.
- Головчанская И.В., Козелов Б.В., Дэспирак И.В. Исследование широкополосной ELF турбулентности по данным спутника FAST // Геомагнетизм и аэрономия. Т.52, №4, С. 501-509. 2012.
- Рапопорт В.О. и др. Некоторые результаты измерений характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным коротковолновым радиоизлучением стэнда “СУРА” // Изв. вузов. Радиофизика. Т.50, №8. С.709-721. 2007.
- Фролов В.Л. и др. Спутниковые измерения характеристик плазменных возмущений, создаваемых при нагреве ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением стэнда “Сура” // Изв. вузов. Радиофизика, 51, 915. 2008.
- Фролов В.Л. и др. Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением // УФН, 177, 330-340. 2007.
- Berthelier, J.J., Godefroy, M., Leblanc, F., Malingre, M., Menvielle, M., Lagoutte, D., Brochet, J. Y., Colin, F., Elie, F., Legendre, C., Zamora, P., Benoist, D., Chapuis, Y., Artru, J., and Pfaff, R.: ICE, the electric field experiment on DEMETER // Planet. Space Sci., 54, P. 456-471. 2006.
- Bonnell J., Kintner P. and Wahlund J.-E. Interferometric determination of broadband ELF wave phase velocity within a region of transverse auroral ion acceleration // Geophys. Res. Lett., 23(23), 3297-3300, 1996.
- Kennedy E., Secan J. and Snyder A. Report on the HAARP 2008 Winter Campaign Focusing on Artificial Ionospheric Irregularities. //AFRL-RV-HA-TR-2009-1024. North West Research Associates, Redmond, P. 97. 2008.
- Milikh, G.M., Vartanyan A., Papadopoulos K., and Parrot M., Focusing of HF radio-waves by ionospheric ducts // J. Atm. Solar-Terr. Phys., 73. doi:10.1016/j.jastp.2011.02.022. 2011.
- Milikh, G.M., Papadopoulos, K., Shroff, H., Chang, C.L., Wallace, T., Mishin, E.V., Parrot, M., and Berthelier, J.J. Formation of artificial ionospheric ducts // Geophys. Res. Lett. 35, L17104. doi:10.1029/2008GL034630. 2008.
- Parrot, M., et al. First in-situ observations of strong ionospheric perturbations generated by a powerful VLF ground-based transmitter // Geophys. Res. Lett., 34, L11111, doi:10.1029/2007GL029368. 2007.
- Piddyachiy, D., Bell, T.F., Berthelier, J.J., Inan, U.S., and Parrot, M.: DEMETER observations of the ionospheric trough over HAARP in relation to HF heating experiments // J. Geophys. Res., 116. A06304. doi:10.1029/2010JA016128. 2011.
- Rapoport, V.O., et al. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility // J. Geophys. Res.-Space Phys., 115, A10322, doi:10.1029/2010JA015484. 2010.
- Vartanyan, A., Milikh G.M., Papadopoulos K., Mishin E., Parrot M., Galkin I., Reinisch B., Huba J., and Joyce G. Artificial ducts caused by the HF-heating of the ionosphere by HAARP // J. Geophys. Res., 117, A10307, doi:10.1029/2012JA017563. 2012.