

ВОЗБУЖДЕНИЕ МАГНИТОСФЕРНОГО МАЗЕРА ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ МОЩНЫМ КОРОТКОВОЛНОВЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ НАЗЕМНОГО ПЕРЕДАТЧИКА

Г. А. Марков^{a}, А. С. Белов^{a**}, В. Л. Фролов^b, В. О. Рапопорт^b, М. Парро^{c***}*

*^a Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603950, Нижний Новгород, Россия*

*^b Научно-исследовательский радиофизический институт
603950, Нижний Новгород, Россия*

*^c Environment Physics and Chemistry Laboratory
Orleans, France*

Поступила в редакцию 16 апреля 2010 г.

Предложен и реализован в натурном эксперименте метод управляемого возбуждения магнитосферного мазера путем формирования мощным КВ-радиоизлучением с поверхности Земли искусственных дактов плотности. Искусственные волновые каналы (дакты плотности) позволяют влиять на резонаторную систему мазера, процессы возбуждения и распространения низкочастотных электромагнитных волн в возмущенной магнитной силовой трубке. Представленные в работе данные экспериментов получены на среднеширотном нагревном стенде «Сура». Измерения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы выполнены с помощью бортовой аппаратуры спутника DEMETER при его пролете через магнитную силовую трубку, опирающуюся на область интенсивной генерации искусственной ионосферной турбулентности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Резонансные взаимодействия волновых полей и потоков заряженных частиц в магнитосферном плазменном резонаторе могут привести к генерации магнитосферного циклотронного мазера [1, 2]. Роль активного вещества в этом мазере выполняют частицы радиационных поясов, для которых из-за наличия конуса потерь в пространстве скоростей характерна инверсия населенностей, проявляющаяся в поперечной анизотропии функции распределения. Частицы с малыми поперечными скоростями не удерживаются магнитными пробками и высыпаются из магнитосферы вдоль силовых линий магнитного поля в плотные слои атмосферы. Частицы с большими поперечными скоростями отражаются от магнитных пробок, перемещаясь от полюса к полюсу вдоль силовых линий геомагнитного поля. На-

качкой частиц является диффузия из радиационных поясов и, если количество таких частиц начинает превышать некий пороговый уровень, шумовые волновые поля, всегда присутствующие в магнитосфере, стимулируют возбуждение магнитосферного мазера. Из-за многомодовости магнитосферного резонатора и неоднородности магнитного поля генерация мазера должна наблюдаться в виде широкополосного (шумоподобного) излучения.

Положительная обратная связь обеспечивается частичным отражением волн от областей нарушения условий геометрической оптики (как правило, ионосферных зеркал) для возбуждаемых полей. Порог генерации достигается при балансе усиления волн и потерь. Характерными признаками генерации магнитосферного мазера являются заметное по сравнению с фоновым уровнем увеличение интенсивности шумовых излучений ОНЧ- и КНЧ-диапазонов, а также высыпания отработанных энергичных частиц из возмущенной магнитной силовой трубки. Наличие в магнитосфере плазменных

*E-mail: markov@rf.unn.ru

**E-mail: alexis-belov@yandex.ru

***M. Parrot

волноводов (дактов плотности) позволяет локализовать возбуждаемые волновые поля в узкой силовой трубке геомагнитного поля, что значительно снижает требования к интенсивности возбуждающих эти поля пучков резонансных электронов. Такие плазменно-волновые каналы могут возникать в естественных условиях. Их формирование связывают с полями грозовых облаков или с полями поляризации, возникающими при высыпаниях частиц в ионосферу [3–5]. Важным достижением последних лет явилась экспериментальная демонстрация возможности создания искусственных плазменных волноводов с помощью контролируемого воздействия на ионосферу мощным КВ-радиоизлучением [6, 7], что открывает перспективы активного управляемого воздействия на процессы генерации и распространения электромагнитных излучений в магнитосфере Земли.

Представленные в настоящей работе эксперименты были выполнены на нагревном стенде «Сура» (географические координаты: 56.15° N, 46.11° E) [8], расположенном в 120 км восточнее г. Н. Новгород. Стенд является одной из пяти в мире (и единственной в Российской Федерации) действующих установок для исследования взаимодействия мощного радиоизлучения с околоземной плазмой. Выполненные на стенде «Сура» исследования показали, что его мощное радиоизлучение позволяет изменять тепловой и ионизационный баланс частиц в облучаемой области ночной ионосферы на высотах 220–300 км, создавать крупномасштабные плазменные неоднородности, вытянутые вдоль геомагнитного поля во внешнюю ионосферу и магнитосферу Земли [6, 9, 10], и влиять на резонаторную систему магнитосферного мазера. Кроме того, стенд «Сура» — единственная в настоящее время установка, расположенная в средних широтах, где сильные естественные геомагнитные возмущения достаточно редки. Этот стенд обладает рядом преимуществ при решении задач, связанных с изучением механизмов генерации магнитосферных излучений, в отличие от стендов, расположенных в полярных и авроральных широтах, где непрогнозируемые сильные естественные возмущения ионосферы и магнитосферы Земли значительно затрудняют интерпретацию наблюдаемых явлений. Искусственное воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением в таких условиях может стимулировать также развитие естественной возмущенности ионосферно-магнитосферной плазмы, как это наблюдалось, например, в работе [11].

В проведенных экспериментах регистрация возмущений параметров плазмы, КНЧ- и ОНЧ-вариан-

ций электромагнитных полей была проведена путем непосредственных (*in situ*) измерений с помощью бортовой аппаратуры французского микроспутника DEMETER.

2. УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Обсуждаемые в настоящей работе результаты были получены во время эксперимента, выполненного 12 мая 2008 г. в поздние вечерние часы, когда траектория ИСЗ DEMETER на высоте приблизительно 660 км проходила над стендом «Сура» в окрестности возмущенной магнитной силовой трубки. При проведении измерений стенд «Сура» излучал в режиме «несущая» радиоволны О-поляризации на частоте 4300 кГц с эффективной мощностью излучения $P_{eff} = 80$ МВт. Стенд включался на 15 мин за 11 мин до расчетного времени $T \approx 18 : 16 : 28$ UT пролета спутника вблизи оси возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на область с интенсивной искусственной ионосферной турбулентностью, возбуждаемой мощной радиоволной вблизи высоты ее отражения в F_2 -области ионосферы. В этом эксперименте диаграмма направленности антенны стенда была наклонена на 12° на юг, чтобы усилить генерацию ионосферной турбулентности за счет эффекта «магнитного зенита» [12]. Волна накачки отражалась на высоте приблизительно 220 км. Критическая частота F_2 -слоя ионосферы f_{0F_2} была около 5 МГц, но регистрировался полупрозрачный спорадический E-слой с критической частотой до 4.7 МГц. Режим работы стенда был выбран таким образом, чтобы обеспечить условия формирования искусственного плазменно-волнового канала (дакта плотности) на высотах внешней ионосферы Земли [6]. Аппаратура ИСЗ DEMETER функционировала в режиме обзорной (*survey*) моды с относительно малой скоростью оцифровки данных, позволившей провести их регистрацию на достаточно протяженном временном интервале.

Эксперимент выполнялся в достаточно спокойных геомагнитных условиях ($K_p \approx 1$) и каких-либо заметных геомагнитных возмущений по данным сети станций INTERMAGNET в этот интервал времени не было зафиксировано. Однако оказалось, что в этот день по данным, представленным на сайте <http://www.izmiran.ru/services/iweather/>, зарегистрирован повышенный уровень полного электронного содержания (ТЕС) (критический индекс планетарного ионосферно-плазматического шторма [13] $W_p = 4$ был превышен с 16 : 00 UT и во время эксперимента составлял $W_p = 5.4$). Вероятно,

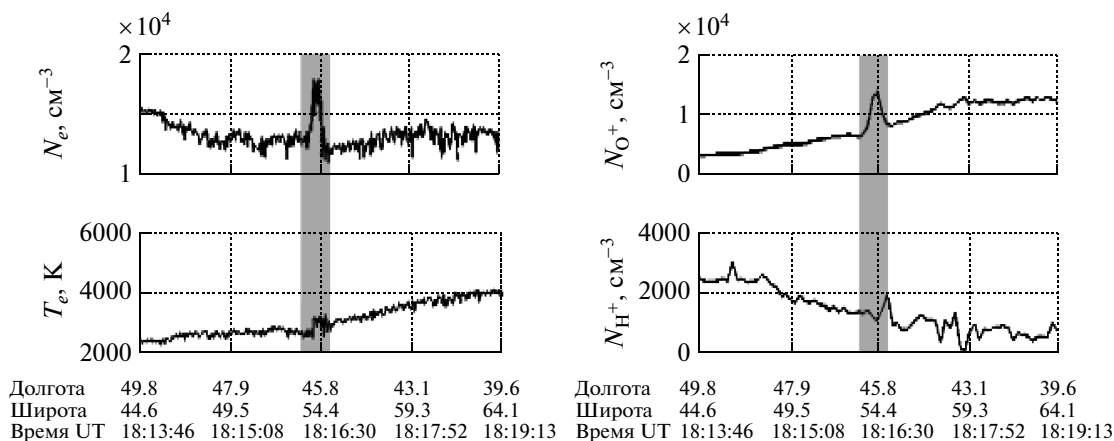


Рис. 1. Результаты измерений концентрации электронов N_e и основных (на высоте орбиты спутника) ионов N_{O^+} и N_{H^+} , а также температуры электронов T_e , выполненных бортовой аппаратурой ИСЗ DEMETER. По горизонтальной оси отложены координаты спутника и всемирное время, соответствующее его положению. Серая область — время наибольшего сближения спутника с осью возмущенной силовой магнитной трубки

поэтому особенностью данного эксперимента явилось наличие достаточно интенсивного потока энергичных электронов, зарегистрированного аппаратурой ИСЗ на интервале времени от 18 : 15 : 42 до 18 : 17 : 38 UT в области широт 49°–60° N (см. рис. 3в).

На рис. 1 приведены результаты измерений концентраций электронов и основных ионов O^+ и H^+ плазмы на высотах около 660 км, а также температуры электронов. Хорошо видно формирование в данном эксперименте искусственного дакта с возрастанием концентрации электронов N_e и ионов N_{O^+} (превалирующих на данных высотах) при уменьшении концентрации более легких ионов N_{H^+} и N_{He^+} . В возмущенной магнитной силовой трубке наблюдается также повышение на 20 % температуры электронов. Согласно приведенным данным, характерный поперечный масштаб дакта плотности составлял приблизительно 80 км.

На рис. 2 представлены результаты измерения прибором IAP ИСЗ DEMETER скорости потока ионов. На нижней панели рис. 2а показана временная зависимость изменения расстояния от положения спутника до оси возмущенной силовой трубки на высоте его полета, положение которой было рассчитано согласно модели геомагнитного поля IGRF Version 11. В локальной геомагнитной системе координат (приведена справа на рис. 2а) ось x лежит в плоскости геомагнитного меридиана и перпендикулярна силовой линии \mathbf{B} , ось y перпендикулярна этой плоскости, а ось z направлена против вектора

геомагнитного поля. В окрестности искусственного дакта плотности наблюдалось увеличение составляющей скорости потока ионов $-V_z$, т. е. вверх вдоль силовой линии геомагнитного поля, и резкое изменение поперечных компонент скорости потока V_x и V_y на фоне естественного ветра. Тонкие линии на панелях рис. 2а демонстрируют изменения усредненных значений компонент скорости ветра вдоль траектории спутника. Резкие изменения значений поперечных компонент V_x и V_y в окрестности возмущенной магнитной силовой трубки свидетельствуют о завихренности потока ионов в данной области (рис. 2б).

Спектрограммы волновых возмущений электрических и магнитных полей и графики зависимости количества высыпающихся энергичных (~ 100 кэВ) электронов от времени пролета спутника приведены на рис. 3. Серая область, аналогично рис. 1, 2, соответствует времени пролета ИСЗ DEMETER в области возмущенной магнитной силовой трубки. В этой области наблюдается значительное увеличение интенсивности электрических полей в диапазоне до 400 Гц и магнитных полей в диапазоне до 150 Гц. Плазменно-волновой канал является открытой системой, поэтому ширина области локализации поля генерируемых мод несколько превышает поперечный масштаб плазменного волновода [14].

Важным результатом является факт возрастания в два раза (по сравнению с фоновым уровнем) интенсивности потока высыпающихся электронов с энергиями приблизительно 100 кэВ.

Отношение амплитуд магнитной и электриче-

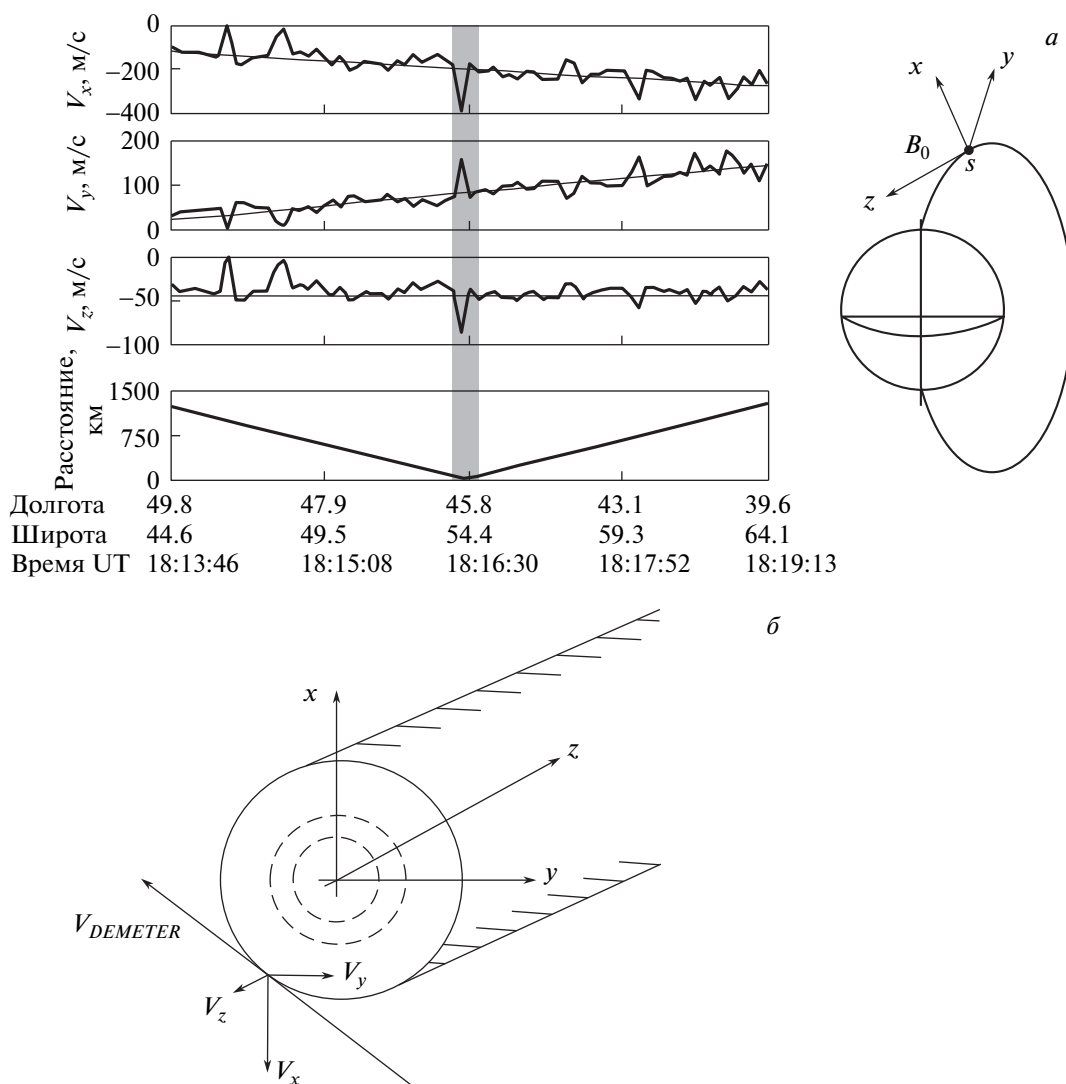


Рис. 2. Результаты измерений компонент скорости потока ионов в локальной геомагнитной системе координат (приведена справа). На рис. *a* показана временная зависимость расстояния от спутника до оси возмущенной силовой трубки. Окружности на рис. *б* соответствуют разным уровням возмущенности плазмы в предположении осевой симметрии дакта. Стрелками показаны направления скорости спутника $V_{DEMETER}$ и компонент скорости потока ионов

ской составляющих поля излучения позволяет оценить показатель преломления волны $n = B/E$. Для электрических и магнитных полей, показанных на рис. 3, при частотах ниже 100 Гц $n \approx 100$, что доказывает электромагнитную волновую природу создаваемых возмущений. Генерация электромагнитных излучений на таких низких частотах в искусственном волновом канале, а также увеличение в нем потока высыпавшихся из радиационных поясов энергичных электронов являются признаками возбуждения лазера в модифицированной каналом локаль-

ной плазменной трубке магнитосферного резонатора.

Отметим, что в отсутствие достаточно интенсивных фоновых потоков энергичных частиц мазерных эффектов не наблюдалось.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о возможности управляемого возбуждения магнитосферного лазера путем формирования искусственных волноводных каналов мощным радиоизлучением наземного передатчика.

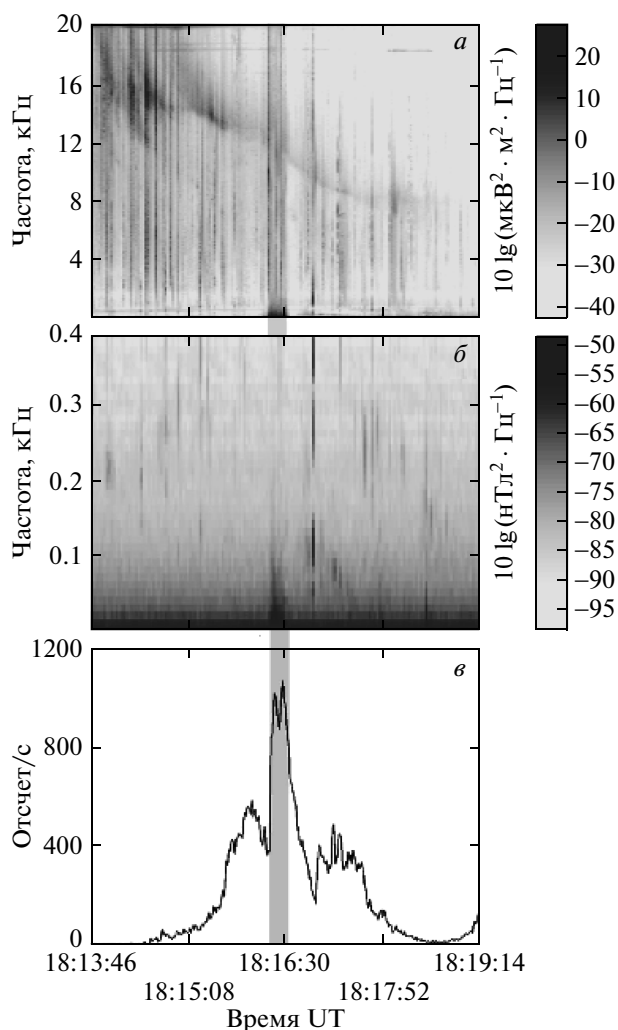


Рис. 3. Спектрограммы волновых возмущений электрических (а), магнитных (б) полей и зависимость количества высыпающих энергичных (~ 100 кэВ) электронов от времени пролета спутника (в)

3. ОБСУЖДЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИНАМИКУ МАГНИТОСФЕРНОГО МАЗЕРА

Амплитуда A_ν собственной ν -й моды резонатора, возбуждаемого сторонним переменным ($\exp(i\omega t)$) электрическим током плотностью \mathbf{j} , определяется следующим выражением:

$$A_\nu = i\omega \frac{\int (\mathbf{E}_\nu^{conj} \cdot \mathbf{j}) dV}{N_\nu(\omega^2 - \omega_\nu^2)}. \quad (1)$$

Интеграл в числителе выражения (1) берется по области источников ($\mathbf{j} \neq 0$), \mathbf{E}_ν — электрическое по-

ле ν -й моды единичной амплитуды, норма ν -й моды определяется интегралом по области, занятой полем

$$N_\nu = \int_V (\mathbf{E}_\nu^{conj} \cdot \mathbf{D}_\nu) dV,$$

где $\mathbf{D}_\nu = \overleftarrow{\epsilon} \mathbf{E}_\nu$ — вектор электрической индукции, $\overleftarrow{\epsilon}$ — тензор диэлектрической проницаемости плазмы.

В резонансных условиях $\omega \approx \omega_\nu$ амплитуда A_ν возрастает пропорционально величине добротности резонатора Q :

$$A_\nu = Q \frac{\int_{source} (\mathbf{E}_\nu^{conj} \cdot \mathbf{j}) dV}{\omega_\nu \int_{resonator} (\mathbf{E}_\nu^{conj} \cdot \mathbf{D}_\nu) dV}. \quad (2)$$

Для локализованной в искусственном волноводном канале моды норма N_ν является конечной величиной, которая при заданной амплитуде уменьшается с улучшением локализации поля в узкой силовой трубке.

Переменные токи \mathbf{j} возбуждаются на частоте $\omega = k_\parallel v - \omega_{He}$ (ω_{He} — гирочастота электронов, k_\parallel — продольная составляющая волнового числа возбуждаемых волн, v — скорость пучка электронов) в магнитосферном резонаторе из-за циклотронной неустойчивости пучков энергичных электронов, высыпающих в данной силовой трубке из радиационных поясов Земли. При наличии положительной обратной связи, обусловленной отражением возбуждаемых волн в области ионосферных зеркал, совпадении частот $\omega \approx \omega_\nu$ и скоростей пучка электронов и возбуждаемой волны, величина \mathbf{j} существенно возрастает из-за группировки резонансных электронов. Для жесткого режима возбуждения генерация в заданном резонаторе возможна при превышении амплитуды возбуждаемых колебаний некоторого порогового уровня, определяемого потерями в резонаторе ($1/Q$).

Согласно работам [15, 16] формирование дакта плотности идет за счет выноса заряженных частиц из области искусственной ионосферной турбулентности в F_2 -слое ионосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля. В распределении плотности частиц вдоль дакта кроме основного ионосферного максимума (в области отражения волны накачки) имеется перемещающийся максимум в «вершине» дакта. Такая конфигурация является резонатором для волн альфвеновского диапазона частот. Длинноволновое альфвеновское излучение, просачивающееся за перемещающийся максимум, отражается в южном полушарии от сопряженной области ионосферы

и, распространяясь вдоль выделенной силовой трубки, попадает обратно в искусственный волноводный канал, обеспечивая при этом необходимую обратную связь.

4. ВЫВОДЫ

Формирование в магнитосфере достаточно протяженного дакта (повышенной или пониженной плотности), локализуя волновые поля, уменьшает требования на возбуждающие эти волны токи, так как при этом снижаются потери на излучение через боковые стенки и уменьшается величина N_{ν} . В результате имеющихся потоков резонансных электронов может оказаться достаточно для возбуждения магнитосферного мазера в заданной силовой трубке с дактом плотности.

Наблюдаемое возбуждение мазера в сеансе, выполненном 12 мая 2008 г., свидетельствует о необходимости для запуска его генерации достаточно интенсивного потока энергичных электронов (в представленном эксперименте — порядка 10^3 частиц/с/см²/ср в диапазоне энергий порядка 100 кэВ).

Таким образом, при создании искусственных плазменных волноводов с помощью нагрева ионосферы мощным КВ-радиоизлучением наземного передатчика имеется возможность контролируемого возбуждения магнитосферного мазера, что открывает перспективы активного управляемого воздействия на локальные ионосферно-магнитосферные связи, процессы генерации и распространения низкочастотных электромагнитных излучений в магнитосфере Земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-02-00171-а) и программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № П 1072).

ЛИТЕРАТУРА

1. П. А. Беспалов, В. Ю. Трахтенгерц, в кн. *Вопросы теории плазмы*, Атомиздат, Москва (1980), вып. 10, с. 88.
2. A. G. Demekhov, V. Y. Trakhtengerts, M. M. Mogilevsky et al., *Adv. Space Res.* **32**, 355 (2003).
3. K. D. Cole, *J. Atmosph. Terr. Phys.* **33**, 741 (1971).
4. C. G. Park and R. A. Helliwell, *Radio Sci.* **6**, 299 (1971).
5. A. D. M. Walker, *Planet. Space Sci.* **26**, 375 (1978).
6. В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Г. П. Комраков и др., Письма в ЖЭТФ **88**, 908 (2008).
7. G. M. Milikh, K. Papadopoulos, and H. Shroff, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L17104 (2008).
8. А. Н. Караштин, Г. П. Комраков, Ю. В. Токарев и др., *Изв. вузов. Радиофизика* **42**, 765 (1999).
9. В. О. Рапопорт, В. Л. Фролов, Г. П. Комраков и др., *Изв. вузов. Радиофизика* **50**, 709 (2007).
10. В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Г. П. Комраков и др., *Изв. вузов. Радиофизика* **51**, 915 (2008).
11. N. F. Blagoveshchenskaya, V. A. Kornienko, A. V. Petlenko et al., *Ann. Geophys.* **16**, 1212 (1998).
12. A. V. Gurevich, K. P. Zybin, H. C. Carlson et al., *Phys. Lett. A* **305**, 264 (2002).
13. T. L. Gulyaeva and I. Stanislavska, *Ann. Geophys.* **26**, 2645 (2008).
14. I. G. Kondrat'ev, A. V. Kudrin, and T. M. Zaboronkova, *Electrodynamics of Density Ducts in Magnetized Plasmas*, Gordon and Breach, Amsterdam (1999), p. 288.
15. В. В. Васьков, Г. П. Комраков, Н. А. Рябова, *Геомагнетизм и аэронавигация* **35**, 75 (1995).
16. R. P. Perrine, G. M. Milikh, K. Papadopoulos et al., *Radio Sci.* **41**, RS4002 (2006).