УДК 537.87
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-237
ORCID 0000-0002-5226-6703

РЕЖИМЫ КАНАЛИРОВАННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОНЧ-ВОЛН В ИОНОСФЕРЕ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ НАГРЕВНОГО СТЕНДА

И.А. Елясина, И.Ю. Зудин, М.Е. Гущин, Т.М. Заборонкова

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия, i.petrova@ipfran.ru

DUCTED VLF WAVE PROPAGATION REGIMES IN THE IONOSPHERE MODIFIED BY HEATING FACILITY RADIATION

I.A. Elyasina, I.Yu. Zudin, M.E. Gushchin, T.M. Zaboronkova

Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS,
Nizhny Novgorod, Russia

Аннотация. В целях изучения особенностей распространения волн ОНЧ-диапазона в ионосферной плазме, модифицированной излучением ВЧ нагревного стенда, аналитически рассмотрена задача о собственных модах двумерного плазменного волновода, образованного парой неоднородностей концентрации с резкими границами, вытянутых вдоль внешнего магнитного поля. Выделены три вида характерных мод таких систем неоднородностей: независимые, связанные и общие. Путем сопоставления с результатами численного моделирования показано, что режим связанных волноводов, обнаруженный в выполненных ранее численных экспериментах, обусловлен суперпозицией так называемых связанных мод. Полноволновое численное FDTD-моделирование показало, что сглаживание формы границ неоднородностей, соответствующее их реалистичному профилю в ионосферных условиях, не приводит к качественному изменению структуры электромагнитных полей в системе неоднородностей.

Ключевые слова: распространение низкочастотных волн в ионосфере, ВЧ-нагрев ионосферы, плазменные волноводы.

Abstract. To investigate the propagation features of VLF waves in an ionospheric plasma modified by HF heating facility radiation, the eigenmode problem is analytically considered for a two-dimensional plasma waveguide. This guiding system is formed by a pair of field-aligned electron density depletions with sharp boundaries. Three characteristic types of modes for such irregularity systems are identified: independent, bound, and common ones. The comparison with numerical modeling results shows that the “bound waveguide” regime discovered in previous numerical experiments is determined by a superposition of the so-called “bound” modes. Full-wave numerical FDTD simulations demonstrate that smoothing the boundaries of the irregularities to match their realistic ionospheric profiles does not qualitatively change the structure of electromagnetic fields within the system.

Keywords: VLF wave propagation, ionospheric HF heating, plasma waveguides.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов, связанных с распространением ОНЧ-волн в околоземной плазме, имеет ключевое значение для понимания процессов в радиационных поясах и для развития методов радиодиагностики [Abel, Thorne, 1998; Colpitts et al., 2020]. Как показывают натурные эксперименты, воздействие мощного КВ-излучения нагревных стендов («Сура», HAARP, EISCAT) на ионосферу может оказывать заметное влияние на распространение ОНЧ-излучения [Васьков и др., 1993; Woodroffe et al., 2013]. Наблюдаемые при этом эффекты усиления низкочастотных сигналов при пролете спутника через магнитные силовые трубки, опирающиеся на пятно нагрева, могут быть связаны с формированием искусственных ионосферных дактов плотности, которые выступают в роли плазменных волноводов для ОНЧ-волн [Rapoport et al., 2010].

Обычно при теоретическом описании рассматриваются эффекты каналирования вдоль одиночных вытянутых неоднородностей с простым поперечным профилем [Заборонкова и др., 1998]. Вместе с тем реальная область модифицированной плазмы имеет сложную структуру и включает системы мелкомасштабных неоднородностей. Изначально такие структуры рассматривались преимущественно в контексте рассеяния волн [Titova et al., 1984], однако при анализе результатов натурных экспериментов, описанных в работе [Rapoport et al., 2010], было высказано предположение, что подобные системы неоднородностей могут обладать волноводными свойствами. Модельные численные эксперименты [Zudin et al., 2023] подтвердили это предположение и позволили сделать ряд качественных выводов о свойствах волн, распространяющихся вдоль систем неоднородностей в волноводном режиме.

Целью данной работы является анализ эффекта каналирования ОНЧ-волн системами неоднородностей в постановке, допускающей аналитическое описание, а также сопоставление результатов аналитического рассмотрения и численного моделирования. Анализ выполнен при значениях параметров фоновой плазмы и неоднородностей, характерных для натурных экспериментов [Rapoport et al., 2010].

ПОСТАНОВКА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ И РЕЖИМЫ КАНАЛИРОВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ МОД

Рассматривается двумерная задача распространения ОНЧ-волн, соответствующих свистовому диапазону [Заборонкова и др., 1998], вдоль пары плоских неоднородностей с резкими границами. Внешнее постоянное магнитное поле $\vec{B}_0$ направлено вдоль оси Z, а профиль электронной концентрации $N(x)$ задается кусочно-постоянной функцией поперечной координаты x:

$$N(x) = \{N^{(1)}, d \le x \le d + 2a\, N^{(2)}, -d - 2b \le x \le -d\, N^{(0)}, \text{ в остальных случаях}$$

где $N^{(0)}$ — фоновая концентрация плазмы, $N^{(1,2)}$ — концентрация плазмы в 1-й или 2-й неоднородностях. Данная модель описывает систему из двух плазменных неоднородностей с резкими границами (шириной $2a$ и $2b$ соответственно, на расстоянии $2d$). Из уравнений Максвелла, следует, что внутри каждой из неоднородностей и в фоновой плазме поле представляет собой суперпозицию плоских либо неоднородных волн

$$\left(\vec{E}^{(L)}\, \vec{H}^{(l)}\right) = exp\; exp\left(2\pi i k_z z\right) \sum_{m=1}^{4} C_m^{(l)}\; exp\; exp\left(2\pi i k_{x,m}^{(l)} x\right) \left(\vec{E}_m^{(l)}\, \vec{H}_m^{(l)}\right)$$

где $k_{x,m}^{(l)}$ — корни дисперсионного уравнения (в том числе комплексные), описывающего волны с заданным k_z внутри слоя номер l, $\vec{E}_m^{(l)}$, $\vec{H}_m^{(l)}$ — соответствующие им векторы поляризации, $C_m^{(l)}$ — комплексные амплитуды. Постоянные $C_m^{(l)}$ оказываются связанными между собой условиями непрерывности тангенциальных компонент напряженностей электрического и магнитного полей. Дополнительным требованием является обращение в нуль полей собственных волн при бесконечном удалении от неоднородностей. Совокупность данных условий приводит к системе однородных линейных алгебраических уравнений для амплитуд $C_m^{(l)}$, из условия существования нетривиальных решений которой вытекает дисперсионное уравнение для волновых чисел k_z собственных мод. Решения данной системы определяют структуры полей собственных мод. Подобный подход является стандартным при рассмотрении распространения волн вдоль плоскослоистой среды [Adachi, 1966].

На основе анализа решений задачи о собственных модах, полученных при различных значениях параметров неоднородностей, выделены три характерных режима каналирования волн в зависимости от соотношения масштаба локализации поля δ неоднородных волн в фоновой плазме и расстояния между неоднородностями:

— **Независимые моды** ($2d \gg \delta$) распространяются независимо вдоль отдельных каналов плотности, а их свойства близки к свойствам мод уединенных неоднородностей.

— **Связанные моды** ($2d \sim \delta$) характеризуются полями, локализованными внутри обеих неоднородностей одновременно, хотя плотность энергии в пространстве между ними остается низкой. Они могут наблюдаться как в системах с близкорасположенными неоднородностями, так и при значительном расстоянии между ними.

— **Общие моды** ($\boldsymbol{2d \ll \delta}$) наблюдаются в системах с близкорасположенными неоднородностями, когда плотность волновой энергии в пространстве между ними соизмерима с плотностью энергии внутри неоднородностей.

На рис. 1 представлены типичные структуры продольных компонент вектора потока энергии Умова — Пойнтинга S_z для выделенных режимов каналирования. Расчетные параметры соответствуют вечерней ионосфере средних широт на высоте порядка 700 км ($N^{(0)} = 2.4 \times 10^4$ см$^{-3}$, $B_0 = 0.44$ Гс) и частоте излучения передатчика в активных экспериментах $f = 18$ кГц [Rapoport et al., 2010].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 показан результат численного моделирования распространения свистовых волн вдоль пары плоских неоднородностей, выполненный методом конечных разностей во временной области. Параметры неоднородностей соответствуют условиям реализации наиболее интересного режима связанных неоднородностей, в котором поле излучения локализовано внутри однородностей, но при этом идет непрерывный обмен энергией между ними [Zudin et al., 2023].

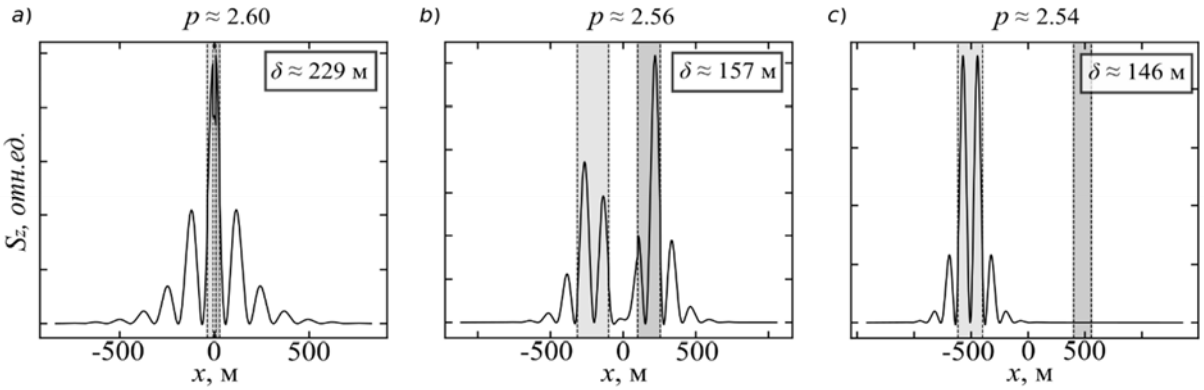

Рис. 1. Распределения $S_z(x)$, полученные для неоднородностей с характерными параметрами $N^{(1)} = 0.8N^{(0)}$, $N^{(2)} = 0.85N^{(0)}$: *а* — общая мода ($2a = 20$ м, $2b = 30$ м, $2d = 15$ м); *б* — связанная мода ($2a = 155$ м, $2b = 215$ м, $2d = 200$ м); *в* — независимая мода ($2a = 155$ м, $2b = 215$ м, $2d = 800$ м)

Сопоставление результатов расчетов и аналитического рассмотрения показывает, что суперпозиция собственных мод заданной системы неоднородностей корректно описывает рассчитанное волновое поле. Наблюдаемый в численных расчетах эффект пространственной перекачки энергии между неоднородностями оказался результатом интерференции связанных мод с близкими волновыми числами. Описанная картина подобна биениям в системе связанных осцилляторов с близкими собственными частотами, где в нормальных колебаниях (собственных модах) колебательная энергия распределена между обоими осцилляторами [Рабинович, Трубецков, 1984]. Ключевое отличие заключается в том, что каждая плазменная неоднородность сама по себе является многомодовой. Поэтому эффект перекачки энергии между неоднородностями возникает не из простой интерференции двух колебаний, а в результате сложной суперпозиции нескольких связанных мод всей системы.

Проведенный выше анализ собственных мод справедлив только для неоднородностей с резкими границами. Реальные же ионосферные структуры, возникающие при воздействии мощного излучения нагревных стендов, не имеют резких границ. Для сравнения распространения ОНЧ-волн в присутствии систем неоднородностей с резкими границами (как в аналитической задаче) и с более реалистичными плавными границами, проведено дополнительное численное моделирование.

Сравнение результатов расчетов (рис. 3) показало, что амплитуда полей на расстоянии $\boldsymbol{z_0 = 160}$ км от источника, где захваченные волны уже можно отличить от падающего излучения, отличается по модулю на величину не более 25 %. Несмотря на отличия локальных амплитудных вариаций, общая структура поля сохраняет свои характерные особенности при переходе от резких границ к плавным, что позволяет нам использовать результаты аналитической задачи для описания реальных ионосферных структур.

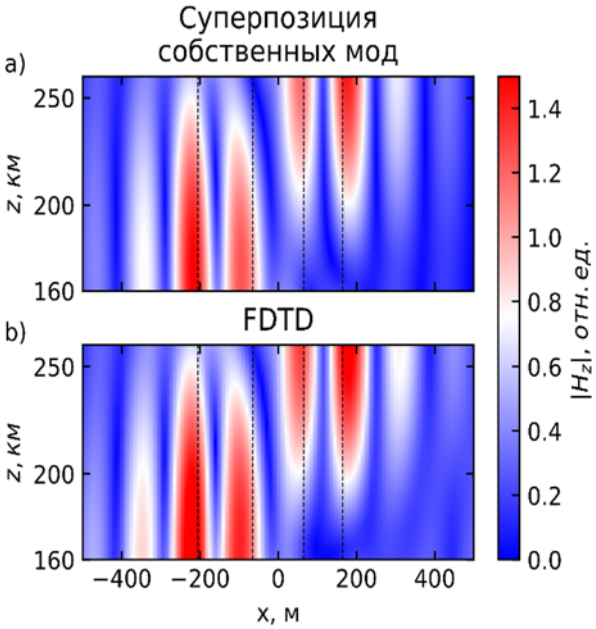

Рис. 2. пространственная структура поля $|\boldsymbol{H_z}|$: *a* — восстановленная с помощью разложения численного результата в сечении $\boldsymbol{z_0 = 160}$ км по собственным модам системы неоднородностей и последующего учета набега фаз для каждой моды; *b* — полученная в численном моделировании

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен теоретический подход к исследованию каналированных режимов распространения ОНЧ-волн в искусственно модифицированной ионосфере, содержащей системы плазменных неоднородностей, вытянутых вдоль внешнего магнитного поля. Выявлено три типа собственных мод. Продемонстрировано, что наиболее сложный режим распространения волн, наблюдавшийся в выполненных ранее численных экспериментах [Zudin et al., 2023] — режим связанных неоднородностей — обусловлен суперпозицией специфических связанных мод систем неоднородностей.

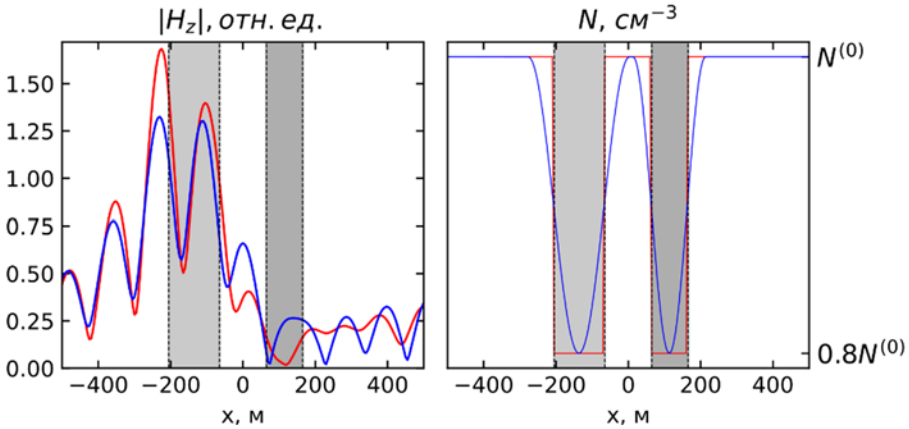

Рис. 3. Сравнение поперечной структуры $|H_z|$ в сечении $z_0 = 160$ км в системе неоднородностей одинаковой глубины с резкими (красные линии) и плавными (синие линии) границами, а также соответствующие профили концентрации плазмы

Сопоставление аналитических результатов с данными полноволнового FDTD-моделирования показало, что переход к более реалистичным плавным границам дактов не меняет качественной структуры каналированных волн. Высокая точность совпадения поля, восстановленного посредством суперпозиции собственных мод, с результатами прямого численного расчета как в одном сечении, так и на больших расстояниях показывает корректность развиваемого метода.

Полученные результаты развивают идеи существующих моделей и в дальнейшем послужат основой построения общей модели распространения ОНЧ-волн в неоднородной ионосфере Земли.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24 - 12 - 00459).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Васьков В.В., Беляев П.П., Будько Н.И. и др. Формирование ОНЧ-каналов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33. № 6. С. 91–97.

Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн: Учебное пособие. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 432 с.

Заборонкова Т.М., Костров А.В., Кудрин А.В. и др. Каналирование вистлеров в дактах с повышенной плотностью в магнитоактивной плазме // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41. № 3. С. 384–392.

Abel B., Thorne R.M. Electron scattering loss in Earth's inner magnetosphere: 1. Dominant physical processes // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, N A2. P. 2385–2396.

Adachi S. Theory of duct propagation of whistler radio waves // Radio Sci. 1966. V. 1. N 4. P. 671–678.

Colpitts C.A., Miyoshi Y., Kasahara Y., et al. First direct observations of propagation of discrete chorus elements from the equatorial source to higher latitudes, using the Van Allen Probes and Arase satellites // J. Geophys. Res: Space Phys. 2020. V. 125. e2020JA028315.

Rapoport V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V. et al. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A10322.

Titova E.E., Di V.I., Iurov V.E. et al. Interaction between VLF waves and the turbulent ionosphere // Geophys. Res. Lett. 1984. V. 11. N 4. P. 323–326.

Woodroffe J.R., Streltsov A.V., Vartanyan A., et al. Whistler propagation in ionospheric density ducts: Simulations and DEMETER observations // J. Geophys. Res: Space Phys. 2013. V. 118. P. 7011–7018.

Zudin I.Yu., Zaboronkova T.M., Gushchin M.E., et al. Whistler waves' propagation in plasmas with systems of small-scale density irregularities: numerical simulations and theory // J. Geophys. Res: Space Phys. 2023. V. 128. e2023JA031616.