

# Резонансное туннелирование электромагнитных волн через слой неоднородной плазмы ионосферы

Ерохин Н.С.<sup>1)</sup>, Меркулов Е.С.<sup>2)</sup>, Поверенный М.В.<sup>2)</sup>

*<sup>(1)</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

*<sup>(2)</sup>Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, Елец, Россия*

*e-mail: channel165@mail.ru, nerokhin@mx.iki.rssi.*

**Шестая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе"**

**Москва, ИКИ РАН, 14 - 18 февраля 2011 г.**

**Секция "Ионосфера"**

**Аннотация.** Рассмотрены точные решения линейного уравнения Гельмгольца, описывающие безотражательное прохождение электромагнитной волны через широкий неоднородный слой плазмы с мелкомасштабными структурами ее плотности большой амплитуды. Показано, что плазменный слой может включать достаточно широкие области непрозрачности, а также субслои, в которых возникают всплески волнового поля большой амплитуды. Изменением параметров задачи можно существенно варьировать профиль неоднородности плазмы в слое с включением любого числа различных мелкомасштабных структур, областей непрозрачности и в каждом случае реализуется безотражательное прохождение падающей из вакуума электромагнитной волны через неоднородный плазменный слой. Получены профили пространственного распределения нормированной амплитуды поля электромагнитной волны, эффективной диэлектрической проницаемости плазмы, безразмерного волнового числа и неоднородного распределения плотности плазмы в слое, демонстрирующие большие вариации характеристик волны и плазменного слоя. Причины использования для данных взаимодействий точно решаемых моделей заключаются в наличии мелкомасштабных неоднородностей большой амплитуды.

Точно решаемые модели представляют интерес для исследования особенностей взаимодействия электромагнитных волн с неоднородными средами, в частности, возможностей их безотражательного туннелирования через волновые барьеры. Решение и исследование точных моделей важны как для теоретического анализа возможностей туннелирования волн через протяженные, сильно неоднородные слои, так и для практических приложений, в частности, в задачах нагрева плазмы электромагнитным излучением, просветления волновых барьеров, для понимания механизмов выхода излучения от источников, находящихся в плотной плазме в астрофизике.

Кроме того такие модели активно используются для исследований по повышению эффективности просветляющих и поглощающих покрытий в радиодиапазоне и разработки тонких радиопрозрачных обтекателей для антенн.

Используемая в данной работе методика анализа представляет несомненный интерес также для задач согласования характеристик плазмы и падающей из вакуума электромагнитной волны, позволяющего существенно увеличить эффективность поглощения электромагнитного излучения в слоях плазменных резонансов.

Анализ точно решаемых моделей позволит значительно улучшить существующие представления о пространственно-временной динамике электромагнитных полей в неоднородных диэлектрических структурах.

## Введение

Исследования точно решаемых моделей взаимодействия электромагнитных волн с неоднородными и нестационарными средами представляет интерес для целого ряда приложений, например, для повышения эффективности просветляющих и поглощающих покрытий в радиодиапазоне, разработки радиопрозрачных обтекателей для антенн, объяснения механизма выхода излучения от источников в астрофизике и в поисках оптимального распределения диэлектрической проницаемости, при котором происходит эффективная передача электромагнитных сигналов через слои плотной плазмы (просветление волновых барьеров).

По-существу, речь идет об эффекте резонансного туннелирования волн через структурированную среду включающую и слои непрозрачности. Иначе говоря в этом случае имеет место согласование электромагнитной волны с неоднородным диэлектрическим слоем, например, слоем плазмы.

В настоящем сообщении изложены результаты исследования на основе точного линейного решения безотражательного падения электромагнитной волны на слой плазмы конечной толщины, содержащий мелкомасштабные неоднородности плотности плазмы (в масштабе вакуумной длины волны). Изучены случаи, когда диэлектрическая проницаемость как меньше, так и больше единицы (магнитоактивная плазма).

## Основные уравнения и результаты их анализа

Анализ взаимодействия электромагнитных волн с неоднородной средой проведем на основе уравнения Гельмгольца для поля монохроматической электромагнитной волны  $E(x,t) = F(x) \cdot \exp(i \omega t)$  следующего вида

$$d^2 F / dx^2 + k_0^2 \cdot \epsilon_{ef}(x) \cdot F = 0 \quad (1)$$

Здесь  $k_0 = \omega / c$  – вакуумное волновое число,  $\epsilon_{ef}(x)$  – эффективная диэлектрическая проницаемость неоднородной среды. В случае плазмы она определяется пространственным распределением концентрации и в отсутствие внешнего магнитного поля для электронных колебаний имеем  $\epsilon_{ef}(x) = 1 - (\omega_{pe} / \omega)^2 < 1$ , где  $\omega_{pe}$  – ленгмюровская частота электронов. При поперечном распространении волны в магнитоактивной плазме будет  $\epsilon_{ef}(x) \equiv N^2(x) = \epsilon_{\perp} - (\epsilon_c^2 / \epsilon_{\perp})$ , где  $N$  – показатель преломления,  $\epsilon_{\perp}$  и  $\epsilon_c$  – компоненты тензора диэлектрической проницаемости на частотах верхнего гибридного резонанса. Отметим, что уравнение (1) соответствует в квантовой механике рассеянию частицы с нулевой энергией на неоднородном потенциале:  $U(x) = -\epsilon_{ef}(x)$ . Для удобства вычислений введем безразмерную переменную  $\xi = k_0 x$ . Аналогично [2, 3] точное решение уравнения (1) ищем в заданном выражении

$$F(\xi) = B \cdot \exp[i \Psi(\xi)] \cdot [1 / p(\xi)]^{1/2}, \quad d\Psi / d\xi = p(\xi),$$

здесь  $B = \text{const}$  [2,3], определяемая потоком энергии в волне.

Зададим волновое число формулой  $q(\xi) = 1 + \chi \cdot [1 - \cos(\alpha \cdot \xi)]$ ,  $p(\xi) = [q(\xi)]^2$ .

При этом диэлектрическая проницаемость плазмы определяется выражением

$$\varepsilon_{ef}(\xi) = [p(\xi)]^2 - p(\xi)^{0.5} d^2 [1 / p(\xi)^{0.5}] / d\xi^2$$

с параметрами  $\chi$ ,  $b$ ,  $\alpha = 2\pi n / b$ . Для безразмерной амплитуды волны имеем формулу  $A(\xi) = 1 / [p(\xi)]^{1/2}$ . Следовательно, в неоднородном слое  $0 \leq \xi \leq b$  выполняется условие  $p^2 > 0$ . Важно отметить, что в данном случае на границах слоя величина  $p$  равна вакуумному значению  $1$  и поскольку производные волнового вектора  $p_\xi(0) = p_\xi(b) = 0$  возможна сшивка безотражательного решения с падающей на слой слева и уходящей от него справа волнами, а  $\chi$ ,  $b$ ,  $\alpha$  являются свободными параметрами задачи,  $n$  целое число. При выборе параметров  $\chi = -0.4$ ,  $b = 20$ ,  $n = 1$  получаем вариант плазмы без внешнего магнитного поля, а графики пространственных профилей диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(\xi)$ , волнового числа  $p(\xi)$ , амплитуды  $A(\xi)$  и безразмерной плотности плазмы  $v(\xi) = 1 - \varepsilon(\xi)$  имеют вид, представленный на **рис.1**. Как видим из рис.1, профиль диэлектрической проницаемости включает и слои непрозрачности, в которых  $\varepsilon(\xi) < 0$ . Усиление амплитуды волны в неоднородном слое равно  $5$ , при этом минимальное значение волнового числа  $\min p = 0.04$ , профиль плотности плазмы  $v(\xi)$  является двухгорбым.

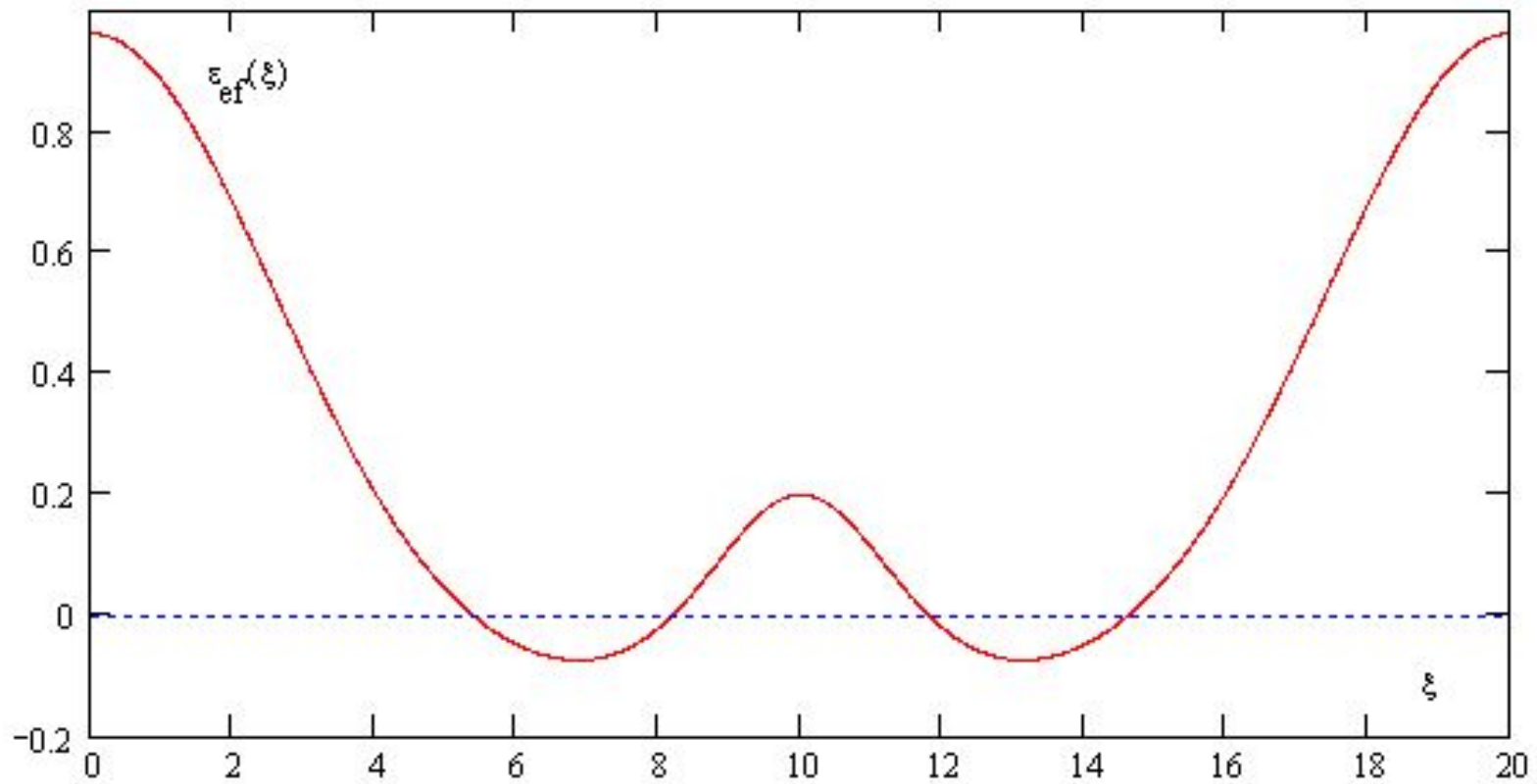


Рис. 1а. Эффективная диэлектрическая проницаемость плазмы.  
Отметим наличие двух слоев непрозрачности.

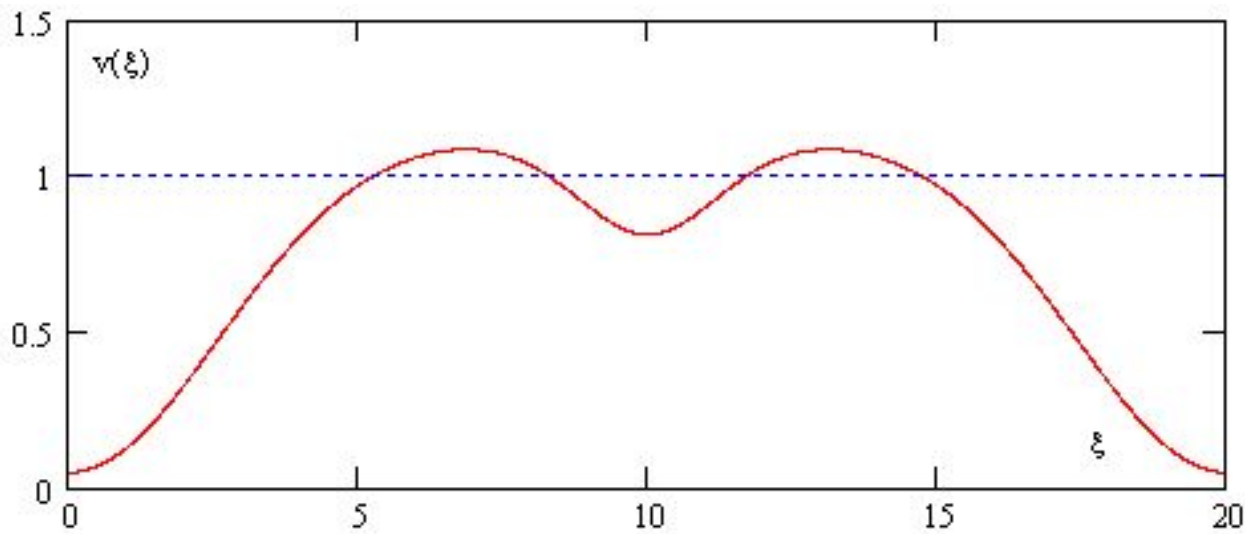


Рис.1б. Безразмерная плотность плазмы в слое.

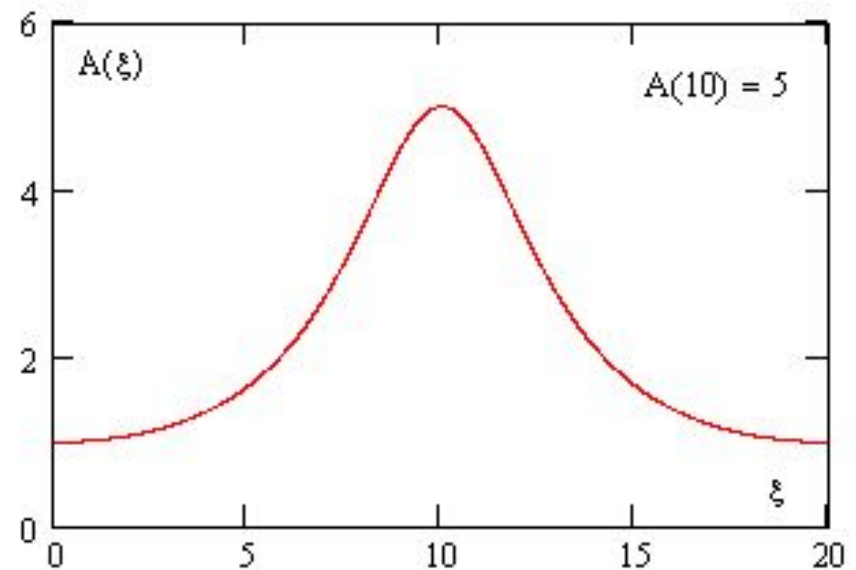
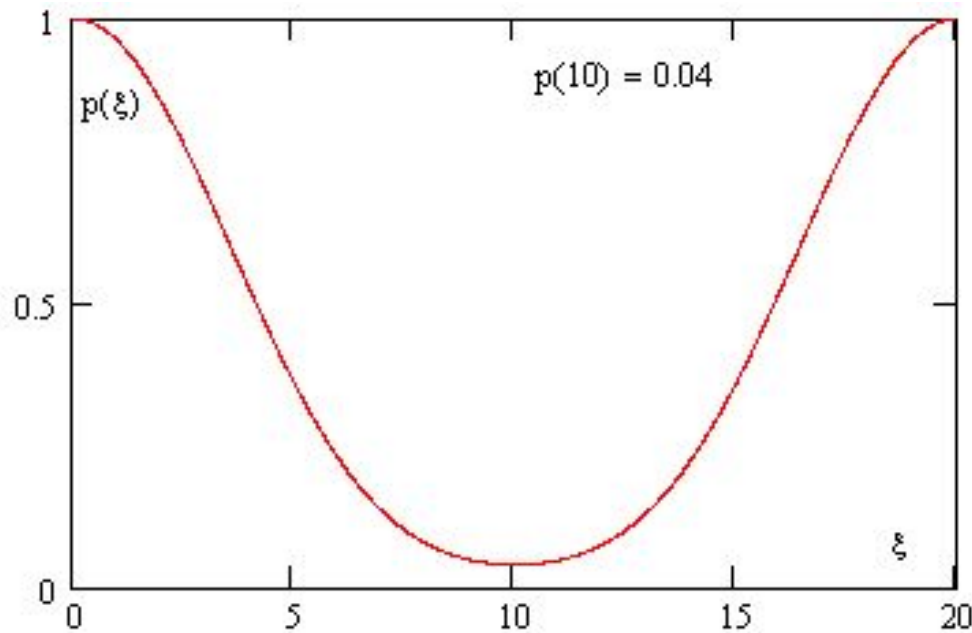


Рис.1в, рис.1г. Графики безразмерных волнового вектора и амплитуды волны в неоднородном плазменном слое.



Другой вариант параметров  $\chi = -0.4$ ,  $b = 10$ ,  $\alpha = 2\pi / b$  (более широкий слой плазмы  $0 \leq \xi \leq 40$ ) представлен на рис.2. Отметим большее число структур, их различие, особенно видное на графике  $\varepsilon_{ef}(\xi)$ . В слое есть области непрозрачности.

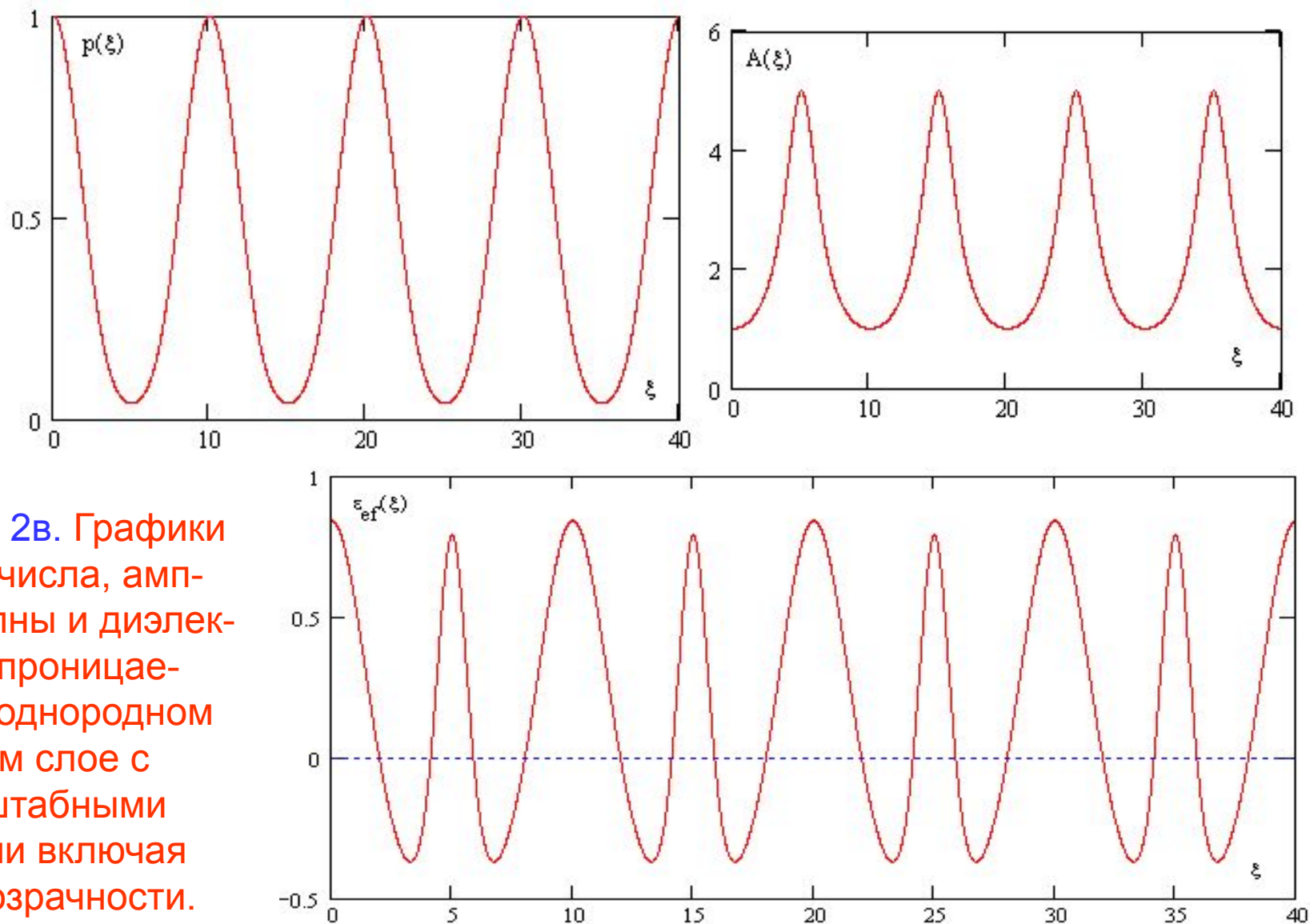


Рис.2а, 2б, 2в. Графики волнового числа, амплитуды волны и диэлектрической проницаемости в неоднородном плазменном слое с мелкомасштабными структурами включая слои непрозрачности.

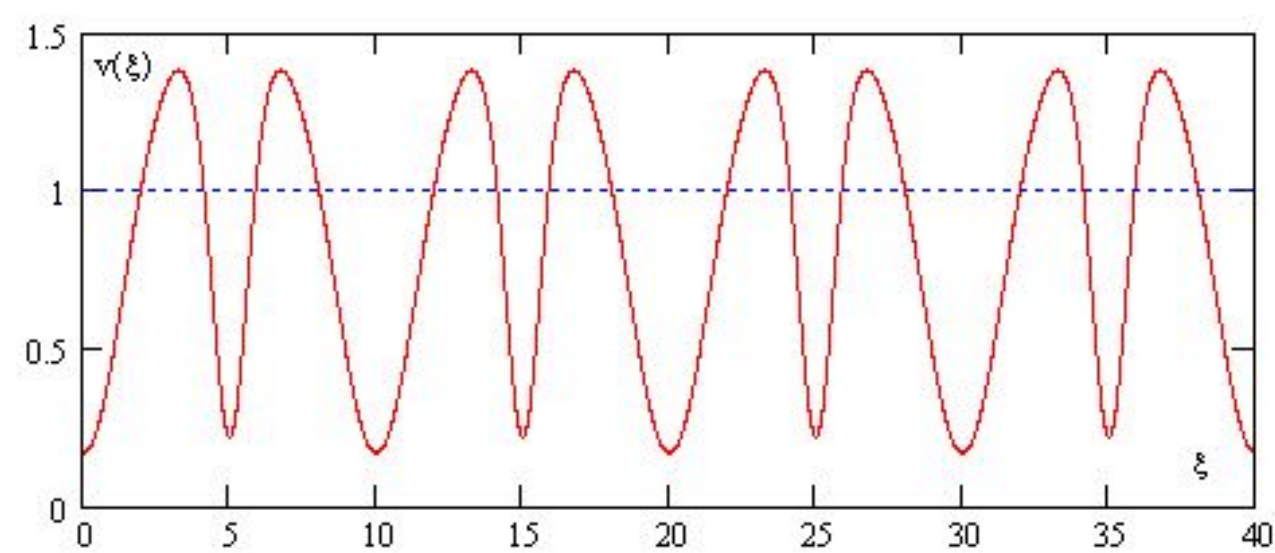


Рис. 2г. График без-размерной плотности плазмы. Имеется большое число мелкомасштабных структур. Внешнее магнитное поле отсутствует.

Другой случай безотражательной неоднородности плазмы дан ниже на рис.3 включая выбор исходных параметров задачи и более сложный вид функции  $p(\xi)$ :  
 $q(\xi) = 1 + \chi \cdot [1 - \cos(\alpha \cdot \xi)]$ ,  $p(\xi) = [q(\xi)]^2 + \mu \cdot \gamma^2 \cdot \xi^2 \cdot (1 - \gamma \cdot \xi)^2$ . Условия безотражательного прохождения электромагнитной волны через этот слой неоднородной плазмы выполняются при произвольных значениях исходных параметров. На рис.3 приведены графики в случае  $\chi = -0.417$ ,  $b = 40$ ,  $\alpha = 2 \cdot \pi / b$ ,  $\mu = 1.8$ ,  $\gamma = 1 / b$ . Можно рассмотреть и другие случаи выбора исходных параметров задачи, результаты расчетов оказываются аналогичными представленным выше.

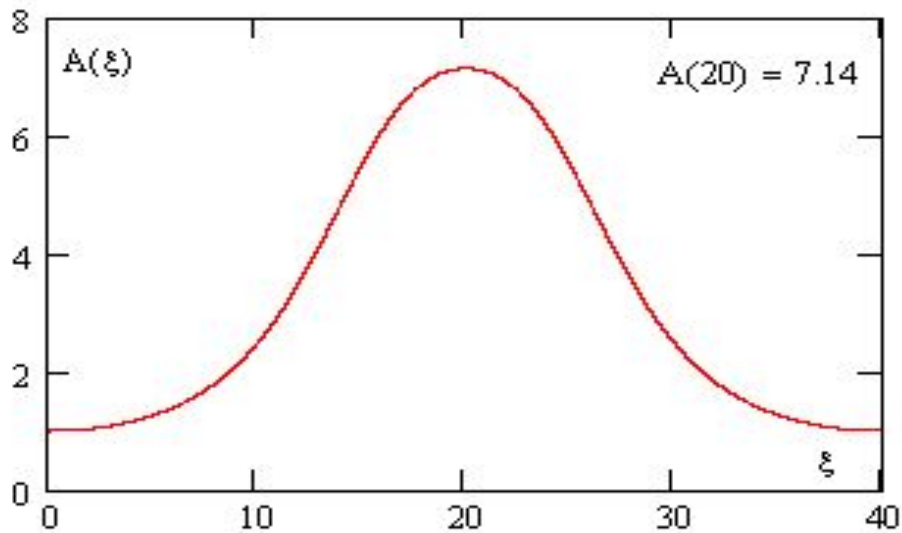


Рис. 3а. График нормированной амплитуды волны  $A$ . Максимальное усиление поля волны в слое равно примерно 7.

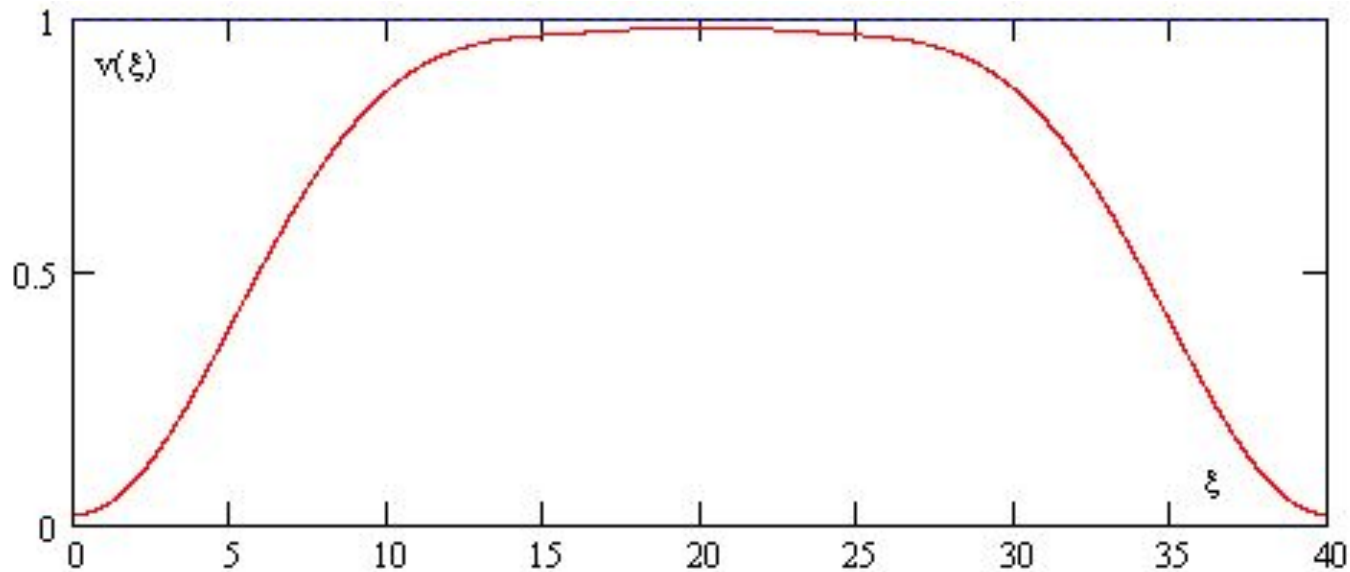
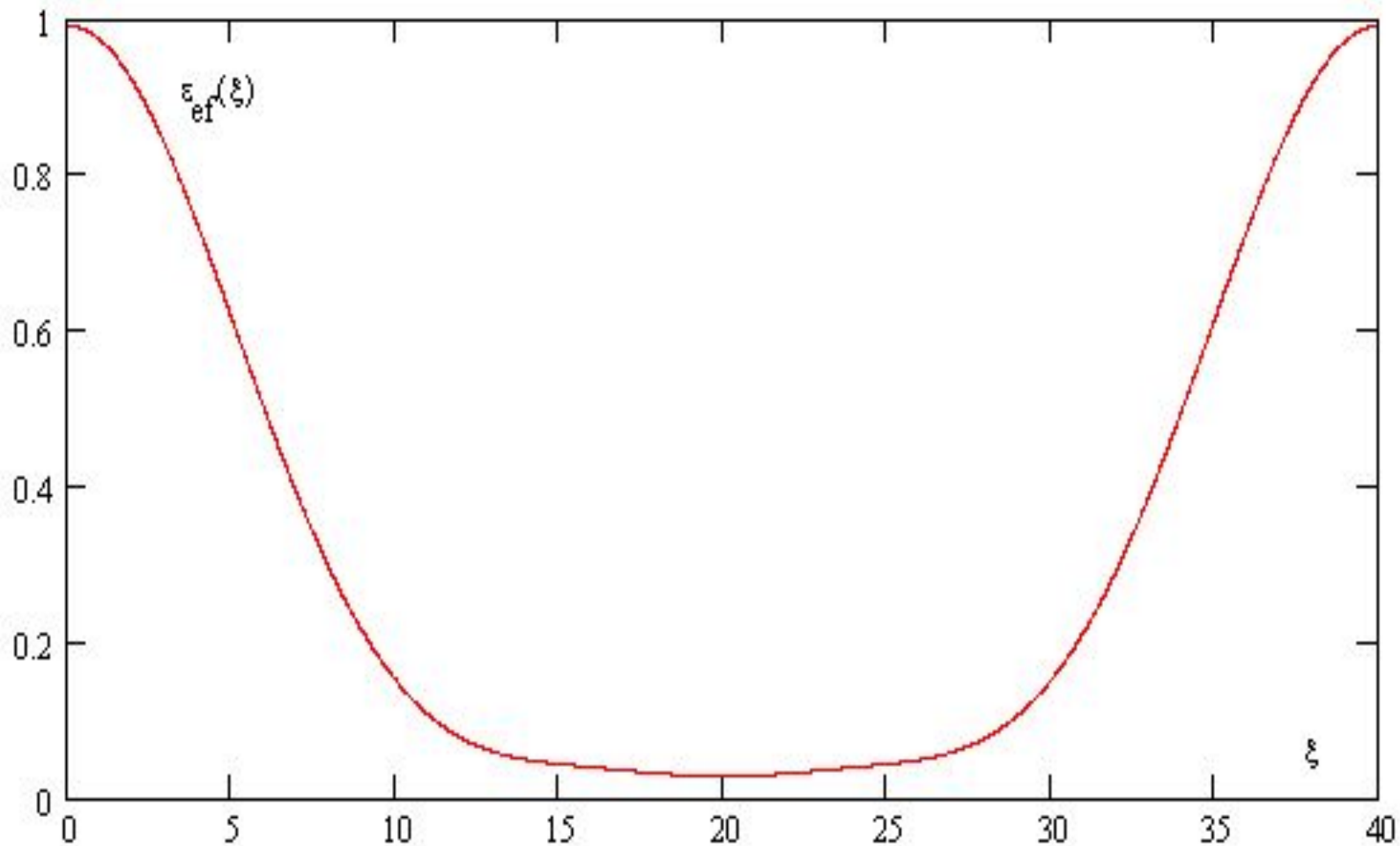


Рис. 3б. График безразмерной плотности плазмы. Отметим широкий плавный горб плотности в данной неоднородности и отсутствие слоев непрозрачности.



**Рис. 3в.** Профиль эффективной диэлектрической проницаемости плазмы при безотражательном распространении волны через слой. В данном варианте наблюдается плавная неоднородность слоя при отсутствии областей непрозрачности, в которых  $\varepsilon_{\text{ef}}(\xi) < 0$ . Внешнее магнитное поле отсутствует.

Для описания безотражательного прохождения электромагнитной волны (при поперечном к внешнему магнитному полю распространении) через неоднородный слой магнитоактивной плазмы была рассмотрена точно решаемая модель с большим всплеском поля

$$A(\xi) = \alpha / [1 - \chi \cdot (1 + \cos \eta)], \quad p(\xi) = 1 / [A(\xi)]^2, \quad \eta = \gamma \cdot \xi, \quad 0 \leq \xi \leq b, \quad \gamma = 2 \cdot \pi / b.$$

Для случая выбора параметров  $\chi = 0.4$ ,  $b = 3$ ,  $\alpha = 20$ ,  $u = \omega_{\text{He}} / \omega = 0.2$  результаты численных расчетов приведены на рис.4.

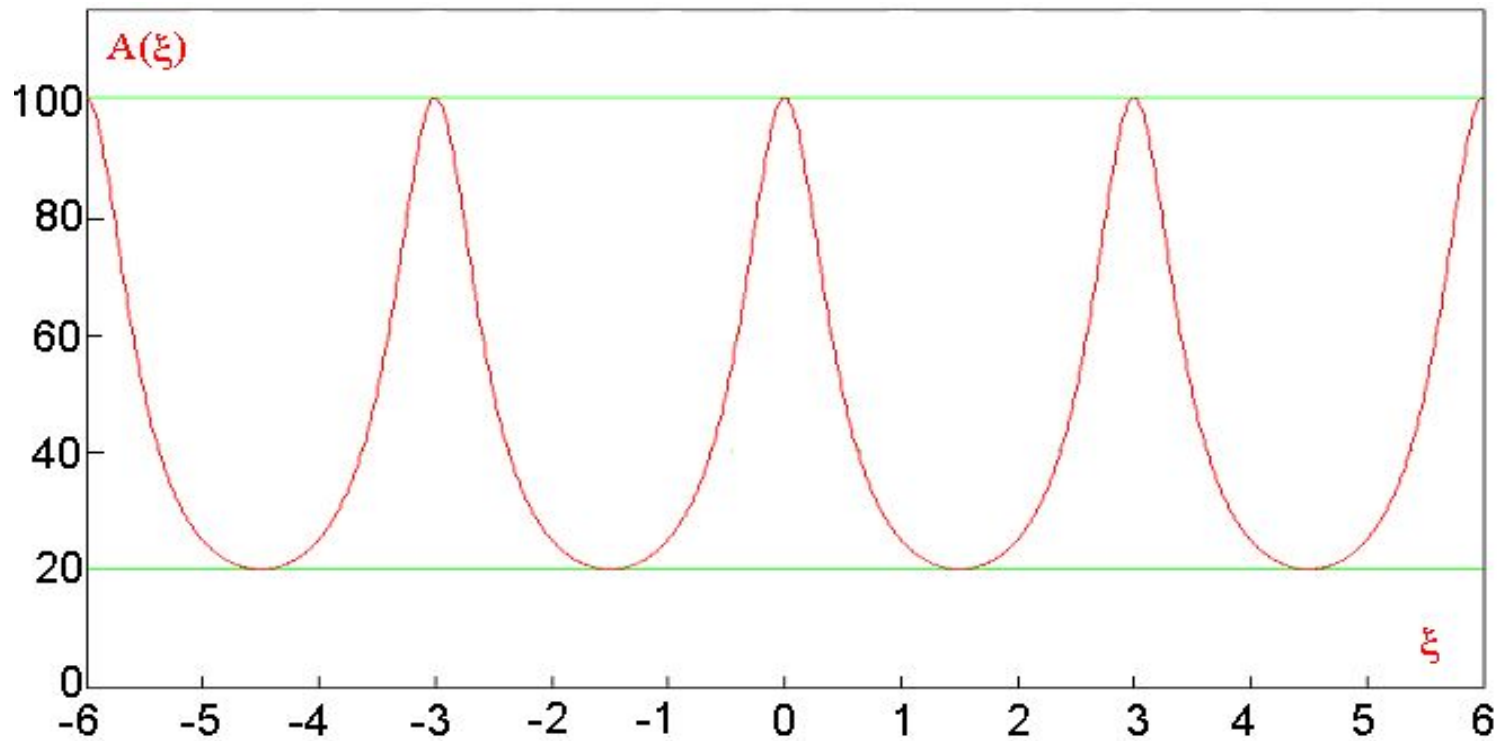


Рис.4а. График амплитуды волны в плазменном слое. Отметим большие всплески поля волны в некоторых субслоях.

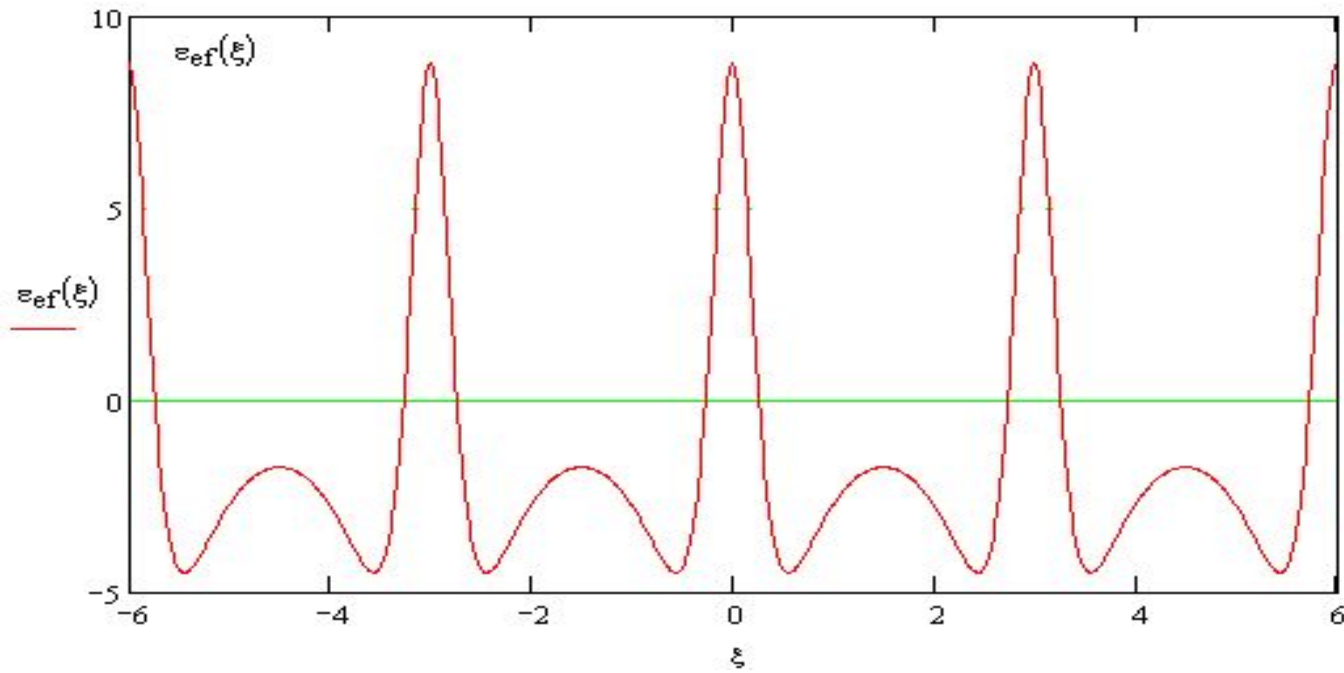


Рис.4б. График эффективной диэлектрической проницаемости магнитоактивной плазмы при безотражательном прохождении волны через слой. Имеются 4 области непрозрачности, в которых  $\varepsilon_{\text{ef}}(\xi)$  отрицательна.

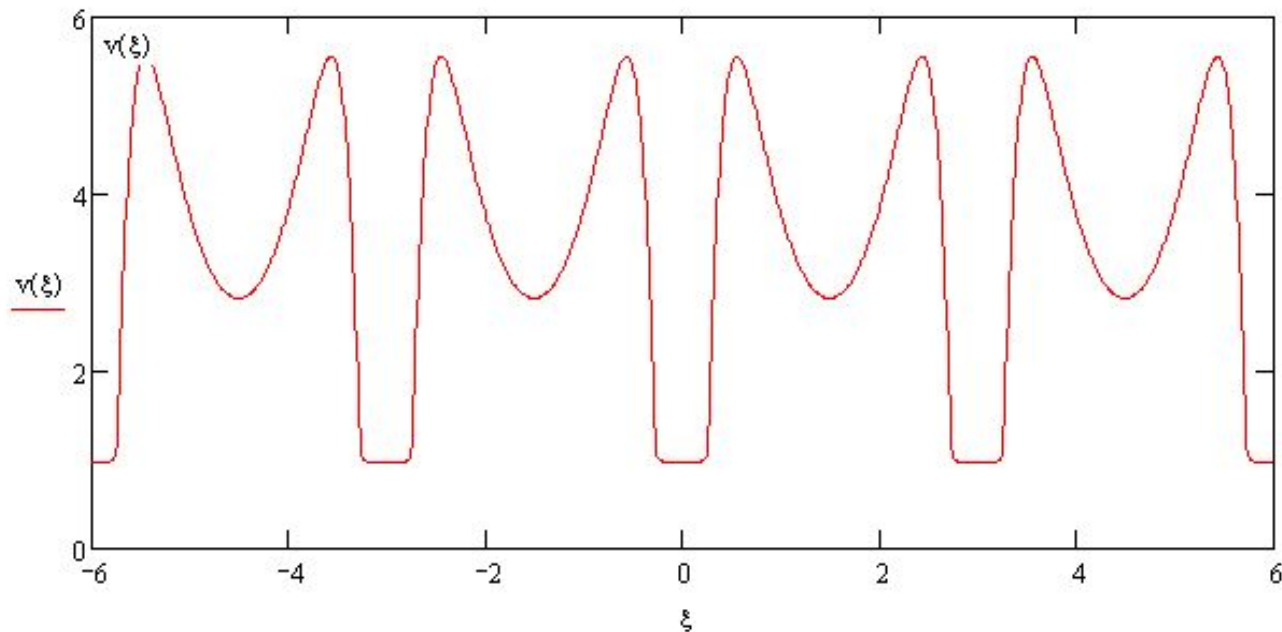


Рис.4в. График безразмерной плотности магнитоактивной плазмы при безотражательном прохождении волны через слой.

# Заключение

Таким образом в настоящей работе на основе точно решаемых моделей изучено безотражательное взаимодействие электромагнитных волн с неоднородными мелкомасштабными структурами слоя плазмы.

В задаче имеется ряд независимых параметров, в частности, толщина неоднородного слоя и глубина модуляции диэлектрической проницаемости. Меняя параметры можно получить большое количество полностью просветленных неоднородных слоев с мелкомасштабными структурами плотности плазмы большой амплитуды.

Важно отметить, что неоднородность можно представить и в виде произвольного числа различных слоев, стратификация в каждом из которых будет определяться некоторым количеством независимых параметров. Тем не менее существенно варьируя профиль неоднородности имеем полное отсутствие какого-либо отражения волны от плазменного слоя.

Принципиально и то, что неоднородности могут быть как плавными, так и весьма резкими в масштабе эффективной длины волны и содержать слои непрозрачности.

# Литература

- [1]. Гинзбург В.Л., Рухадзе А. Электромагнитные волны в плазме. М.: Наука, 1970, 207 с.
- [2]. Жаров А.А., Кондратьев И.Г., Миллер М.А. Физика плазмы. 1979, т.5, вып.2, с.261.
- [3]. Шварцбург А.Б. УФН, 2000, т.170, № 12, с.1297.
- [4]. Ерохин Н.С., Захаров В.Е. Доклады Академии наук, сер. Физика. 2007, т.416, № 3, с.1.
- [5]. Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Ерохин Н.Н. Некоторые примеры точных решений математических моделей, описывающих колебания непрерывных сред. Препринт Пр-2109, Москва, ИКИ РАН, 2005, - 14 с.
- [6]. Гах Г.В., Ерохин Н.С. Вопросы атомной науки и техники. 2008, № 4, с.119.
- [7]. Б.А. Лаговский. Радиотехника и электроника. 2006, т.51, с.74.
- [8]. S.V. Nazarenko, A.C. Newell, V.E. Zakharov. Physics of Plasmas. 1994, v.1, p.2827.
- [9]. А.Н. Козырев, А.Д. Пилия, В.И. Федоров. Физика плазмы. 1979, т.5, с.322.
- [10]. N.S. Erokhin, V.E. Zakharov. Soliton-like splashes of the electromagnetic field during reflectionless wave propagation in the inhomogeneous plasma. Международная конференция МСС-09 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность". Сборник трудов, Изд-во "URSS", Москва, 2009, с.164-169.