*Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 381–383.*

УДК 537.84
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-381

# ШИРОТНАЯ СТРУКТУРА МГД-ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

**Т.С. Фатехов**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия
fatekhov.ts@phystech.edu

# LATITUDE STRUCTURE OF MAGNETOHYDRODYNAMIC WAVES IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE

**T.S. Fatekhov**

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia, fatekhov.ts@phystech.edu

**Аннотация.** Резонансное преобразование мод МГД-волн в околоземной плазме обеспечивает физическую основу для диагностики параметров магнитосферного альвеновского резонатора (МАР) с использованием наземных наблюдений УНЧ-пульсаций. Первоначально основные понятия теории МАР были сформулированы в рамках крайне упрощенной модели: «плазменного ящика» с прямыми силовыми линиями и одномерной линейной неоднородностью плазмы [Southwood, 1974]. Несмотря на кажущуюся простоту такой модели, спектральные свойства соответствующей системы уравнений оказались нетривиальными, но методы качественной теории дифференциальных уравнений подтвердили, что основные предсказания теории «плазменного ящика» остаются в силе и в более реалистичной ситуации. Теория МАР является локальной, т.к. предлагаемые ею асимптотические решения описывают структуру поля только в непосредственной близости от резонансной силовой линии. В наших исследованиях мы пытаемся расширить теорию МАР в двух направлениях:

- рассмотреть немонотонный профиль альвеновской частоты, при котором возникает экстремум и две близкие связанные резонансные точки;
- оценить параметры поверхностной волны, образующейся на ступенчатом профиле альвеновской частоты в плазме, находящейся в криволинейном магнитном поле.

В докладе будут представлены предварительные результаты рассмотрения этих задач.

**Ключевые слова:** МГД-волны, геомагнитные пульсации, трансформация мод, ионосферный радар, магнитометр.

**Abstract.** Resonant mode conversion of MHD waves in near-Earth plasma provides a physical basis for diagnosing the parameters of the magnetospheric Alfvén resonator (MAR) using ground-based observations of ULF pulsations. Initially, the basic concepts of MAR theory were formulated within the framework of an extremely simplified model: a "plasma box" with straight field lines and a one-dimensional linear plasma inhomogeneity [Southwood, 1974]. Despite the apparent simplicity of this model, the spectral properties of the corresponding system of equations turned out to be nontrivial, but methods of the qualitative theory of differential equations confirmed that the basic predictions of the "plasma box" theory remain valid in a more realistic situation. MAR theory is local, since the asymptotic solutions it proposes describe the field structure only in the immediate vicinity of a resonant field line. In our research, we attempt to expand the MAR theory in two directions:

- to consider a nonmonotonic Alfvén frequency profile that produces an extremum and two closely related resonant points;
- to estimate the parameters of a surface wave formed on a stepped Alfvén frequency profile in a plasma located in a curvilinear magnetic field.

This report will present preliminary results from these problems.

**Keywords:** MHD waves, geomagnetic pulsations, mode transformation, ionospheric radar, magnetometer.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Резонансное преобразование МГД-мод служит физической основой для диагностики параметров магнитосферного альвеновского резонатора (МАР) с использованием наземных наблюдений УНЧ-пульсаций. Резонансные характеристики УНЧ-волн в Pc3–5 диапазонах (периоды от нескольких десятков секунд до нескольких минут) позволяют, хотя их источник неизвестен, определить локальные значения ключевых параметров МАР, таких как резонансная частота $\omega_A$, которая является индикатором плотности магнитосферной плазмы, и ширина пика УНЧ резонанса $\delta$, которая является показателем доминирующего механизма затухания.

Теория альвеновского резонанса силовых линий, основанная на идее преобразования быстрой магнитозвуковой (компрессионной) моды в альвеновскую волну, является одной из ключевых теорий в физике УНЧ-волн в земной магнитосфере. Согласно этой теоретической концепции, МГД-возмущения из внешних магнитосферных областей распространяются вглубь неоднородной магнитосферы и посредством преобразования мод возбуждают стационарные колебания силовых линий между сопряженными ионосферами. Трансформация мод наиболее эффективна вблизи резонансной геомагнитной оболочки, где частота $\omega$ внешнего источника совпадает с локальной частотой $\omega_A(L)$ альвеновских колебаний силовых линий. Накачка энергии волны в резонансную область вызывает рост и сужение пространственного резонансного пика. Этот рост прекращается на определенном уровне в зависимости от доминирующего механизма диссипации, такого как ионосферная джоулевая

диссипация, утечка в мелкомасштабную дисперсионную альвеновскую волну, магнитосферная турбулентность или конечное время воздействия. Таким образом, доминирующий механизм затухания определяет эффективную добротность MAR. Ширину резонанса и коэффициент усиления можно аппроксимировать как $\delta \simeq a/Q$ и $B_{max} / B_0 \simeq Q$, где a — поперечный масштаб неоднородности скорости альфвеновской волны.

Центральная проблема экспериментального определения параметров MAP заключается в том, что вклад в спектральный состав резонансного отклика MAP и от источника волн сопоставимы. То есть, спектральный пик не обязательно соответствует $\omega_A$, и $\delta$ нельзя использовать непосредственно для определения добротности MAP $Q_A$. Эта неоднозначность может быть разрешена с помощью градиентного метода и его усовершенствованных модификаций. Точные измерения градиентов спектральной амплитуды и фазы вдоль малой базовой линии позволяют исключить влияние формы спектра источника и выявить даже относительно слабые резонансные эффекты.

Первоначально основные понятия резонансной теории были сформулированы в рамках крайне упрощенной модели: «плазменного ящика» с одномерной неоднородностью плазмы поперек прямых силовых линий [Southwood, 1974]. Несмотря на кажущуюся простоту такой модели, спектральные свойства соответствующей системы уравнений МГД оказались нетривиальными. Методы качественной теории дифференциальных уравнений были применены для обобщения основных результатов на более сложные системы: многомерная неоднородность, криволинейное магнитное поле, конечное давление плазмы и конечная проводимость ионосферы. Результаты этих исследований подтвердили, что основные предсказания теории плазменного ящика остаются в силе в более реалистичной ситуации. По этой причине данная простая модель плазменного ящика дает неожиданно исчерпывающее описание наблюдаемой пространственной структуры резонанса от волн Pc5 на авроральных широтах до Pc4 на средних широтах и пульсаций Pc3 на низких широтах.

Теория альвеновского резонанса является локальной теорией, поэтому предлагаемые ею асимптотические решения описывают только локальную структуру в непосредственной близости от резонансной силовой линии. Более глобальное распределение может быть описано только численной моделью или аналитически с использованием значительных теоретических упрощений. Для изучения глобального распространения МГД-волн в магнитосфере был разработан и успешно использован ряд численных моделей. Все эти модели дали много ценных сведений о проблеме и обеспечили убедительное подтверждение результатов, полученных с помощью локального аналитического подхода. Поскольку распределение альвеновской скорости в земной магнитосфере по радиусу немонотонно, может возникать несколько резонансных точек для заданной частоты внешнего источника. В частности, возможна ситуация вблизи плазмопаузы, когда две резонансные точки сближаются. Рассмотрение особенностей поля МГД-волны в этой области является одной из задач нашего рассмотрения.

В околоземной среде присутствуют области плазмы с резкими скачками параметров на границе раздела, например – магнитопауза и плазмопауза. Похожие структуры существуют и в атмосфере Солнца. Поверхностные волны (ПВ) на этой границе играют ключевую роль в передаче массы, энергии и импульса внутрь соответствующих систем. При этом ПВ действуют как эффективный механизм фильтрации, накопления и переноса турбулентных возмущений, повсеместно присутствующих в космической плазме. На дневной магнитопаузе, где скорость потока обтекающей магнитосферу плазмы магнитослоя мала, может возбуждаться поверхностная мода. Кроме того, сама граница между двумя плазменными потоками может стать неустойчивой при достаточно большом сдвиге скоростей благодаря неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и стать источником МГД волн. При отражении волн от границы сдвигового потока они могут приобрести дополнительную энергию, как это происходит в системах с отрицательной энергией. Таким образом, неустойчивости поверхностных мод являются одним из основных механизмов генерации МГД-волн в космическом пространстве и астрофизических объектах.

Однако в настоящее время нет даже общего представления о ПВ на дневной магнитопаузе. Остаются многие фундаментальные вопросы о применимости предположений, которые зачастую используются при интерпретации волновых явлений – прямолинейная геометрия магнитного поля, бесконечно тонкие границы, несжимаемость плазмы, отсутствие самосогласованной связи с альфвеновским континуумом, и др. Прогресс в понимании ПВ в космической плазме затруднен из-за трудностей с их обнаружением. Например, для открытия поверхностной моды магнитопаузы потребовалось 5 космических аппаратов, выстроенных вдоль одной траектории. Методы обнаружения ПВ, использующие сети высокоширотных наземных магнитных обсерваторий, ионосферных радаров и сканирующих фотометров позволяют получить лишь косвенные доказательства.

Глобальные МГД-моды с дискретным спектром, как и ПВ, играют особую роль в волновой физике. Любая система более эффективно поглощает энергию набегающего турбулентного потока на собственной частоте глобальной моды. По сути, режим возбуждения ПВ работает как резонатор Фабри-Перро, обеспечивающий естественный процесс частотной фильтрации в турбулентной гелиогеофизической

плазме. Обычно теория ПВ строится для модели «плазменного ящика» с прямыми силовыми линиями, ограниченными сопряженными ионосферами. Амплитуда поверхностной моды экспоненциально затухает от границы с масштабом $1 / k$, где $k$ — волновой вектор вдоль границы. Для крупномасштабных ПВ их экспоненциальные «хвосты» выходят за пределы пограничного слоя, и могут возбуждать как БМЗ моды волновода, так и альвеновский континуум. Связь ПВ с резонаторными (волноводными) модами может приводить к образованию своего рода излучательных неустойчивых мод. ПВ могут порождаться при внешних воздействиях со стороны турбулентной плазмы магнитослоя путем выделения из хаотических колебаний тех, частоты которых совпадают с собственными частотами, или при импульсном широкополосном воздействии на магнитопаузу при прохождении межпланетной ударной волны.

Однако для большинства приложений космической физики модель «плазменного ящика» слишком упрощена. В реалистичных плазменных системах может не быть отражающих границ или регулярного магнитного поля на одной стороне границы (например, магнитослоя). Возможность появления ПВ на границе, отделяющей плазменную систему от турбулентной среды (например, дневной магнитопаузы), никогда не рассматривалась в теории МГД, так что само существование ПВ в ограниченной плазменной системе, окруженной высокотурбулентной средой, до сих пор остается открытой задачей. Есть еще несколько неучтенных факторов, которые могут существенно изменить теоретические результаты: неплоская геометрия силовых линий магнитного поля, поскольку экваториальная часть силовых линий магнитного поля сносится потоком плазмы. Решение этих проблем в реалистичной трехмерной неоднородной системе не может быть выполнено аналитически и по-прежнему является нерешенной проблемой.

В реалистичной неоднородной магнитосфере глобальные ПВ с дискретным спектром неизбежно должны быть связаны с альфвеновским континуумом. Зацепление мод наиболее эффективно в резонансной области, где локальный альфвеновский период соответствует периодичности, присущей спектру глобальных мод. В результате отклик на внешнее воздействие имеет сложную картину. Наблюдательный критерий отделения ПВ от резонансных колебаний силовых линий до сих пор не разработан.

Теоретической базой исследования ПВ служат хорошо известные дисперсионные соотношения для МГД-волны в прямом магнитном поле в плазме со скачком параметров (альвеновской и звуковой скоростей). Скоростью внешнего потока при этом пренебрегается. В холодной несжимаемой плазме это соотношение имеет вид

$$\omega_{SW}^2 = \frac{2k_\parallel^2 B_0^2}{\mu_0(\rho_1+\rho_2)} \quad (1)$$

Из этого соотношения следует, что ПВ распространяется только вдоль поля. При наличии отражающих границ (ионосфер) продольное волновое число квантуется. Как эти дисперсионные соотношения изменятся при наличии кривизны силовых линий? В работах [Lyatsky & Sibeck, 1997] учет кривизны проводился с помощью дополнительного члена $|k_y| V_s^2 / R$ (имитация центробежной силы), вставленного в дисперсионное соотношение. Дисперсионное уравнение, полученное таким эвристическим образом включало два физических вклада: от колебаний альвеновского типа $\omega^2 = k_\parallel^2 V_A^2$и от поверхностной моды в поле тяжести (уравнение глубокой воды) $\omega^2 = k_\perp g$, $g \simeq -V_A^2 / R$, где роль силы тяжести играет центробежная сила. Результирующее дисперсионное соотношение выглядело таким образом

$$\omega^2 = k_\perp g + k_\parallel^2 V_A^2 \quad (2)$$

Волновое возмущение, описываемое таким дисперсионным соотношением, имело поперечную дисперсию и азимутальную скорость распространения. Но строго решения задачи не давалось. Поэтому мы ставим себе задачу строго рассмотреть модель поля с постоянной кривизной. В принципе наиболее адекватная модель для околоземного поля – диполь. Но в этой геометрии, так же как в параболоидной, кривизна переменная вдоль силовой линии, что приводит к появления метрических коэффициентов и прочих ненужных сложностей. Поэтому будем работать в цилиндрической системе. Тогда у нас кривизна постоянная вдоль поля, неоднородность только по радиусу $R$, и при каком-то $R_0$происходит скачок параметров, на котором может возникать ПВ. Нам надо будет выяснить, что меняет наличие кривизны. На границах (ионосферах) принимается нулевое граничное условие. Задача в том, чтобы получить дисперсионное соотношение с учетом членов с кривизной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere. Planetary and Space Science, 1974, Volume 22, Issue 3, p. 483-491.

Lyatsky, W.B.; Sibeck, D.G. Surface waves on the low-latitude boundary layer inner edge and travelling convection vortices. Journal of Geophysical Research, 1997, Volume 102, Issue A8, p. 17643-17648.