

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ С МАГНИТОСФЕРНЫМИ РЕЗОНАНСАМИ

С. П. Савин^{a*}, *В. В. Ляхов*^b, *В. М. Нецадим*^b, *Л. М. Зеленый*^a,
З. Немечек^{c**}, *Я. Шафранкова*^{c***}, *Ч. Ванг*^{d****}, *С. И. Климов*^a, *С. А. Скальский*^a,
М. О. Рязанцева^a, *Л. С. Рахманова*^a, *Я. Блецки*^{e†}, *Л. А. Лежен*^a

^a *Институт космических исследований Российской академии наук
117997, Москва, Россия*

^b *DTO Institute of Ionosphere, 050020 Almaty, Kazakhstan*

^c *Charles University, 1636, Prague, Czech Republic*

^d *National Space Science Center, NAS, Beijing, China*

^e *Space Research Center, 57622, Warsaw, Poland*

Поступила в редакцию 26 августа 2021 г.,
 после переработки 9 ноября 2021 г.
 Принята к публикации 16 ноября 2021 г.

От ударной волны до внешней магнитосферы регистрируются резонансные моды с частотами 0.02–10 мГц, причем природа резонансов на частотах 0.02–0.25 мГц до сих пор не объяснена. Нами предложена модель ударной волны в виде круглой пластины, свободой по внешнему контуру, которая предсказывает резонансные моды на частотах 0.02–0.3 мГц и ниже. Мы демонстрируем регистрацию этих модельных резонансных мод по данным пяти спутников, причем предсказанный моделью резонанс около 0.1 мГц наблюдается в магнитослое непрерывно 17 часов как за параллельной, так и за перпендикулярной ударными волнами. Резонансные моды ударной волны вызывают трехволновые нелинейные каскады, осуществляющие широкополосную когерентную связь с резонансами как у магнитопаузы, так и внутри нее. Именно когерентный характер процессов в протяженной области с разными собственными линейными резонансными модами обуславливает, по нашему мнению, достаточно новый — нелинейно-каскадный — подход к эффективному преобразованию энергии набегающего потока при взаимодействии с препятствием. Это представляется существенным для всей нелинейной физики. Мы приводим также аргументы, указывающие на возможность за счет энергии солнечного ветра автогенерации резонансных мод в замкнутом контуре ударная волна/магнитопауза с обратной связью в виде узких импульсов вектора Пойнтинга.

DOI: 10.31857/S0044451022030087

1. ВВЕДЕНИЕ

Мы предлагаем модель генерации собственных резонансных мод ударной волны (УВ) в виде круглой пластины, свободой по внешнему контуру [1–3], и обобщаем цикл работ по изучению нелинейных

взаимодействий резонансов у внешних границ магнитосферы [4–6].

Ранее было показано, что на возмущенной солнечным ветром (СВ) УВ генерируются плазменные струи с динамическим давлением в магнитослое за УВ выше, чем в невозмущенном СВ [4]. Их можно рассматривать как нелинейные магнитогидродинамические волны в потоке СВ, термализованного на УВ. Они сталкиваются с магнитопаузой (МП), деформируют ее вблизи подсолнечной точки или даже пробивают ее на периферии. Деформированная магнитопауза, в свою очередь, возбуждает в магнитосфере альвеновские волны, которые вдоль магнит-

* E-mail: ssavin@iki.rssi.ru

** Z. Nemecek

*** J. Safrankova

**** C. Wang

† J. Blecki

ных силовых линий доходят до ионосферы и регистрируются в виде геомагнитных пульсаций [5].

Появление струй промодулировано резонансными модами УВ и МП, деформирующими УВ. Природу и регистрацию собственных мод УВ мы и изучаем в этой статье. Обратная связь МП с УВ осуществляется слабыми короткими импульсами вектора Пойнтинга. Наиболее вероятно, это нелинейные быстрые магнитозвуковые волны, вызывающие трехволновое взаимодействие с набегающим потоком плазмы с бикогерентностью до 90 % [5]. Эти импульсы, в свою очередь, промодулированы резонансными модами, генерирующимися у МП за счет ее мембранной неустойчивости на частоте 0.25–10 мГц [6]. Но многочисленные данные показывают, что регистрируются резонансные моды на более низких частотах вплоть до 0.02 мГц. Предполагая, что это происходит за счет генерации собственных мод УВ, мы предлагаем следующую простую модель.

2. МОДЕЛЬ

Головная УВ в подсолнечной области моделируется круглой магнитогидродинамической пластиной, свободной по внешнему контуру. Пластиной называется плоский однородный слой, если его толщина много меньше радиуса. Исследование колебательных свойств механических пластин имеет давнюю историю в физике сплошных сред. Так, частотное уравнение круглой механической пластины, свободной по внешнему контуру, приведено в отечественных справочниках [1, 2] и в спонсированной Национальным управлением по аэронавтике и космосу США монографии [3]. Это уравнение имеет вид

$$\frac{\beta^2 R^2 J_n(\beta R) + (1 - \nu)[\beta R J'_n(\beta R) - n^2 J_n(\beta R)]}{\beta^2 R^2 I_n(\beta R) - (1 - \nu)[\beta R I'_n(\beta R) - n^2 I_n(\beta R)]} = \frac{\beta^3 R^3 J'_n(\beta R) + (1 - \nu)n^2[\beta R J'_n(\beta R) - J_n(\beta R)]}{\beta^3 R^3 I'_n(\beta R) - (1 - \nu)n^2[\beta R I'_n(\beta R) - I_n(\beta R)]}. \quad (1)$$

Здесь J_n и I_n — обычная и модифицированная функции Бесселя первого рода. $\beta = (\rho h \omega^2 / D)^{1/2}$, R — радиус пластины, ρ — плотность пластины, h — толщина пластины, ω — частота колебаний, цилиндрическая жесткость

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (2)$$

E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона. Модуль Юнга E связан с модулем объемной упругости K следующим образом: $E = 3K(1 - 2\nu)$.

Сложная структура УВ не позволяет прямо применить технику уравнения Власова. Поэтому для исследования собственных колебаний фронта УВ в качестве начального приближения используем известные результаты по изучению колебаний механических пластин. Подобная процедура осуществлена нами ранее при исследовании собственных колебаний магнитопаузы, где был использован аналог механической мембраны [6]. Верификацией использованного метода в этом случае явилось практическое совпадение собственных модельных частот МП с рядом «магических частот», давно наблюдаемых и в спутниковых, и в наземных данных. Подтверждением универсальности частотного уравнения (1) является, например, его успешное применение в аэродинамике [3].

На данном этапе мы предполагаем, что наша модель может описывать часть существенных свойств УВ, и определим, какая это часть, из сравнения с экспериментом. Поскольку пластина закреплена в центре, а края ее свободно движутся, находясь под действием изгибающих моментов центральной области, мы полагаем, что именно свойства центральной области определяют основные черты колебаний пластины и резонансы. А центральная область магнитопаузы хорошо приближается плоской пластиной.

В нашей задаче необходимо перейти от механистического описания к магнитогидродинамическому применительно к головной ударной волне, образованной перед магнитосферой при ее обтекании плазмой солнечного ветра. По определению, коэффициент Пуассона равен отношению относительного сжатия образца к его относительному удлинению:

$$\nu = -\frac{\Delta d / d}{\Delta l / l}.$$

Для случая магнитогидродинамики выделенный объем плазмы при растяжении не сопровождается его сжатием, т. е. $\Delta d = 0$, поэтому $\nu = 0$. Известно, что модуль объемной упругости K для идеального газа равен $K_T = P$ для изотермического процесса (здесь P — давление). Плотность среды на фронте ударной волны $\rho = N(m_i + m_e)$, а давление

$$P = \frac{\epsilon_0 E_e^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{N(m_i v_i^2 + m_e v_e^2)}{2} = \frac{\epsilon_0 E_e^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} + N(\Theta_i + \Theta_e). \quad (3)$$

Рассматриваемый процесс собственных колебаний фронта ударной волны можно считать изотермическим. Полученная система уравнений (1)–(3) решена

Таблица. ($f = \omega/2\pi$)

| | f , мГц |
|--------------|------------------------------|
| $R = 3 R_E$ | 1) 0.00242, $h = 0.01 R_E$ |
| | 2) 0.0262 |
| | 1) 0.0242, $h = 0.1 R_E$ |
| | 2) 0.262 |
| $R = 5 R_E$ | 1) 0.000869, $h = 0.01 R_E$ |
| | 2) 0.00944 |
| | 1) 0.00869, $h = 0.1 R_E$ |
| | 2) 0.0944 |
| $R = 10 R_E$ | 1) 0.000216, $h = 0.01 R_E$ |
| | 2) 0.00235 |
| | 1) 0.00216, $h = 0.1 R_E$ |
| | 2) 0.0235 |
| $R = 20 R_E$ | 1) 0.0000544, $h = 0.01 R_E$ |
| | 2) 0.000592 |
| | 1) 0.000544, $h = 0.1 R_E$ |
| | 2) 0.00592 |

численно в пакете MAPLE при следующих параметрах, соответствующих головной ударной волне:

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}, & \mu_0 &= 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м}, \\ E_e &= 0.005 \text{ В/м}, & B &= 2.5 \cdot 10^{-8} \text{ Тл}, \\ \Theta_i &= 1.6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}, & \Theta_e &= 1.6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}, \\ m_i &= 1836 \cdot 10^{-31} \text{ кг}, & m_e &= 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}, \\ N &= 16 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}, & \nu &= 0, \end{aligned}$$

R_E — радиус Земли, равный $6.374 \cdot 10^6$ м.

Ниже, в таблице приведены результаты решения частотного уравнения (1) в среде пакета MAPLE для функций Бесселя нулевого порядка и радиусов фронта головной ударной волны $R = 3, 5, 10$ и $20R_E$. Толщины $h = 0.1$ и $0.01R_E$ выбраны из статистического исследования толщин УВ [7]. (Межпланетные УВ имеют схожие параметры с околосолнечной.) Следует отметить, что под радиусом в случае УВ мы понимаем расстояние вдоль УВ от ее центра (подсолнечной точки) до границы резонансной области (зависящей от положения спутника в магнитослое), что позволяет качественно применять нашу модель и для изогнутой УВ аналогично МП [6]. Отметим линейную зависимость частот резонансов от толщины h в таблице при фиксированном R , а также падение частот резонансов с увеличением R . Из таблицы

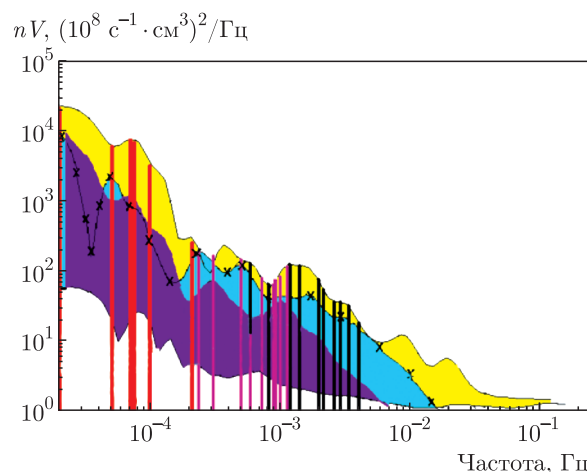


Рис. 1. Вэйвлетные спектры мощности потока плазмы nV по данным разных спутников: WIND, 20.03.2012, 13-18 UT (нижняя область без заливки); SPECTR-R, 13-21 UT (крестики, голубая заливка); CLUSTER-4, 20.03.2012, 13-18 UT (желтая заливка); GEOTAIL, 05-24 UT (фиолетовая заливка). Красные линии — гармоники из таблицы, фиолетовые — МП с $R = 25R_E$, черные — МП с $R = 10R_E$

следует, что для функций Бесселя нулевого порядка имеются две собственные частоты. Мнимая часть решений равна нулю, что физически означает практическое отсутствие затухания или раскачки колебаний.

Мы можем сопоставлять с экспериментом только частоты свыше 0.01 мГц, поскольку спутники не находятся в физически однородных областях достаточное время, чтобы измерять более низкие частоты.

Для верификации модели мы сделали оценку характерной частоты для $R = 3R_E$ (поскольку здесь с достаточной точностью применима модель именно плоской пластины), разделив характерную скорость на диаметр пластины (максимальное расстояние на пластине, проходимое резонансной волной). Характерную скорость вдоль пластины мы оценили как среднюю проекцию скорости СВ на УВ. Результат по частоте составляет 0.25 мГц, что неплохо согласуется с максимальной частотой в таблице.

3. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

На рис. 1 мы представляем данные измерений потока плазмы nV (произведение плотности ионов на скорость), т.е. доминирующий импульс в солнечном ветре/магнитослое (СВ/МСЛ) на спутниках SPECTR-R, GEOTAIL, CLUSTER-4 и WIND (XGSE от +14 до -17 R_E) [6]. Кроме спутника WIND, на

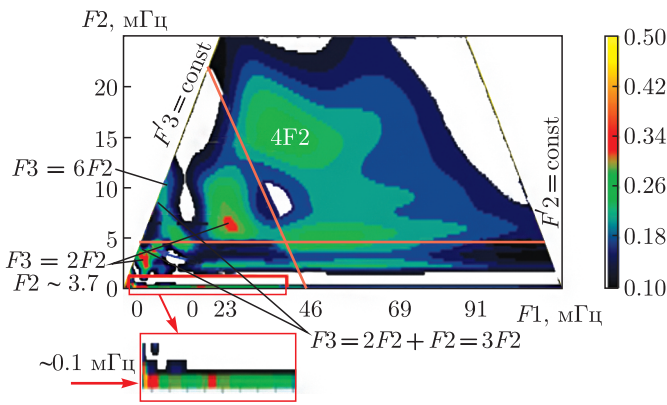


Рис. 2. Биспектрограмма nV со спутника SPECTR-R, 20.03.2012

ходящегося в СВ, все спутники, как правило, находились под ударной волной в магнитослое. Расстояние между ними в десятки радиусов Земли не позволяет определить экспериментально длины резонансных волн, которые оцениваются в несколько радиусов [4, 5]. Красными вертикальными линиями показаны гармоники УВ-резонансов, согласно таблице, черными и фиолетовыми — резонансы МП [6]. Низкочастотные МП-резонансы ($R = 25R_E$) пересекаются с резонансами УВ примерно на частоте 0.25 мГц. Экспериментальные максимумы видны вблизи УВ-резонансов на частотах 0.262, 0.0944 и 0.024 мГц (таблица). Поскольку рассматриваемые частоты много меньше протонной гирочастоты, мы считаем все волны магнитогиродинамическими. Первые две частоты относятся к максимальной толщине h . С учетом линейной зависимости частот резонансов от толщины h , за счет меньшей толщины (вплоть до 10 раз) можно объяснить более низкочастотные максимумы. Несколько более высокочастотные максимумы могут соответствовать меньшему R . Это представляется вполне удовлетворительным подтверждением применимости нашей модели УВ-резонансов.

На рис. 2 представлен биспектр nV со спутника SPECTR-R. Напомним, он выделяет когерентные процессы с частотами $F1 + F2 = F3$. На рис. 2: $F1$ — по горизонтали, $F2$ — по вертикали, $F3$ — подразумевается. Горизонтальная оранжевая линия соответствует $F'2 = \text{const}$ (накачка, «'» означает произвольные частоты), наклонная — $F'3 = \text{const}$ (распад). На рис. 2 таких каскадов можно идентифицировать по три каждого типа. Левая граница биспектрограммы соответствует $F3 = 2F2$ — генерации двукратных нелинейных гармоник. Мы назы-

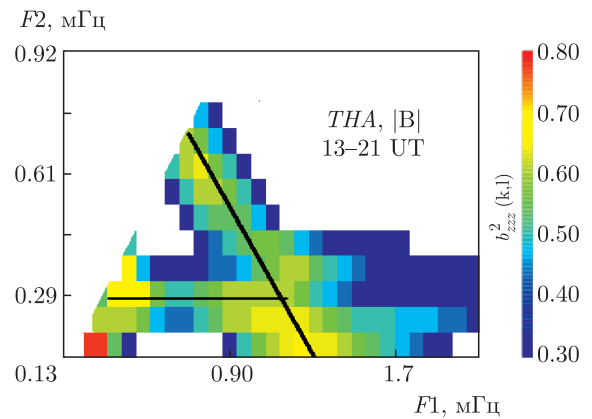


Рис. 3. Биспектрограмма со спутника THEMIS-A

ваем нелинейным трехволновым каскадом процесс (например, $F2 = \text{const}$, накачка), в котором волны на суммарной частоте снова и снова взаимодействуют с исходной $F2$: $F3 + F2 = F4$; $F4 + F2 = F5$ и т. д.

Внизу рис. 2 виден именно такой каскад (см. расширение в красной рамке). Его частота 0.1 мГц позволяет считать, что это резонанс УВ (см. таблицу, на МП частоты выше, рис. 1). Но возбуждаются также нелинейные гармоники ($2F2, 3F2, 4F2, 6F2$, см. стрелки на рис. 2), которые, свою очередь, могут возбуждать нелинейные каскады, неотличимые (по одной только величине частоты) от МП-каскадов. Подобные каскады могут возникать и вдоль оранжевой наклонной линии $F'3 = \text{const}$ (распад), но наблюдаются и прерывистые «распады», наряду с некаскадными трехволновыми взаимодействиями (см., например, рис. 2 в [6]).

На рис. 3 (опубликован ранее в нашей работе [6]) дана вэйвлетная биспектрограмма модуля магнитного поля $|B|$ со спутника THEMIS-A, который был в нескольких радиусах под дневной МП [6]. Она демонстрирует проникновение УВ-резонансов внутрь магнитосферы. Ширина резонансов обусловлена большим средним уровнем флуктуаций (свыше 30%): вместе со средними параметрами флуктуируют также резонансные частоты и масштабы. Внизу полоса анализа включает УВ-резонанс вблизи частоты 0.1 мГц, причем амплитуда максимальна на спектрограмме. Горизонтальная полоса 0.24–0.3 мГц (отмеченная горизонтальной черной прямой, накачка) включает УВ-резонанс на частоте 0.262 мГц (таблица). Этот горизонтальный каскад начинается максимумом $F2$ 70% (слева). Он соответствует едва заметному пику на рис. 1. Его вторая (нелинейная) гармоника близка к начальной частоте $F2$

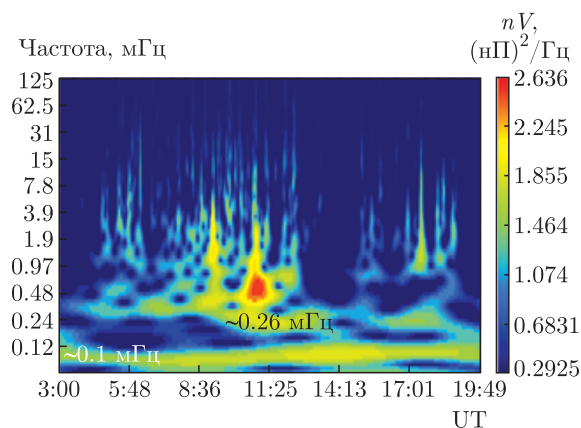


Рис. 4. Спектрограмма динамического давления со спутника DOUBLE STAR, 27.03.2005 в дневном магнитослое

наклонного каскада. Вклад МП-резонанса в накачку не исключен, но доминирование МП-резонанса с эффективным МП-радиусом в $25R_E$ мы считаем маловероятным. Таким образом, мы демонстрируем, что УВ-резонансы проникают прямо под МП, например, за счет ударов плазменных струй по МП [4, 6, 8]. Сигнал около 0.1–0.13 мГц (минимальный диапазон анализа на рис. 3) связан с горизонтальным максимумом, отмеченным черной прямой, генерацией второй (нелинейной) гармоники. Вместе они обеспечивают когерентную связь УВ-резонанса (0.1 мГц) с более высокочастотными резонансами у МП и непосредственно с внутримангнитосферными (см. ниже разд. 4 и [6, 9]), частота которых может превышать на порядок частоту исходного УВ-резонанса.

На вопрос, насколько длительными и стабильными могут быть УВ-резонансы, отвечает рис. 4. На нем дана вэйвлетная спектрограмма динамического давления (нормированного на давление в солнечном ветре) со спутника DOUBLE STAR, показывающая резонансный максимум вблизи частоты 0.1 мГц одной из гармоник из таблицы. УВ-резонанс виден в течение почти 17 часов (пока спутник находился в зоне магнитослоя ударной волны)! Небольшие вариации частоты мы приписываем как изменению внешних условий (меняющихся размеры и положение УВ), так и смещению спутника относительно УВ и МП. Вблизи другого резонанса около частоты 0.262 мГц виден горизонтальный максимум в середине рис. 4 (таблица).

В [4] отмечено, что утечка кислорода O^+ высокой энергии из магнитосферы в форшоке (солнечный ветер перед ударной волной, соединенный с ударной волной магнитным полем) коррелирует с

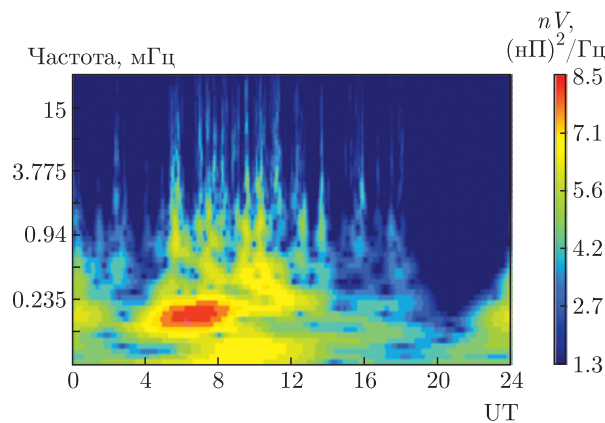


Рис. 5. Вэйвлетная кроссспектрограмма между потоком O^+ из ионосферы и динамическим давлением в форшоке (спутник CLUSTER-4, 27.03.2005). Нижний максимум на частоте около 0.1 мГц соответствует данным таблицы

динамическим давлением на CLUSTER-4. Рисунок 5 иллюстрирует роль резонансов УВ в этом процессе.

Вэйвлетная кроссспектрограмма между потоком O^+ и динамическим давлением демонстрирует два горизонтально протяженных максимума. Нижний (около 0.1 мГц), соответствующий данным таблицы, это УВ-резонанс. Наиболее яркий максимум (около 0.262 мГц) может быть как чисто за счет УВ-резонанса, так и мог возникнуть первоначально у МП с последующим возбуждением резонанса на УВ.

4. ДИСКУССИЯ

Представляется, что в настоящей работе нам удалось найти последний элемент общей картины обтекания СВ магнитосферы — сложнейшей и существенно нелинейной — и это когерентные резонансные моды, возникающие на УВ. Как мы показали раньше [4–6, 8], эти МСЛ-процессы дают «сильное эхо» во внутренней магнитосфере, ионосфере и даже в сверхзвуковом потоке СВ-форшоке. Во всех этих явлениях основополагающую роль играют трехволновые процессы. Мы подробно описываем эти процессы на примере рис. 2, 3 (см. разд. 3 и [5, 6]). Их наличие говорит о том, что амплитуды первоначально линейных резонансов, предсказываемых моделью, нарастают до нелинейных уровней, и уже трехволновые дискретные каскады и нелинейные гармоники определяют сложную взаимообусловленную картину взаимодействия резонансных УВ-мод с резонансами во внутренней и внешней магнитосфере (см. рис. 2, 3, ср. с линейным подходом внутри магнитосферы, например в [9]).

Используя упрощенную модель ударной волны в виде круглой пластины, свободной по внешнему контуру, нам удалось подтвердить гипотезу, что в такой конфигурации резонансы могут возникать на УВ на более низких частотах, чем на МП [4, 5, 8]. В работе [5] рассматривается единый синхронизованный процесс резонансов для ударной волны, магнитопаузы и магнитослоя. В работах [6, 8] показано, как синфазные резонансы распространяются до поверхности Земли за счет альвеновского резонанса магнитных силовых линий [9] и его трехволнового взаимодействия со сжимаемыми мембранными модами у МП [6]. Они являются источником наземных резонансов (так называемых «магических частот» [6]).

Если УВ-резонансы возбуждаются сразу на УВ за счет возмущений в СВ или форшоке, то модулированные плазменные струи (или более слабые флуктуации доминирующего динамического давления) прямо доходят до МП и ее деформируют [4, 8]. Горизонтальные каскады накачки (рис. 2, 3) связывают УВ-резонансы (в том числе их фазы) с более высокочастотными МП-резонансами, а также непосредственно с альвеновскими резонансами силовых линий (рис. 3) через трехволновые же взаимодействия [6]. Широкополосную когерентную связь резонансов в разных областях осуществляют именно нелинейные дискретные каскады и нелинейные гармоники, что существенно отличается от предыдущих подходов, учитывающих только линейные взаимодействия [9]. Многоспутниковая многопараметрическая демонстрация совместимости предсказаний модели УВ с экспериментальными данными, является одним из основных результатов нашей работы. Это подтверждает возможность применения нашей модели к описанию существенных свойств ударных волн.

По результатам корреляции данных с восьми спутников и 13 наземных станций 27.03.2005 [8] в 48 % случаев резонансы возбуждаются сначала у МП, а потом распространяются и к Земле, и к УВ [5, 6, 8]. МП-резонансы возбуждают синфазные УВ-резонансы, которые, деформируя УВ, создают синфазно же модулированные струи (или более слабые флуктуации динамического давления). Струи деформируют МП и вновь возбуждают МП-резонансы. Так, глобальная резонансная петля («петля») УВ-МП замыкается. Он может возникать и на УВ (в 52 % [8]). Потом трехволновые каскады «накачки» возбуждают более высокочастотные МП-резонансы, и дальше все идет опять по кругу, как и в случае первичного возбуждения резонансов у МП. При этом в петле УВ-МП с обратной связью в

де узких импульсов вектора Пойнтинга, идущих к УВ [5], возможен и режим автогенерации резонансов в громадной распределенной системе УВ-МП за счет энергии вновь и вновь набегающего потока СВ, разбиваемого на струи (флуктуации динамического давления) резонансно деформируемой УВ. О возможности автогенерации говорит необычайно высокая бикогерентность (70–90 % и более [5, 8]) между слабыми импульсами, идущими от МП к УВ и несущими основную энергию динамическим давлением разрушаемого потока СВ. Причем импульсы выступают в качестве накачки обратной связи МП с УВ (см. рис. 3 в [5], ср. со слабой накачкой в лазере, синхронизирующей генерацию мощного радиоизлучения). В диапазоне частот исследуемых резонансов (УВ-МП-силовые линии) бикогерентность на рис. 2, 3 составляет 30–80 % и часто превышает 50 %. Стационарность одного из УВ-резонансов хорошо видна на рис. 4 на частоте около 0.1 МГц в течение 17 часов, которые спутник DOUBLE STAR находился в магнитосфере).

Полагаем, что когерентное действие распределенной системы с разными собственными линейными резонансами и многочисленными источниками их энергии должно существенно превосходить воздействие локализованных резонансов со случайной фазой.

Каким образом более высокочастотные МП-резонансы возбуждают низкочастотные когерентные УВ-резонансы? Лучше всего это иллюстрирует рис. 3. Допустим, черная горизонтальная прямая выделяет МП-резонансный каскад (что не исключено, рис. 1, [6]). Тогда на пересечении ее с наклонной черной прямой происходит распад вдоль этой наклонной линии, где суммарная $F_3 = \text{const} = 0.7 \text{ МГц} = F_2 + F_1$. При этом формируется наклонный «распадный» каскад, который начинается сверху на второй (нелинейной) гармонике горизонтального каскада. Этот распадный каскад внизу доходит до горизонтального резонанса накачки вблизи частоты 0.1 МГц (т. е. здесь происходит распад $F_3 = 0.7 = 0.1 + 0.6 \text{ МГц}$). Частоты 0.1 МГц близки к УВ-резонансным частотам из таблицы. В общем случае распад с сохранением F_3 может происходить в любых дискретных точках (F_1, F_2). При этом, если частота F_2 совпадет с более низкочастотным резонансом, то этот низкочастотный резонанс может нарастать, сохраняя фазу.

5. ВЫВОДЫ

Итак, мы предложили простую модель ударной волны и продемонстрировали регистрацию ее высо-

кочастотных резонансов 0.02–0.3 мГц по данным пяти спутников. Эти данные согласуются с нашей моделью: спектральные и биспектральные максимумы в потоке и динамическом давлении плазмы, в магнитном поле, а также кросскорреляции динамического давления и потока O+ наблюдаются вблизи предсказанных моделью резонансных частот. Как уже упоминалось, особенно представительен в этом плане рис. 4: такой узкий и длительный резонанс в энергонесущем динамическом давлении наблюдается на предсказываемой моделью УВ-гармонике, а его регистрация в течение всего нахождения спутника DOUBLE STAR в МСЛ/СВ может свидетельствовать о практически постоянном существовании замкнутого контура (петли) взаимного возбуждения резонансов на УВ и МП (и, возможно, автогенерации). Это мы считаем одним из важных результатов нашей работы.

Отметим также значительное влияние именно УВ-резонансов на истечение O+ из магнитосферы в форшок (которое мы демонстрируем на рис. 5).

Мы выделяем также возможность непосредственного проникновения УВ-резонансов под МП (рис. 3) без участия МП-резонансов.

Повторяем, что выявленное нами соответствие модели эксперименту постфактум подтверждает возможность использование нашей модели для описания части существенных свойств УВ-резонансов (ср. [6]).

Продемонстрированные доминирующие нелинейные процессы каскадного взаимодействия резо-

нансных мод (а также генерации нелинейных гармоник) в трех областях внешней магнитосферы могут представлять вполне определенный интерес для всей нелинейной физики.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Гонткевич, *Собственные колебания пластинок и оболочек*, Наукова думка, Киев (1964).
2. *Вибрации в технике*. Справочник в 6 томах, ред. В. Н. Челомей, Т. 1, *Колебания линейных систем*, Машиностроение, Москва (1978).
3. A. W. Leissa, *Vibration of Plates*, NASA (1969).
4. S. Savin, E. Amata, V. Budaev, L. Zelenyi et al., Письма в ЖЭТФ **99**, 19 (2014).
5. S. Savin, E. Amata, L. Zelenyi et al., JETP Lett. **101**, 323 (2019). DOI: 10.1134/S0021364019170028.
6. С. П. Савин, В. В. Ляхов, В. М. Нецадим и др., ЖЭТФ **159**, 339 (2021).
7. Z. Nemecek, J. Safrankova, O. Goncharov, L. Prech, and G. N. Zastenker, Geophys. Res. Lett. **40**, 4133 (2013). DOI: 10.1002/grl.50814.
8. S. Savin, E. Amata, L. Legen et al., Submitted to Nature Communications (2021).
9. А. С. Леонович, В. А. Мазур, *Линейная теория МГД-колебаний магнитосферы*, Физматлит, Москва (2016).