

УДК 523.4

В. П. Васильев, В. М. Литвинов

Возбуждение инфразвука при радиационно-механическом синхронизме.

II. Условия реализации затменного варианта в атмосфере Юпитера

Приводятся результаты расчетов условий реализации околосвукового движения теней Ганимеда и Каллисто относительно надоблачной атмосферы Юпитера (режим спидрезонанса). Выполнению достаточных условий усиления инфразвука при этом препятствует термическая инерционность газовой среды, уменьшающаяся в стратосфере. Обоснован поиск притеневых аномалий атмосферных параметров при попадании теней этих спутников в спидрезонансные зоны.

INFRA SOUND GENERATION UNDER RADIATIVE-MECHANICAL SYNCHRONISM. II. CONDITIONS FOR THE REALIZATION OF ECLIPSE IN THE JUPITER ATMOSPHERE, by Vasil'ev V. P., Litvinov V. M.— Conditions for realization of the sound-like motion of Ganimed and Callisto shadows relative to the above-cloud region of the Jupiter atmosphere (the speed-resonance regime) are calculated and presented. In this case the thermal lag of gaseous medium decreasing in the stratosphere should prevent satisfying the conditions for the infrasound amplification. The search for shadow-side anomalies of the atmospheric parameters caused by passing these shadows through the speed-resonance zones is substantiated.

Как предсказывалось ранее [3, 4], движущиеся относительно атмосферы планеты области неоднородного инсоляционного нагрева на солнечном T -терминаторе приводят, в частности, к возбуждению в газовой среде термоупругих (инфразвуковых) колебаний, амплитуда которых может испытывать локальное усиление в случае резонанса по скорости (спидрезонанса) при синхронном с движением источника распространении волнового пакета.

Режим спидрезонанса $v_T = v_s$ (v_T — скорость движения источника — термической неоднородности относительно атмосферы; v_s — скорость звука) реализуется в умеренных широтах тропосферы Земли [4] и низких широтах тропосферы Марса [3].

Безотносительно к этому режиму определяющая роль солнечного терминатора в возбуждении колебаний параметров земной атмосферы с характерными периодами порядка нескольких минут в последнее время доказана экспериментально [1].

Помимо T -терминатора аналогичным тепловым источником атмосферных возмущений служит тень от спутника планеты в периоды солнечных затмений. Движение тени Луны в плотных слоях земной атмосферы является сверхзвуковым при любой реальной ориентации полосы полной фазы затмения. Спидрезонанс в данной ситуации возможен лишь в термосфере.

Проблема генерации затменного инфразвука остается пока практически неисследованной, однако притеневые атмосферные колебания в диапазоне частот, характерных для внутренних гравитационных волн, неоднократно регистрировались как в приземном слое [13], так и на уровне ионосферы [14]. В то же время в системах Юпитера и Сатурна скорости движения теней ряда среднеудаленных спутников периодически совпадают со звуковой в надоблачных слоях атмосфер планет. В принципе эти обстоятельства позволяют ожидать наблюдаемых проявлений радиационно-механического синхронизма (РМС) [3] также и для данных динамических систем источник излучения — экран — поглощающая среда, в которых роль экрана играет затмевающий спутник [2].

Настоящая работа посвящена качественному анализу условий возбуждения инфразвука в затменном варианте РМС для системы Солнце — спутник — атмосфера Юпитера.

Известно, что скорость движения тени спутника относительно планетной поверхности или атмосферы определяется векторной суммой линейной скорости вращения *

* В рассматриваемом случае ввиду большой величины орбитального периода Юпитера достаточно учесть лишь его осевое вращение.

планеты и планетоцентрической скорости орбитального движения спутника. Поскольку непосредственная инсоляция практически не проникает в подоблачные слои атмосферы Юпитера, необходимо выбрать максимальную глубину возможной реализации эффекта РМС.

Строго говоря, в условии $v_T = v_s$ заложен сугубо локальный смысл. В пределах тропосферно-стратосферного участка теневого конуса при затмении в планетной атмосфере линия, на которой это условие выполняется, будет в первом приближении иметь вид дуги, обращенной выпуклостью к полюсу и лежащей в плоскости меридиана. Поэтому каждое конкретное значение широты РМС φ_c [3] необходимо соотносить с некоторой фиксированной высотой (уровнем давления), а под зоной РМС подразумевать интервал $\Delta\varphi$, в котором десинхронизм $\omega = |v_T - v_s|$ не превышает заданной в модели величины.

Принципиальным является также следующее положение. Практически независимо от состояния газовой среды генерации для оптико-акустического механизма возбуждения звуковых волн тепловыми источниками (как «импульсными», так и «непрерывно-сканирующими» [4, 6]) абсолютная амплитуда колебаний давления $P \propto B \partial Q / \partial t$, где $B = \alpha P_0 / (\rho_0 c)$ — безразмерный коэффициент генерации; Q — количество тепла, поглощенного единицей объема среды в единицу времени; остальные обозначения — как и в [3]. В свою очередь, поскольку $\partial Q / \partial t = \rho_0 c \partial T / \partial t$, то с уменьшением P_0 (например, по барометрическому закону в атмосфере планеты) величина P может не убывать с высотой лишь в случае пропорционального увеличения скорости восходно-заходного или затменного изменения температуры $\partial T / \partial t$. Например, для земной термосферы это увеличение должно составлять 7—8 порядков.

Имеющиеся данные приводят к величине $\partial T / \partial t \leq 40$ К/ч [9], что лишь на порядок превышает тропосферные значения на T -терминаторе. Поэтому в большинстве реальных случаев на планетах с разреженной атмосферой плотность энергии акустических колебаний данной природы максимальна именно в тропосферном слое. В то же время движение сквозь плотную атмосферу конуса тени (которая, несмотря на наличие полутени, имеет на Юпитере более резкие границы по сравнению с терминатором) создает относительно благоприятные условия для проявления разницы в термическом отклике атмосферных слоев.

Напротив, относительная величина P/P_0 в обсуждаемых условиях с учетом выхода волн снизу может существенно возрастать с высотой, при этом увеличивается вероятность обнаружения эффекта. Поэтому дальнейший анализ будет относиться ко всему тропосферно-стратосферному слою атмосферы Юпитера, в нагреве которого инсоляция играет заметную роль и который находится в зоне лучистого равновесия, т. е. выше $4.7 \cdot 10^4$ Па [8].

Так как на Юпитере эффект полного солнечного затмения достигим лишь для галилеевых спутников, несложно показать, что ближайший из них — Ио — не удовлетворяет условиям РМС: скорость движения его тени в несколько раз превышает звуковую при любых взаимных ориентациях орбит и оси вращения планеты, а также любых высот в атмосфере. Для тени Европы строгое выполнение условий РМС возможно при расположении тени вблизи центра диска планеты. Наиболее благоприятна в обсуждаемом аспекте ситуация с Ганимедом и Каллисто. Из рис. 1 видно, что для теней этих спутников конфигурации тропосферно-стратосферных зон РМС представляют собой замкнутые полосы, близкие по форме к окружностям. Уменьшение широты РМС при отходе от полуденного меридиана (для данного слоя в атмосфере) связано, как легко понять, с увеличением тангенциальной проекции планетоцентрической скорости движения спутника при «скользящем» падении конуса его тени. В каждом полушарии Юпитера как для Ганимеда, так и для Каллисто существуют по две симметричных спидрезонансных широты. Попадая в промежутки между этими широтами, на некоторое время тень становится неподвижной относительно отмеченных выше атмосферных слоев. В высокоширотной зоне РМС она движется со скоростью v_s с запада на восток, в низкоширотной — в обратном направлении с той же скоростью. Отметим здесь еще одну особенность затменного варианта РМС, которая состоит в большей его широтной локальности по сравнению с терминаторным вариантом [3, 4] и является следствием более сильной зависимости v_T от φ .

Термодинамика солнечных затмений в атмосферах планет-гигантов также пока не изучена. Нестабильность и неоднородность облачного слоя Юпитера, а также значи-

тельные неопределенности в вертикальном распределении и оптических параметрах аэрозоля (особенно хромофоров) затрудняют даже корректную оценку соотношения тепловых потоков, приносимых инсоляцией и внутренним ИК-излучением на разных уровнях. В первом приближении можно считать, что поглощение УФ-крыла солнечного излучения происходит в нижней стратосфере, где осуществляются реакции фотолиза аммиака, метана и молекулярного водорода. Основная часть видимого и ближнего ИК-излучения поглощается еще ниже — в верхней тропосфере, где расположен слой

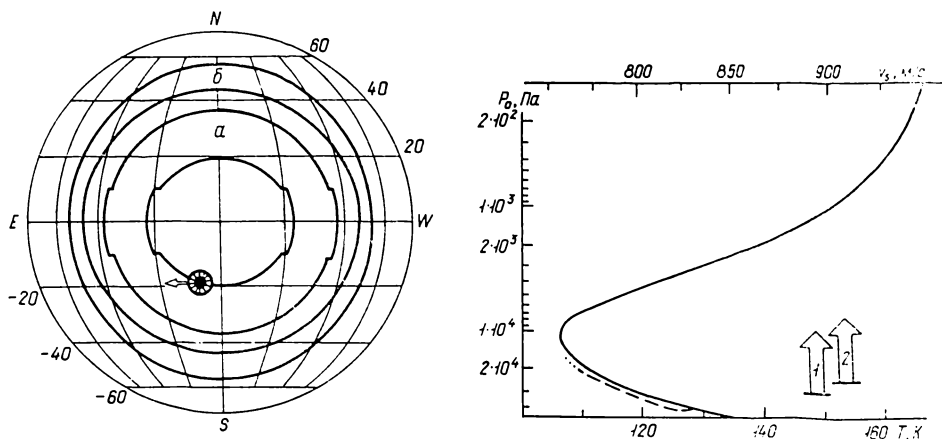


Рис. 1. Конфигурация и расположение «спидрезонансных линий», соответствующих выполнению условия $v_T = v_s$ для центров теней Ганимеда (а) и Каллисто (б), на видимом диске Юпитера (подсолнечная точка в центре). Излом на широте $\pm 10^\circ$ обусловлен разницей скоростей вращения в I и II системах. Двойным кружком (тень — полутень) показана зона затмения Ганимедом в момент регистрации эффекта «горячей тени» [15], стрелкой — мгновенное направление вектора скорости тени v_T относительно атмосферы

Рис. 2. Модель тепловой структуры атмосферы Юпитера в зоне возможной реализации РМС с затменным изменением температурного профиля (штриховая линия), необходимым для возникновения эффекта «горячих теней» за счет конденсации аммиака. Основания стрелок 1 и 2 — уровни формирования выходящего излучения соответственно в диапазонах 8—14 и 20—40 мкм

аэрозольной дымки из твердого NH_3 . Многократное рассеяние на ее частицах обеспечивает эффективное поглощение хромофорами и слабыми полосами CH_4 и NH_3 . Тепловое излучение от нагретых за счет внутреннего энерговыделения глубоких слоев, сосредоточенное в основном в диапазоне 20—40 мкм, поглощается индуцированными давлением слабыми полосами молекулярного водорода, образующими квазинепрерывный спектр. Значительная часть выходящего излучения в диапазоне 8—14 мкм поглощается в полосах газообразного аммиака. В целом можно также полагать, что, по крайней мере, в низких и средних широтах инсоляционный поток в 2—2.5 раза превышает внутренний [12], хотя в среднем по Юпитеру они одного порядка. Из этого следует, что прекращение инсоляции в принципе должно вести к некоторому охлаждению верхней тропосферы и нижней стратосферы в зоне φ_s . Однако, как следует из изложенного, определяющее значение для возбуждения инфразвука при РМС имеет термическая инерционность среды, т. е. скорость этого охлаждения. Иными словами, если необходимо условие существования РМС заключается в реализации режима спидрезонанса $v_T = v_s$, то достаточное условие можно в затменном варианте свести к выполнению такого соотношения:

$$d_T/v_s \gtrsim \tau_r > 1/\omega_0, \tag{1}$$

где d_T — диаметр тени (полутени) спутника; τ_r — время релаксации тепловых возмущений; ω_0 — характерная частота резонансно усиливаемых колебаний, которая может быть найдена путем анализа частотного спектра источника (по предварительным оценкам, $\omega_0 \gtrsim 10^{-2}$ Гц). В рассматриваемых слоях атмосферы Юпитера, термическая инерционность которых сравнительно велика [16], заметное притеневое остывание (нагрев) выглядит достаточно проблематичным. Действительно, прямые оценки показывают, что в чернотельном приближении, справедливом в районе максимума спектрального распре-

деления собственного излучения Юпитера [7], при прекращении инсоляции за время примерно d_T/v_s тропосферный слой толщиной около 40 км может остыть не более чем на 10^{-2} К (в рассматриваемых случаях d_T/v_s изменяется в пределах 30—170 мин). С другой стороны, известно, что экспериментальные значения термической инерционности земной тропосферы (в особенности в периоды полных затмений, когда отсутствует рассеянный свет) имеют порядок долей часа [10], в то время как аналогичные оценки приводят к продолжительностям радиационного остывания на 1 К, превышающим 10 ч. Поэтому не исключено, что реальные значения τ_r могут и в надоблачной атмосфере Юпитера удовлетворять достаточному условию РМС (1).

Поскольку на данном этапе для корректных расчетов ожидаемой амплитуды инфразвукового отклика атмосферы Юпитера на околосвуковое движение тени спутника и наблюдательных и модельных данных еще недостаточно, обсудим механизмы, которые могут привести к удовлетворению левой части условия (1). Фактически оно сводится к условию возникновения движущегося теплового источника атмосферных колебаний в зоне затмения.

В принципе существуют две возможности появления температурных аномалий в пределах показанного на рис. 2 тропосферно-стратосферного участка конуса тени (полутени). Как уже отмечалось, первая из них может быть связана с охлаждением этой зоны за счет прекращения инсоляции. Вторая, наоборот, может выразиться в нагреве затмеваемой зоны за счет стимулированного конвективного выноса более нагретого газа снизу. Причем обе эти аномалии — отрицательная и положительная — могут либо частично компенсироваться, либо усиливаться выделением тепла при кристаллизации аммиака или других соединений (которые с понижением температуры переходят в перенасыщенное состояние), а также увеличением поглощения ИК-радиации в упомянутых выше квадрупольных линиях водорода с локальным повышением давления. Последний механизм привлекателен, в частности, своей малоинерционностью, вследствие которой может возникнуть положительная обратная связь при появлении малого «затравочного» избытка давления в притеневой волне.

Процесс излучения в этих линиях наиболее эффективен в нижней части слоя (уровень формирования длинноволнового излучения на рис. 2), где термическая инерционность максимальна и поэтому скорость остывания мала. Подъем зоны формирования уходящего длинноволнового излучения в слой с меньшей инерционностью возможен при появлении в атмосфере дополнительного поглотителя. Частично кристаллизующийся NH_3 , как следует из полуэмпирических моделей [17], может играть роль такого поглотителя, поскольку в его длинноволновом ИК-спектре имеются широкие линии поглощения. Оценки показывают, что «компенсирующая» добавка за счет кристаллизации аммиака при этом весьма незначительна. Аналогичную роль может играть и кристаллизующийся гидразин N_2H_4 (продукт фотолитиза аммиака), максимум плотности которого приходится на обсуждаемые высоты. Однако недостаток экспериментальных данных о поглощающих свойствах твердого N_2H_4 затрудняет количественные оценки. Участие гидразина в возникновении притеневой термоаномалии тем более вероятно, что на данных высотах он всегда находится в сильно перенасыщенном состоянии — на 5—7 порядков превышающем давление насыщенного пара [11], и достаточно минимального внешнего воздействия, чтобы вызвать быструю кристаллизацию практически всего имеющегося N_2H_4 . Модельные оценки здесь также приводят к незначительному нагреву среды за счет выделения скрытой теплоты кристаллизации.

Таким образом, достаточная для РМС бегущая притеневая термоаномалия может возникать лишь при условии значительного локального уменьшения термической инерционности и существовании эффективной положительной обратной связи в фотохимических процессах.

Рассмотренные вопросы интересны также тем, что они могут иметь отношение к известному более 20 лет и в определенной степени загадочному явлению «горячих теней», которое было обнаружено в [15] и до настоящего времени считается либо атмосферным артефактом, либо ошибкой наблюдений. Согласно [15], при измерениях с ИК-радиометром, установленном на 5-м телескопе обсерватории Маунт-Паломар, из области теней Европы и Ганимеда наблюдалось увеличение потока излучения в диапазоне 8—14 мкм. Сам по себе этот экспериментальный факт (при исключении его тривиальных объяснений), возможно, и не выглядел бы столь необычным, если бы не многочисленные безуспешные попытки обнаружить подобный эффект при последующих

прохождениях по Юпитеру теней галлиевых спутников. Эффект «горячих теней» не подтвержден при использовании более совершенной аппаратуры для наблюдений теней Ио, Европы и Ганимеда [18, 19], в том числе и в более коротковолновой ИК-области.

Согласно рутинным результатам (записи-сканы диска Юпитера, проходящие через область теней), приведенным в [15], существованием можно считать возрастание ИК-потока лишь из области тени Ганимеда. Измеренный избыток теплового потока из области тени Европы не более чем вдвое превышает флюктуации по диску планеты. Избытки яркостной температуры, рассчитанные в [15], наоборот, более значительны из области тени Европы, поперечник которой примерно в 1,8 раза меньше поперечника тени Ганимеда. Однако проведенная в [15] нормировка ИК-потока на площади теней правомерна лишь в предположении, что непосредственно вызывающий явление «горячих теней» физический механизм всегда локализован лишь в области полной тени. Иными словами, рассчитанные в [15] температурные вариации в области теней модельно-зависимы. Поэтому в дальнейшем будем оперировать лишь с данными записей ИК-потока.

Как показали наши расчеты, тень Ганимеда в момент наблюдения избытка ИК-потока находилась в наиболее благоприятной области зоны РМС (рис. 1), двигалась по касательной к ней. Это дает косвенные основания предполагать, что при возникновении в данном случае динамической аномалии атмосферного инфразвука могла происходить непосредственная стимуляция эффекта «горячих теней». Дополнительным аргументом в пользу такого предположения (хотя, естественно, вероятность случайного совпадения пока нельзя считать малой) служит соотношение эффектов для теней Европы и Ганимеда. Аналогичные расчеты показывают, что тень Европы двигалась относительно атмосферы с рассогласованием $\omega \approx 2\nu$, т. е. амплитуда инфразвуковых колебаний, если они возбуждались в рассматриваемой области атмосферы, была существенно меньше. К сожалению, отсутствие точных временных привязок для остальных (не подтвердивших наличие «горячих теней») серий наблюдений [18, 19] не позволяет однозначно указать взаиморасположение теней и зон РМС в моменты регистрации сигнала. Однако приблизительно восстановление обстоятельств их прохождения свидетельствует о том, что столь благоприятная ситуация, как с тенью Ганимеда при регистрации эффекта, не складывалась ни в каком из наблюдаемых случаев.

В соответствии с изложенным максимальные температурные контрасты теней отвечали периодам их нахождения в областях спидрезонансных координат на диске и уменьшались с увеличением десинхронизма ω . Однако физическая природа эффекта «горячих теней» с большей вероятностью связана с механизмом увеличения ИК-прозрачности стратосферно-тропосферного слоя для излучения более горячих внутренних слоев, чем с его непосредственным нагревом в зоне затмения.

Итак, необходимые условия затмения варианта РМС в атмосфере Юпитера выполняются, по крайней мере, в прилегающих к тропопause слоях стратосферы и тропосферы. Что же касается достаточных условий (1), то пока их выполнение представляется дискуссионным, хотя уменьшение термической инерционности в разреженных слоях увеличивает такую вероятность. Внесение ясности в этот вопрос требует постановки целевых наблюдений [5], которые могут одновременно быть и проверкой гипотезы о связи эффекта «горячих теней» с последствиями РМС, а также более детального теоретического анализа термодинамики солнечных затмений на планетах-гигантах. При этом существенно также то, что сходные условия РМС реализуются и в атмосфере Сатурна [2] для теней Дионы, Реи, Титана и Тефии (для последней — в несколько меньшей степени).

Авторы благодарят В. К. Абалакина за содействие в расчетах точных координат теней, В. Г. Тейфеля и А. П. Видьмаченко за ценные советы и обсуждения.

1. Антонова В. П., Гусейнов Ш. Ш., Дробжев В. И. и др. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором // Изв. АН СССР. Физ. атмосферы и океана.—1988.—24, № 2.—С. 134—143.
2. Васильев В. П. Возбуждение волн плотности в атмосферах Юпитера и Сатурна движущимися тенями спутников // Астрон. циркуляр.—1986.—№ 1433.—С. 6—8.
3. Васильев В. П. Возбуждение инфразвука при радиационно-механическом синхронизме. I. Терминаторный вариант в системе Солнце — атмосфера Марса // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 6.—С. 3—9.

4. *Васильев В. П., Калининко А. И.* Синхромеханический эффект при взаимодействии космического излучения с веществом // Пробл. ядер. физ. и космич. лучей.— 1983.— Вып. 19.— С. 61—70.
5. *Васильев В. П., Литвинов В. М.* К объяснению изменчивости температурных контрастов в зоне солнечных затмений на Юпитере // Астрон. циркуляр.— 1986.— № 1461.— С. 1—2.
6. *Ляшнев Л. М.* Оптико-акустические источники звука // Успехи физ. наук.— 1981.— 135, вып. 4.— С. 637—669.
7. *Риджуэй С. Т., Ларсон Х. П., Финк У.* Инфракрасный спектр Юпитера // Юпитер. Атмосфера. Ионосфера.— М.: Мир, 1979.— Т. 2.— С. 221—262.
8. *Уоллес Л.* Тепловая структура Юпитера в стратосфере и верхней тропосфере // Там же.— С. 104—126.
9. *Харгивс Дж. К.* Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи.— Л.: Гидрометеоиздат, 1982.— 352 с.
10. *Anderson R. S., Keefer D. R., Myers O. E.* Atmospheric pressures and temperature changes during the 7 March 1970 solar eclipse // J. Atmos. Sci.— 1972.— 29, N 4.— P. 583—587.
11. *Atreya S. K., Romani P. N.* Photochemistry and clouds of Jupiter, Saturn and Uranus // Recent Adv. Planet Meteorol. Seymour Hess. Men. Symp.: IUGG Gen. Assem., Hamburg, 18—19 Aug., 1983.— Cambridge etc., 1985.— P. 17—68.
12. *Flasar F. M.* Global dynamics and thermal structure of Jupiter's Atmosphere // Icarus.— 1986.— 65, N 2/3.— P. 280—303.
13. *Goodwin G. L.* Atmospheric gravity wave production for the total eclipse of 11 June 1983 // J. Atmos. Terr. Phys.— 1983.— 45, N 4.— P. 273—274.
14. *Jones B. W., Bogart R. S.* Eclipse induced atmospheric gravity waves // Ibid.— 1975.— 37, N 9.— P. 1223—1226.
15. *Murray B. C., Wildey R. L., Westphal J. A.* Observations of Jupiter and the Galilean satellites of 10 microns // Astrophys. J.— 1964.— 139, N 3.— P. 986—993.
16. *Orton G. S.* The thermal structure of Jupiter. Observations and analysis of 8—14 micron radiation // Icarus.— 1975.— 26, N 1.— P. 142—158.
17. *Taylor F. W.* Preliminary data of the optical properties of solid ammonia and scattering parameters for ammonia cloud particles // J. Atmos. Sci.— 1973.— 30, N 5.— P. 677—683.
18. *Westphal J. A., Matthews K., Terrible R. J.* Five-micron pictures of Jupiter // Ibid.— 1974.— 188, N 3.— P. 111—112.
19. *Wildey R. L.* Thermal contrast of eclipse shadows and band structure during the 1965 apparition of Jupiter // Ibid.— 1966.— 144, N 3.— P. 1241—1244.

Радиоастрон. ин-т АН УССР,
Харьков

Поступила в редакцию 27.07.88,
после доработки 11.10.88

Научные конференции

СИМПОЗИУМ МАС № 143 «ЗВЕЗДЫ ВОЛЬФА—РАЙЕ И ИХ СВЯЗЬ С ДРУГИМИ МАССИВНЫМИ ЗВЕЗДАМИ В ГАЛАКТИКАХ»

Состоится 18—22 июня 1990 г. в г. Денпасар (Индонезия). Научная программа: основные проблемы звезд Вольфа—Райе; взаимосвязь массивных звезд в галактиках; влияние массивных звезд на окружающую межзвездную среду и эволюцию галактик.