

GAS DYNAMIC INTERACTION BETWEEN THE SOLAR WIND AND COMETARY ATMOSPHERES

V. B. BARANOV

Modern view of gas dynamic interaction of the solar wind with cometary atmospheres is presented. Results of theoretical predictions are compared with the experimental data obtained by spacecraft missions to the comet P/Halley in March 1986.

Статья посвящена изложению современного представления о газодинамическом взаимодействии солнечного ветра с кометными атмосферами. Результаты предсказаний газодинамических моделей сравниваются с экспериментальными данными, полученными на космических аппаратах, которые были запущены для исследования кометы Галлея в марте 1986 года.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМЕТНЫХ АТМОСФЕР С СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ

В. Б. БАРАНОВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

На фреске известного итальянского художника Джотто ди Бондоне "Поклонение волхвов" (1303) можно увидеть изображенную на небе хвостатую комету (рис. 1). Некоторые современные ученые уверены, что Джотто изобразил очередное прохождение вблизи Земли в 1301 году довольно активной кометы, названной кометой Галлея в честь английского астронома Эдмунда Галлея (1656–1742), вычислившего 76-летний период ее вращения вокруг Солнца и предсказавшего ее очередное появление вблизи Земли в 1758 году. Из картин художников можно получить визуальные исторические доказательства появления комет вблизи орбиты Земли в те далекие времена, когда еще не существовало ни спектрофотометрических исследований при помощи наземных телескопов, ни тем более исследова-



Рис. 1. Изображение хвостатой кометы (предположительно кометы Галлея) на фреске знаменитого итальянского художника Джотто "Поклонение волхвов" (1303)

ний при помощи космических аппаратов. Вывод космических аппаратов за пределы земной атмосферы позволил ученым проводить не только дистанционные спектрофотометрические исследования комет во всем диапазоне волновых частот, но и прямые измерения физических параметров вблизи их поверхности. Интересно, что именно комета Галлея оказалась первой кометой, которая была исследована в марте 1986 года при помощи запущенных к ней космических аппаратов “Джотто” (Европейское космическое агентство), “Вега-1” и “Вега-2” (СССР), “Суиссеи” и “Сакигакэ” (Япония).

Вблизи орбиты Земли, то есть на расстоянии около 1 а.е. (астрономическая единица, или расстояние от Земли до Солнца), яркие кометы обычно состоят из трех частей: прекрасно видимого гигантского хвоста, очень маленького размера (по сравнению с хвостом) и невидимого ядра и светящейся атмосферы, окружающей ядро и называемой комой кометы. Кома вместе с ядром обычно называется головой кометы. Несмотря на относительно малые размеры, ядро является главной частью кометы. Кома и хвост образуются как следствие истечения вещества из ядра кометы.

Если взглянуть в телескоп на только что появившуюся комету, находящуюся на расстоянии от Солнца в 3–5 а.е. и более, то можно увидеть бледную, едва светящуюся шарообразную туманность. По мере приближения к Солнцу атмосфера кометы становится все более и более активной, увеличиваясь в размерах и по яркости, изменяя форму от шаровой к овальной. Постепенно в антисолнечном направлении развивается и ее хвост.

По атмосферной активности кометы отличаются друг от друга. Многие кометы, ядра которых богаты летучими веществами, такими, как CO_2 и CO , начинают проявлять активность уже на расстоянии от Солнца $d \cong 3$ а.е. Кометы, вещество которых состоит в основном из молекул воды (H_2O), проявляют значительную активность только при $d \leq 2$ а.е. Природа же взаимодействия атмосфер комет со сверхзвуковыми потоками плазмы от Солнца (с солнечным ветром) в сильной степени зависит от этой активности, которая, в свою очередь, определяется расстоянием кометы от Солнца и составом кометного ядра. Расчеты показали, что атмосфера кометы, ядро которой радиусом $R_n = 1$ км состоит в основном из H_2O , практически не является препятствием для течения солнечного ветра при $d \geq 4$ а.е. Поток плазмы солнечного ветра беспрепятственно падает в этом случае на поверхность кометного ядра. Когда же такая комета находится на расстоянии $d = 1$ а.е. от Солнца, то в ней как результат сублимации вещества с ее поверхности и последующего его расширения развивается настолько мощная атмосфера, что она становится существенным препятствием для течения солнечного ветра. В этом случае солнечный ветер чувствует кометную атмосферу на расстоянии, которое на 5–6 порядков величины и

более может превосходить размер самого ядра кометы.

В статье раздел 1 посвящен модельному представлению о поверхности кометного ядра как источнике газодинамического истечения родительских молекул, в разделе 2 описываются физические процессы, которые происходят в потоке кометного газа, а в разделе 3 приводится одна из математических моделей такого течения. Качественная картина газодинамического обтекания атмосфер комет солнечным ветром и некоторые количественные результаты расчета осесимметричной модели, в разработку которой автор статьи внес существенный вклад [1–4], изложены в разделе 4.

Надо заметить, что структуру течения, возникающего при обтекании комет солнечным ветром, практически невозможно исследовать наземными приборами. Это можно было сделать только при помощи установленных на космических аппаратах приборов, проводивших прямые измерения вблизи комет. Именно поэтому в разделе 5 проводится сравнение некоторых результатов экспериментальных исследований обтекания кометы Галлея солнечным ветром, полученных при помощи космических аппаратов в марте 1986 года, с предсказаниями теории.

1. ПОВЕРХНОСТЬ КОМЕТНОГО ЯДРА КАК ИСТОЧНИК ГАЗОВОГО ПОТОКА

О взаимодействии солнечного ветра с кометами можно говорить только тогда, когда комета имеет довольно протяженную и плотную атмосферу. В этом случае атмосфера должна непрерывно расширяться в окружающий межпланетный газ очень низкого давления, поскольку маленькое кометное ядро имеет пренебрежимо малую гравитацию и не может удерживать свою атмосферу в равновесии. Основной причиной возникновения атмосферы является испарение твердого вещества, из которого состоит ядро, вследствие его прогревания солнечным излучением. При этом испарение происходит прямо из твердого состояния без перехода в жидкую фазу (возгонка).

Поскольку кометное ядро почти невидимо при помощи астрономических приборов, то важным представляется построение его теоретических моделей. В настоящее время считается, что ядро — это конгломерат каменистых частиц и замороженной летучей компоненты (это могут быть молекулы CO_2 , H_2O , CH_4 и т.п.). В ядре ледяные слои из замороженных газов чередуются с пылевыми слоями. По мере прогревания солнечным излучением газы (типа испаряющегося “сухого” льда) истекают наружу (в окружающий комету вакуум), увлекая за собой облака пыли. В результате ядро кометы является источником газопылевого потока, вытекающего навстречу солнечному ветру. Рассмотрим сначала количественную модель истечения потока вещества с поверхности кометы.

Если считать, что процесс возгонки происходит равновесно, то, как известно из курса физики, справедливо уравнение Клапейрона–Клаузиуса

$$n_s = n_0 \frac{T_0}{T_s} \exp \left[\frac{L}{k N_A} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right) \right], \quad (1)$$

где n_s — концентрация молекул испаряющегося вещества, T_s — их температура, k — постоянная Больцмана, N_A — число Авогадро, L — скрытая теплота испарения, которая при написании уравнения (1) считается постоянной величиной, а величина $n_0 k T_0$ соответствует давлению пара при $T_s = T_0$ (в некоторых теоретических моделях для ядер из замерзшего льда H_2O использовались значения $n_0 = 1,94 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $T_0 = 373 \text{ К}$, $L = 5 \cdot 10^{11} \text{ эрг/моль}$). Кроме того, на поверхности кометного ядра должно выполняться уравнение баланса энергии, которое при ряде упрощающих предположений, и в частности в предположениях сферически-симметричного ядра и равномерном его нагреве (равномерный нагрев поверхности возможен при достаточно быстром вращении кометного ядра), будет иметь вид

$$\frac{1 - A_s}{d^2} J = \epsilon_s \sigma T_s^4 + \frac{L}{N_A} n_s V_s, \quad (2)$$

В уравнении (2) A_s — болометрическое альbedo, характеризующее способность поверхности отражать падающее на нее излучение, d — расстояние от кометы до Солнца (в а.е.), J — солнечная постоянная, ϵ_s — излучательная способность поверхности ядра в инфракрасном диапазоне частот, σ — постоянная Стефана–Больцмана, V_s — скорость истечения молекул с поверхности ядра в результате процесса возгонки. Физический смысл уравнения (2) заключается в балансе поглощаемой кометным ядром энергии падающего солнечного излучения (левая часть) и энергии, отдаваемой ядром (первый член справа соответствует энергии электромагнитного излучения с поверхности нагретого ядра, а второй член — энергии покидающих ядро молекул).

Система уравнений (1) и (2) не является замкнутой для определения трех неизвестных величин n_s , V_s , T_s . Поэтому в литературе часто используется дополнительное предположение, что скорость истечения молекул равна скорости звука для ядер комет с малым содержанием пыли, то есть

$$V_s = \sqrt{\frac{\gamma k T_s}{m_c}}, \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad (3)$$

где c_p и c_v — удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответственно, а m_c — масса испарившейся молекулы. Для комет с большим содержанием пыли часто принимается соотношение типа соотношения (3), но с коэффициентом $M_s < 1$, который характеризует отношение скорости газа к скорости звука — так называемое число Маха.

Результат решения системы уравнений (1)–(3) при $A_s = 0,63$, $\epsilon_s = 0,37$ и $\gamma = 5/4$ представлен на рис. 2 (см. [5]), где n_s , V_s и T_s даны как функции расстояния от Солнца d . На рис. 2 видно, что с приближением к Солнцу увеличивается как скорость истечения, так и концентрация молекул кометного вещества, то есть увеличивается количество молекул, покидающих поверхность кометного ядра в единицу времени (как увидим в дальнейшем, этот параметр очень важен для проблемы взаимодействия солнечного ветра с кометной атмосферой).

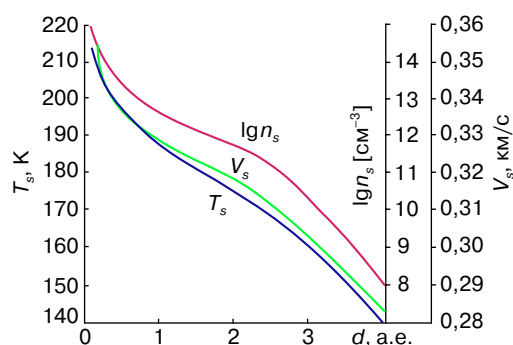


Рис. 2. Концентрация n_s молекул испаряющегося с поверхности кометы вещества, их скорость V_s и температура T_s как функции расстояния d от Солнца

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОТОКЕ ГАЗА, ИСТЕКАЮЩЕГО С ПОВЕРХНОСТИ КОМЕТНОГО ЯДРА

Изучение спектров излучения кометной комы не позволяет с достаточной степенью точности определить распределение параметров газового потока от кометы как функции расстояния от кометного ядра (скорости, концентрации продуктов распада молекул кометного происхождения, их температуры и т.п.). Даже исследование кометы Галлея в марте 1986 года при помощи космических аппаратов не очень сильно продвинуло понимание характера истечения вещества с поверхности комет, поскольку не удалось приблизиться к ядру кометы на такое близкое расстояние (порядка сотен километров). Знание же этих параметров необходимо для определения характера взаимодействия кометного газа с солнечным ветром. Поэтому построение газодинамических моделей такого течения является важной задачей.

Подавляющее большинство моделей исходит из предположения о сферически-симметричном истечении кометного газа в вакуум. При этом решение уравнений газовой динамики допускает либо всюду сверхзвуковое течение, либо всюду дозвуковое, если наличие пыли не является существенным. В присутствии же пылевой компоненты, как показал американский аэродинамик Пробстейн, возможен переход от дозвукового истечения с поверхности ядра к

сверхзвуковому течению вдали от нее. Поэтому почти во всех моделях последнего времени скорость V_s на поверхности ядра задается сверхзвуковой в соответствии с уравнением (3). Этому предположению способствовало еще и то, что для кометы Галлея расход пыли достаточно мал, чтобы повлиять на газодинамическое течение. Для расчета течения газа от источника, которым является кометное ядро, требуется знание прежде всего химического состава истекающего газа и происходящих в потоке химических реакций, главными из которых являются процессы фотодиссоциации и фотоионизации кометных молекул солнечной радиацией. Если, например, кометное ядро представляет собой в основном лед H_2O , то в результате химических реакций в потоке образуется одиннадцать главных компонент: H_2O , OH , H , O , H_2 , O_2 , H_3O^+ , H_2O^+ , OH^+ , O^+ и H^+ . Учет 27 возможных реакций при решении газодинамических дифференциальных уравнений для условий нахождения кометы на 1 а.е. от Солнца (см. рис. 2) приводит к распределению концентраций всех компонент, изображенному на рис. 3, а, б (рисунки взяты из [6]).

На рис. 3 видно, что на расстоянии в несколько десятков километров от поверхности ядра кометный газ, образовавшийся в результате испарения и состоявший в основном из молекул воды, имеет довольно разнообразный состав. Хотя преобладающим газом продолжает оставаться испарившаяся вода (рис. 3, а), для взаимодействия с солнечным ветром важно то обстоятельство, что газ становится ионизованным. Именно ионизованная компонента (как видно на рис. 3, б, преобладающими ионами являются ионы H_3O^+) наиболее сильно взаимодействует с солнечным ветром. Это связано с тем, что заряженные частицы (в данном случае кометные ионы и протоны солнечного ветра) сталкиваются между собой гораздо чаще, чем нейтральные и заряженные, или, как принято говорить в физике, длина свободного пробега заряженных частиц при их столкновениях с заряженными много меньше длины свободного пробега заряженных частиц при столкновениях с нейтральными. При этом только взаимодействие кометных ионов с протонами солнечного ветра можно рассматривать на основе модели сплошной среды, то есть на основе уравнений гидроаэромеханики.

Результаты, представленные на рис. 3, получены в предположении отсутствия пылевой компоненты и для сверхзвукового истечения газа из кометного ядра. Надо сказать, что наблюдения комет указывают на большую степень ионизации комы комет, чем получается в модельных расчетах. Поэтому в теории часто делаются дополнительные гипотезы о других механизмах ионизации, а не только о солнечном излучении.

Для проблемы взаимодействия кометных атмосфер с солнечным ветром, которая стала особенно актуальной в связи с началом эры исследования ко-

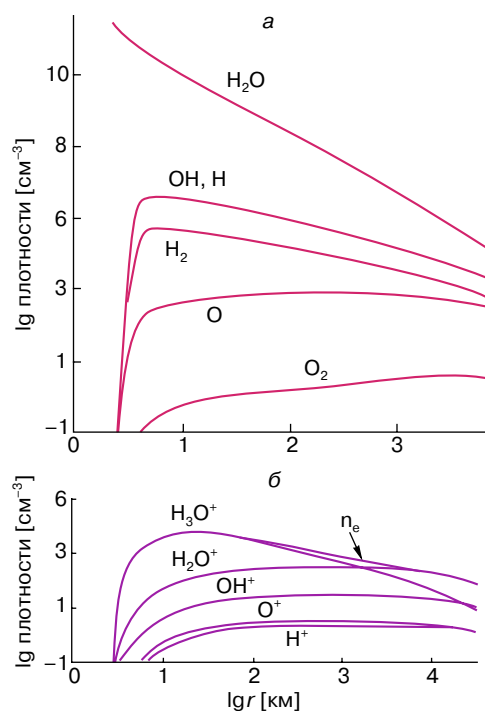


Рис. 3. Теоретические значения концентраций всех атомов и молекул (а) и их ионов (б), образованных из родительских молекул воды в результате химических реакций, как функции расстояния r от кометного ядра

мет при помощи космических аппаратов, важным является построение упрощенных математических моделей расширения кометных атмосфер. Результаты, показанные на рис. 3, помогают в решении последней проблемы, поскольку дают представление о главных компонентах истекающего с поверхности кометы газа.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА ОТ КОМЕТ

Чтобы не усложнять математическую модель, описывающую течение газа в коме комет, будем предполагать, что этот газ состоит из нейтральных молекул с концентрацией n_n (это могут быть молекулы H_2O или CO_2 , характеризующие состав данного кометного ядра) и ионов с концентрацией n_i (как видно на рис. 3, это могут быть ионы H_3O^+). Скорость радиального расширения соответствующих газов будем обозначать V_n и V_i . Тогда при предположении о сферической симметрии течения (см. раздел 1) и некоторых других дополнительных предположениях (в частности, при предположении $V_n = V_i = V_s = \text{const}$) из законов сохранения числа частиц при расширении будем иметь

$$n_n = n_s \left(\frac{R_n}{r} \right)^2, \quad n_i = \frac{n_s R^2}{V_s \tau r}. \quad (4)$$

Здесь τ — среднее время свободного пробега нейтральной молекулы для процесса ионизации, а r — расстояние от кометного ядра. Индексом s , как и в разделе 1, отмечено значение соответствующего параметра на поверхности ядра. Из (4) видно, что концентрация нейтральных молекул изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от ядра, как и полагается при свободном сферически-симметричном расширении с постоянной скоростью (эффекты ионизации для нейтральных молекул не существенны при $n_n \gg n_i$), а концентрация ионов изменяется обратно пропорционально первой степени этого расстояния (процессы фотоионизации приводят к образованию новых ионов, то есть к созданию в каждой точке течения их источников).

Предположение о том, что скорость ионов равна скорости нейтралов, оправданно тем, что поток нейтралов, испаряющихся с поверхности кометы, настолько велик, что он увлекает за собой существенно меньший поток ионов вследствие процессов столкновений. Постоянство же скорости принимается вследствие сверхзвукового расширения газа (при достаточно больших сверхзвуковых скоростях единственная сила, действующая на газ, а именно градиент давления, не является существенной). Здесь следует заметить, что при расширении газ становится все более и более разреженным. Это приводит к тому, что на некотором расстоянии от ядра, определяемом формулой

$$R_c = \frac{1}{n_n Q_{in}}, \quad (5)$$

процессы столкновений между ионами и молекулами становятся несущественными и они ведут себя как невзаимодействующие газы. Этот факт очень важен для построения модели взаимодействия кометных атмосфер с солнечным ветром.

4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМЕТНЫХ ИОНОСФЕР С СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ

Солнечный ветер представляет собой сверхзвуковой поток полностью ионизованного водорода, летящего от Солнца в среднем со скоростью 400 км/с и температурой в десятки тысяч градусов. В районе орбиты Земли концентрация протонов солнечного ветра равна примерно 10 см^{-3} . Для потока солнечного ветра развитая кометная атмосфера является препятствием, которое вызывает в нем существенные возмущения. Возникает картина течения, подобная той, которая подробно изложена в нашей предыдущей статье [7] при описании взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, где сверхзвуковым источником, обтекаемым поступательным потоком межзвездной среды, было Солнце. В рассматриваемой же в настоящей статье проблеме такой источник, обтекаемый солнечным ветром, — кометное ядро.

Интересно, что нейтральная и ионизованная компоненты кометного газа по-разному воздействуют на солнечный ветер, о чем мы уже упоминали в разделе 2. Взаимодействие потока кометных ионов с солнечным ветром происходит в соответствии с взаимодействием двух сплошных сред, то есть такое взаимодействие можно описать в рамках гидродинамических уравнений Эйлера [8]. В результате образуется картина течения, изображенная на рис. 4. На этом рисунке обозначено: BS — головная ударная волна, через которую солнечный ветер тормозится от сверхзвуковой скорости к дозвуковой вследствие его торможения на кометном газе, а IS — внутренняя ударная волна, на которой сверхзвуковой поток кометных ионов (см. раздел 3) тормозится до дозвуковых скоростей как следствие их замедления потоком солнечного ветра. Солнечный ветер отделяется от потока кометных ионов тангенциальным (иногда его называют контактным) разрывом, обозначенным на рис. 4 через CD . Следует заметить, что разрывы BS , IS и CD образуются только при взаимодействии сред, которые можно считать сплошными. Через контактный разрыв не могут просачиваться ни кометные ионы и электроны в солнечный ветер, ни протоны и электроны солнечного ветра в кометную ионосферу. На рис. 4 этот

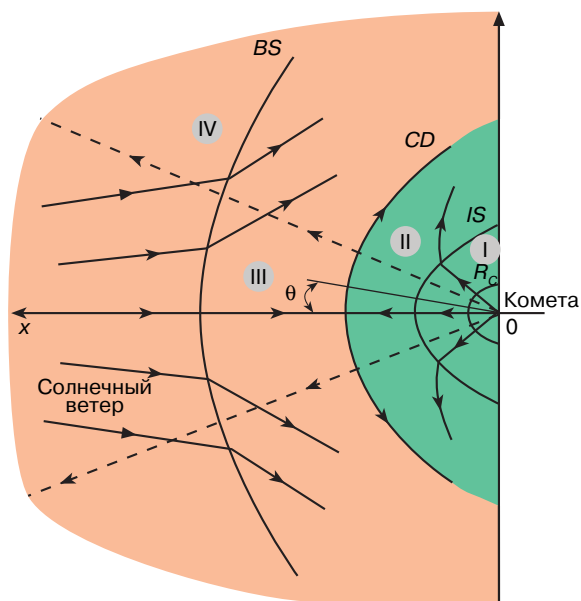


Рис. 4. Качественная картина обтекания кометной атмосферы солнечным ветром. BS — головная ударная волна, образованная в солнечном ветре, IS — внутренняя ударная волна, образованная в вытекающем газе ионов кометного происхождения, CD — контактная поверхность, отделяющая газ кометных ионов от потока солнечного ветра. Штриховые линии показывают траектории нейтральных частиц кометного происхождения, R_c — расстояние от кометного ядра, начиная с которого нейтральные молекулы кометы становятся независимыми от ионов

факт отображается тем, что линии тока солнечного ветра и кометных ионов нарисованы отклоненными этим разрывом, становясь параллельными его поверхности. С математической точки зрения на контактной поверхности выполняются условия равенства нулю нормальных компонент скорости и равенство давлений обеих ионизованных сред. Для определения формы и кометоцентрического расстояния до поверхности CD необходимо упрощенное модельное представление, рассмотренное в разделе 3.

Какова же роль нейтральных молекул, вытекающих из кометного ядра, в проблеме взаимодействия солнечного ветра с кометными атмосферами? Как мы уже упомянули в разделе 3, нейтральные молекулы имеют длину свободного пробега много больше длины свободного пробега ионов при их взаимодействии с солнечным ветром. При этом кометные нейтралы могут свободно проникать в солнечный ветер через контактную поверхность CD . Поток нейтральных молекул нельзя считать сплошной средой. На всей трассе их продвижения в солнечный ветер они фотоионизируются солнечной радиацией. Их фотоионизация в области вне контактного разрыва CD приводит к тому, что вновь образовавшиеся ионы захватываются солнечным ветром, приводя к изменению массы, импульса и энергии последнего. Такой процесс получил название “нагружение” солнечного ветра (это название закрепилось в связи с тем, что масса кометного иона существенно превосходит массу протона). Таким образом, солнечный ветер вблизи кометы представляет собой электронно-протонный газ (или, согласно принятой в физике терминологии, полностью ионизованную водородную плазму), который загрязнен кометными ионами.

В результате взаимодействие солнечного ветра с кометной атмосферой можно представить как гидродинамическое взаимодействие сверхзвукового источника ионов (комета) с поступательным сверхзвуковым потоком загрязненного кометными ионами солнечного ветра. Такой сценарий рассматриваемого физического процесса предложен в классической работе Бирмана, Бросовского и Шмидта [9]. Они же сформулировали и математическую постановку рассматриваемой здесь проблемы, предложив описывать движение солнечного ветра вблизи комет гидродинамическими уравнениями, учитывающими дополнительные источники массы, импульса и энергии вследствие описанного выше процесса нагружения. Модель, предложенная в работе [9], верна только в том случае, когда радиус расщепления кометных ионов и нейтралов R_c , определяемый формулой (5), меньше расстояния до внутренней ударной волны IS .

Поставленная в [9] задача была полностью решена численно в работе [1] за полгода до выполнения проектов исследования кометы Галлея при помощи космических аппаратов в марте 1986 года.

Для предсказания результатов прямых измерений при помощи космических аппаратов авторы [1] использовали модель истечения газа из кометного ядра, рассмотренную в разделе 3. При этом они рассмотрели осесимметричное приближение, которое верно только в случае сферически-симметричного истечения газа из кометного ядра, а для расчета источников массы, импульса и энергии в гидродинамических уравнениях использовали формулы (4). Результаты теоретической модели, предложенной в [9] и рассчитанной в [1], очень хорошо совпали с экспериментальными данными. Это сравнение рассматривается в следующем разделе.

5. ЧТО ПРЕДСКАЗАЛА ТЕОРИЯ ПЕРЕД ПОЛЕТАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ К КОМЕТЕ ГАЛЛЕЯ В МАРТЕ 1986 ГОДА

Ученые, занимавшиеся изучением комет, с нетерпением ждали очередного появления вблизи Земли кометы Галлея в марте 1986 года (в последний раз ее наибольшее сближение с нашей планетой произошло в 1910 году). Это ожидание объяснялось еще и тем, что появилась возможность исследования кометы при помощи космических аппаратов, которые должны были пройти в непосредственной близости от нее и провести прямые измерения в ее окрестности, поскольку наземными средствами невозможно наблюдать возмущения, которые вносит кометная атмосфера в компоненты солнечного ветра, так же как и возмущения, вносимые солнечным ветром в вытекающую кометную атмосферу.

Отсутствие экспериментальных данных по рассматриваемой проблеме привело к тому, что перед запуском космических аппаратов к комете Галлея в марте 1986 года центр тяжести теоретических исследований по обтеканию кометных атмосфер солнечным ветром лежал в области предсказаний тех физических процессов, которые должны были обнаружить приборы при приближении к комете. В разделах 2–4 мы кратко рассмотрели существовавшие модели истечения газа из кометного ядра, так же как и модель обтекания комет солнечным ветром, предложенную в [9].

Какие же явления предсказывала теория? Как было рассказано в разделе 3, теоретические расчеты показали, что при обтекании кометы Галлея солнечным ветром должны образоваться головная ударная волна BS , контактный разрыв CD и внутренняя ударная волна IS (см. рис. 4). При этом солнечный ветер должен тормозиться задолго до ударной волны BS (область IV на рис. 4) вследствие его нагружения ионами кометного происхождения (см. раздел 4), а кометоцентрическое расстояние BS на 2–3 порядка величины может превосходить такое же расстояние до контактного разрыва CD . В области III (см. рис. 4) загрязненный солнечный ветер достаточно резко разогревается и замедляется при переходе через головную ударную волну BS .

Если бы подтверждалась гипотеза о сверхзвуковом истечении кометного газа с поверхности ядра, то должна образоваться также ударная волна IS в потоке кометных ионов. До этой ударной волны (в области I на рис. 4) сверхзвуковой поток кометного газа не чувствует присутствия солнечного ветра (наличие границы CD чувствует только дозвуковая область II на рис. 4). Количественные оценки реальных расстояний до поверхностей BS , CD и IS в сильной степени зависят от параметра G , характеризующего количество молекул, покидающих кометное ядро в единицу времени. Этот параметр определяется формулой

$$G = 4\pi R_n^2 n_s V_s. \quad (6)$$

Из теории было также ясно, что головная ударная волна возникает не как следствие обтекания сверхзвуковым потоком какого-либо препятствия (например, крыла сверхзвукового самолета или границы раздела двух взаимодействующих сплошных сред CD , как на рис. 4), а как результат торможения солнечного ветра до дозвуковых скоростей вследствие захвата вновь образовавшихся кометных ионов. Из теоретических расчетов и оценок величины $G \sim 10^{30} \text{ с}^{-1}$ для кометы Галлея следовало, что головная ударная волна BS находится на расстоянии порядка 10^6 км от поверхности ядра, а контактный разрыв CD — на расстоянии порядка 10^4 км.

На рис. 5 изображены траектории космических аппаратов “Вега-1”, “Вега-2”, “Джотто”, “Суиссеи” и “Сакигаке”, пролетавших около кометы Галлея в марте 1986 года. Интересно, что все аппараты пролетали с подветренной стороны (со стороны набегающего на комету солнечного ветра), которая наиболее хорошо поддается теоретическим расчетам. Как видно на рис. 5, наиболее близко к комете пролетел аппарат “Джотто” (расстояние его наи-

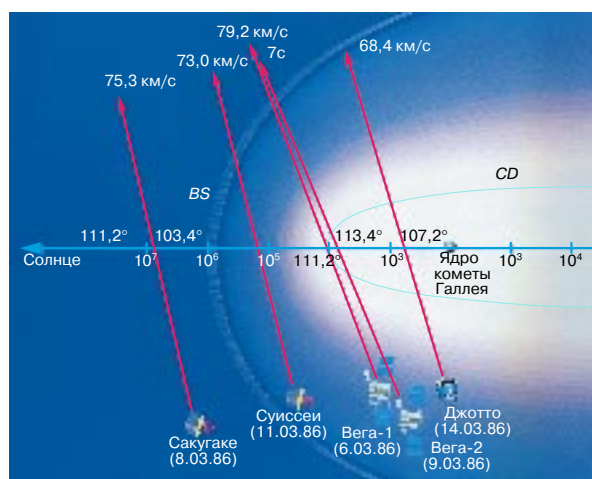


Рис. 5. Траектории космических аппаратов, которые исследовали комету Галлея в марте 1986 года. CD — поверхность, изображенная на рис. 4

большого сближения с кометой было около 600 км), и он, очевидно, пересек как головную ударную волну, так и контактный разрыв. Максимальное же сближение аппаратов “Вега” составляло примерно 8–9 тыс. км, и они хотя и пересекли головную ударную волну, но не заметили пересечения контактного разрыва. Аппарат “Суиссеи” пересекал только головную ударную волну, поскольку расстояние его максимального сближения с кометой Галлея было примерно 150 тыс. км.

Ниже представлены результаты сравнения предсказаний теории согласно расчетам, проведенным в [1] (см. [2–4]), с данными, полученными в экспериментах по исследованию кометы Галлея в марте 1986 года.

На рис. 6 сравниваются данные теоретической модели по положению и форме головной ударной волны BS для разных значений параметров, определяющих состояние невозмущенного солнечного ветра во время пересечения головной ударной волны аппаратами “Суиссеи”, “Вега-1” и “Вега-2” (соответственно 3, 6 и 9 марта) и “Джотто” (14 марта). Видно очень хорошее совпадение предсказаний теории и эксперимента.

На рис. 7 экспериментальное распределение скорости солнечного ветра вдоль траектории “Суиссеи” сравнивается с данными теории (сплошная кривая). Получено также очень хорошее совпадение. Даже скачок скорости в головной ударной волне (как видно на рис. 7, этот скачок был зафиксирован аппаратом примерно в 15^h UT) совпал по величине и положению на выходной части траектории “Суиссеи” (на входном участке прибор, измерявший скорость, не работал).

Подробное сравнение теории и эксперимента для разных участков траекторий аппаратов, пролетавших мимо кометы Галлея в марте 1986 года, есть в работе [3]. Не все сравнения приводят к хорошему совпадению. Наибольший интерес представляют несовпадения, поскольку именно они стимулируют теоретиков уточнять модельные представления о физике происходящих около комет явлений. Так, например, в модели, рассчитанной в [1], такое несовпадение имеет место по положению контактного разрыва CD (в теории он находится от кометы раза в полтора дальше, чем в эксперименте). Это расхождение можно, например, объяснить влиянием межпланетного магнитного поля, которое не учитывалось в [1]. Кроме того, ученые, приборы которых стояли на наиболее приблизившемся к комете Галлея аппарате “Джотто”, утверждают, что они не обнаружили внутренней ударной волны IS . Однако интерпретация экспериментальных данных, полученных на “Джотто”, привела авторов работы [3] к выводу, что внутренняя ударная волна все-таки обнаружена в этих экспериментах.

Несмотря на имеющиеся количественные расхождения между теорией и экспериментом, можно

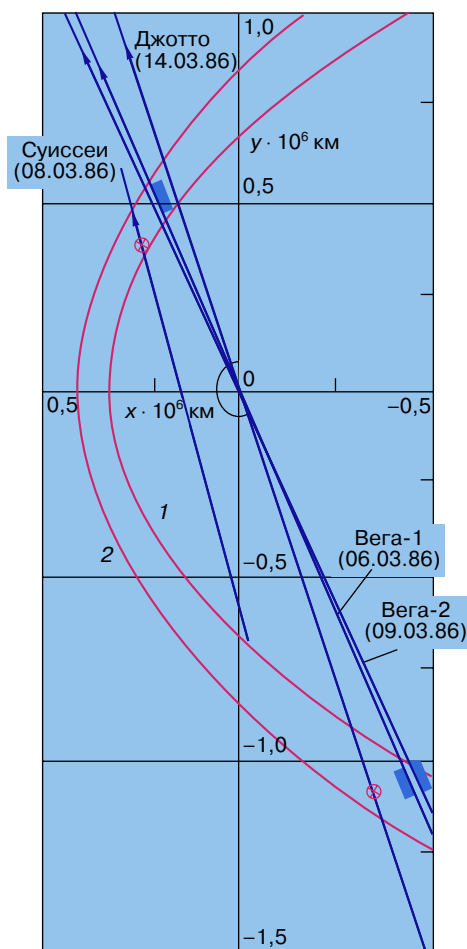


Рис. 6. Теоретические положения головной ударной волны BS в марте 1986 года: 6 марта в момент прохождения мимо кометы Галлея аппаратов “Вега” и “Суиссеи” (кривая 1) и 14 марта во время прохождения мимо кометы Галлея аппарата “Джотто” (кривая 2). На траекториях соответствующих космических аппаратов отмечены моменты регистрации BS установленными на них приборами

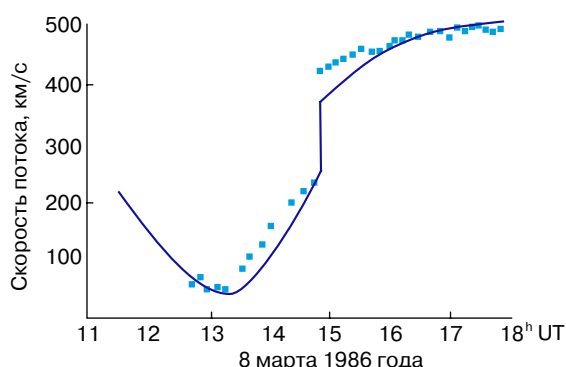


Рис. 7. Теоретическое (сплошная линия) и экспериментально измеренное 8 марта 1986 года вдоль траектории “Суиссеи” (точки) изменение скорости солнечного ветра (UT – всемирное время)

твердо утверждать, что теоретические представления о характере взаимодействия солнечного ветра с кометными атмосферами были в основном правильными, что и доказали экспериментальные данные, полученные при помощи космических аппаратов в марте 1986 года.

Интересно, что данные по положению ударной волны около кометы Григга–Шеллерупа, полученные аппаратом “Джотто” 10 июля 1992 года (вторая комета, с которой встретился аппарат после встречи с кометой Галлея), были использованы затем, чтобы оценить плохо измеряемый в эксперименте параметр, а именно количество молекул, покидающих ее поверхность в единицу времени. Этот параметр определяется формулой (6).

Надо отметить, что взаимодействие солнечного ветра с кометной атмосферой приводит к тому, что кометные ионы, образовавшиеся в областях I и II, отклоняются в хвост кометы. Однако такие ионы составляют лишь незначительную часть кометного хвоста. Мощный хвост у активных комет, который часто видим и невооруженным глазом, создается в основном отклонением кометных молекул во всех областях I–IV радиационным давлением солнечного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов В.Б., Лебедев М.Г. // Письма в “Астрон. журн.”. 1986. Т. 12. С. 551.
2. Baranov V.B., Lebedev M.G. // *Astrophys. Space Sci.* 1988. Vol. 147. P. 69.
3. Baranov V.B., Lebedev M.G. // *Astron. Astrophys.* 1993. Vol. 273. P. 695.
4. Baranov V.B. *Astrophysics and Space Physics Review*. L.: Gordon and Breach, 1995. Vol. 9. Pt. 3.
5. Houppis H., Mendis D. // *Astrophys. J.* 1981. Vol. 243. P. 1088.
6. Marconi M., Mendis D. // *Ibid.* 1982. Vol. 260. P. 386.
7. Баранов В.Б. Влияние межзвездной среды на строение гелиосферы // *Соросовский Образовательный Журнал*. 1996. № 11. С. 73.
8. Баранов В.Б., Краснобаев К.В. *Гидродинамическая теория космической плазмы*. М.: Наука, 1977.
9. Biermann L., Brosowski B., Schmidt H.U. // *Solar Phys.* 1967. Vol. 1. P. 254.

* * *

Владимир Борисович Баранов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, зав. лабораторией физической газовой динамики Института проблем механики РАН. Член редколлегии журнала “Известия РАН. Механика жидкости и газа”. Область научных интересов: аэромеханика и газовая динамика, магнитная гидродинамика и динамика плазмы. Автор более 80 статей и двух монографий.