# Министерство образования РФ

# Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Кафедра ИЗОС

Реферат по экологии на тему:

## « СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР, ОСОБЕННОСТИ МЕЖПЛАНЕТНОГО

## ПРОСТРАНСТВА (СОЛНЦЕ – ПЛАНЕТЫ) »

Работу выполнил: Локсеев К.О.

ФКТИ, 3311 группа

Работу проверил: Бойцов А.А.

Санкт-Петербург

2004 г.

### С О Д Е Р Ж А Н И Е

1. ВВЕДЕНИЕ……………………………………………………………………. 3

2. СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР, ОСОБЕННОСТИ

МЕЖПЛАНЕТНОГО

ПРОСТРАНСТВА (СОЛНЦЕ – ПЛАНЕТЫ)………………………………... 3

2.1. СОЛНЦЕ…………………………………………………………….…….. 3

2.2. ЗЕМЛЯ…………………………………………………………………….. 7

2.3. КОМЕТЫ………………………………………………………………….. 11

2.3.1. Поверхность кометного ядра как источник газового потока……. 13

2.3.2. Физические процессы в потоке газа,

истекающего с поверхности кометного ядра…………………….. 15

2.3.3. Математическая модель истечения газа от комет………………... 17

2.3.4. Взаимодействие кометных ионосфер с солнечным ветром……… 18

### 2.3.5. Что предсказала теория перед полетами

### космических аппаратов к комете Галлея

### в марте 1986 года…………………………………………………… 20

2.4. ПЛАНЕТЫ…………………………………………………………………. 24

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ…………………………………………………………………. 25

4. ЛИТЕРАТУРА…………………………………………………………………... 26

-2-

### 

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Кажется, что в мире нет ничего более постоянного, чем Солнце. Наблюдаемые с древних времен пятна на диске Солнца кому-то казались курьезом, а кому-то - кознями дьявола. Лишь в XIX веке было замечено, что после появления солнечных пятен на Земле усиливаются полярные сияния и регистрируются колебания геомагнитного поля - магнитные бури. В начале XX века выдающийся российский ученый А. Л. Чижевский (1897-1964) впервые высказал идею о влиянии солнечной активности на неживой мир, биосферу и социальные процессы и назвал ее "космической погодой". Так как физические основы подобного воздействия были тогда совершенно неизвестны, взгляды Чижевского многие считали близкими к мистицизму. Это трагически сказалось на судьбе ученого, а его основополагающие труды были изданы только спустя много лет. В настоящее время благодаря космическим исследованиям природа нашей зависимости от Солнца стала более понятной, а предупреждения о влиянии солнечных вспышек и магнитных бурь на состояние здоровья и работоспособность технических систем стали частью нашей жизни.[5]

**2. СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР, ОСОБЕННОСТИ МЕЖПЛАНЕТНОГО**

**ПРОСТРАНСТВА (СОЛНЦЕ – ПЛАНЕТЫ)**

# **2.1 СОЛНЦЕ**

# Солнечный ветер - непрерывный поток плазмы солнечного происхождения, распространяющийся приблизительно радиально от Солнца и заполняющий собой Солнечную систему до гелиоцентрический расстояний порядка 100 а.е. С.в. образуется при газодинамическом расширении *солнечной короны* в межпланетное пространство.

Первые свидетельства существования С.в. получены Л.Бирманом (ФРГ) в 1950-х гг. по анализу сил, действующих на плазменные хвосты комет. В 1957 г. Ю.Паркер (США), анализируя условия равновесия вещества короны, показал, что корона не может находиться в условиях гидростатического равновесия, как это раньше предполагалось, а должна расширяться, и это расширение при имеющихся граничных условиях должно приводить к разгону коронального вещества до сверхзвуковых скоростей.

Средние характеристики С.в. на орбите Земли: скорость 400 км/с, плотность протонов - 6 на 1 куб.см, температура протонов 50 000 К, температура электронов 150 000 К, напряжённость магнитного поля 5·10-5 эрстед.

-3-



Потоки С.в. можно разделить на два класса: медленные - со скоростью ок. 300 км/с и быстрые - со скоростью 600-700 км/с.

С.в., возникающий над областями Солнца с различной ориентацией магнитного поля, образует потоки с различно ориентированным межпланетным магнитным полем - т.наз. секторную структуру межпланетного магнитного поля.

Межпланетная секторная структура - это разделение наблюдаемой крупномасштабной структуры С.в. на чётное число секторов с различным направлением радиального компонента межпланетного магнитного поля. Характеристики С.в. (скорость, температура, концентрация частиц и др.) также в среднем закономерно изменяются в сечении каждого сектора, что связано с существованием внутри сектора быстрого потока С.в. Границы секторов обычно располагаются внутри медленного потока С.в. Чаще всего наблюдаются два или четыре сектора, вращающихся вместе с Солнцем. Эта структура, образующаяся при вытягивании С.в. крупномасштабного магнитного поля короны, может наблюдаться в течение нескольких оборотов Солнца. Секторная структура является следствием существования токового слоя в межпланетной среде, который вращается вместе с Солнцем. Токовый слой создаёт скачок магнитного поля: выше слоя радиальный компонент межпланетного магнитного поля имеет один знак, ниже - другой. Токовый слой располагается приблизительно в плоскости солнечного экватора и имеет складчатую структуру. Вращение Солнца приводит к закручиванию складок токового слоя в спирали (т.наз. "эффект балерины"). Находясь вблизи плоскости *эклиптики* , наблюдатель оказывается то выше, то ниже токового слоя, благодаря чему попадает в секторы с различными знаками радиального компонента межпланетного магнитного поля.

При обтекании С.в. препятствия, способных эффективно отклонять С.в. (магнитные поля Меркурия, Земли, Юпитера, Сатурна или проводящие ионосферы

-4-

Венеры и, по-видимому, Марса), образуется головная отошедшая ударная волна. С.в. тормозится и разогревается на фронте ударной волны, что позволяет ему обтекать препятствие. При этом в С.в. формируется полость - магнитосфера, форма и размер которой определяются балансом давления магнитного поля планеты и давления обтекающего потока плазмы. Толщина фронта ударной волны - порядка 100 км. В случае взаимодействия С.в. с непроводящим телом (Луна) ударная волна не возникает: поток плазмы поглощается поверхностью, а за телом образуется постепенно заполняемая плазмой С.в. полость.

На стационарный процесс истечения плазмы короны накладываются нестационарные процессы, связанные со вспышками на Солнце. При сильных солнечных вспышках происходит выброс вещества из нижних областей короны в межпланетную среду. При этом также образуется ударная волна, которая постепенно замедляется при движении через плазму С.в.

Приход ударной волны к Земли приводит к сжатию магнитосферы, после которого обычно начинается развитие магнитной бури.

С.в. простирается до расстояния ок. 100 а.е., где давление межзвёздной среды уравновешивает динамическое давление С.в. Полость, заметаемая С.в. в межзвёздной среде, образует гелиосферу. Расширяющийся С.в. вместе с вмороженным в него магнитным полем препятствует проникновению в Солнечную систему галактических космических лучей малых энергий и приводит к вариациям космических лучей больших энергий.

Явление, аналогичное С.в., обнаружено и у некоторых типов других звёзд (звёздный ветер).[7]

Поток энергии Солнца, питаемый термоядерной реакцией в его центре, к счастью, исключительно стабилен, не в пример большинству других звезд. Большая его часть в конце концов испускается тонким поверхностным слоем Солнца - фотосферой - в виде электромагнитных волн видимого и инфракрасного диапазона. Солнечная постоянная (величина потока солнечной энергии на орбите Земли) равна 1370 Вт/м2. Можно представить, что на каждый квадратный метр поверхности Земли приходится мощность одного электрического чайника. Всего Солнце тогда можно заменить чуть более чем 1014 чайниками.

Над фотосферой расположена корона Солнца - зона, видимая с Земли только во время солнечных затмений и заполненная разреженной и горячей плазмой с температурой в миллионы градусов. Это самая нестабильная оболочка Солнца, в которой зарождаются основные проявления солнечной активности, влияющие на Землю. Косматый вид короны Солнца демонстрирует структуру его магнитного поля - светящиеся сгустки плазмы вытянуты вдоль силовых линий. Горячая плазма, истекающая из короны, формирует солнечный ветер - поток ионов (состоящий на 96% из ядер водорода - протонов и на 4% из ядер гелия - альфа-частиц) и электронов, разгоняющийся в межпланетное пространство со скоростью 400-800 км/с.

Солнечный ветер растягивает и уносит с собой солнечное магнитное поле. Это происходит потому, что энергия направленного движения плазмы во внешней короне больше, чем энергия магнитного поля, и принцип вмороженности увлекает

-5-

поле за плазмой. Комбинация такого радиального истечения с вращением Солнца (а магнитное поле "прикреплено" и к его поверхности) приводит к образованию спиральной структуры межпланетного магнитного поля - так называемой спирали Паркера. Солнечный ветер и магнитное поле заполняют всю Солнечную систему, и, таким образом, Земля и все другие планеты фактически находятся в короне Солнца,испытывая воздействие не только электромагнитного излучения, но еще и солнечного ветра и солнечного магнитного поля.

Интересно, что впервые о существовании солнечного ветра догадались еще до наступления космической эры при изучении комет. Если бы на кометы действовало только световое давление Солнца, то их хвосты были бы направлены точно от Солнца. Американский ученый Людвиг Бирман в 1951 году обнаружил, что хвосты комет отклонены в среднем на 4 градуса от этого направления. Такое отклонение можно объяснить только наличием потока ионов и электронов - "ветра", "дующего" от Солнца со скоростью около 400 км/с. Позднее данные, полученные первыми советскими космическими аппаратами "Луна" в 1959 году, позволили сотруднику Института космических исследований К. И. Грингаузу с коллегами впервые экспериментально обнаружить солнечный ветер.

Таково вкратце современное представление о стабильном Солнце. Сообщения о солнечных пятнах, заметных в виде помутнений на фотосфере, стали, вероятно, первыми историческими свидетельствами солнечной изменчивости. Несмотря на то, что случаи наблюдения отдельных больших пятен известны с античных времен, их "официальное" открытие датируется 1611 годом, когда изобретение телескопа позволило начать постоянные исследования. В середине XIX века немецкий ученый Рудольф Вольф, собрав практически все известные упоминания о пятнах, обнаружил примерно 11-летнюю периодичность их появления (сами пятна могут существовать по несколько месяцев). С тех пор количество пятен, посчитанное по особой формуле, - число Вольфа - служит основной характеристикой солнечной активности. В годы спокойного Солнца - в солнечный минимум - пятен практически нет, а во время максимума солнечной активности число пятен может достигать нескольких десятков.

Чтобы понять причины солнечной активности, нам придется познакомиться поближе с магнитным полем Солнца. В период минимума активности конфигурация солнечного магнитного поля близка к дипольной и похожа на форму магнитного поля Земли. При приближении к максимуму активности структура магнитного поля по не вполне понятным причинам усложняется. Одна из наиболее красивых гипотез гласит, что при вращении Солнца магнитное поле как бы навивается на него, постепенно погружаясь под фотосферу. Со временем, в течение как раз солнечного цикла, магнитный поток, накопленный под поверхностью, становится таким большим, что жгуты силовых линий начинают выталкиваться наружу. Места выхода силовых линий образуют пятна на фотосфере и магнитные петли в короне, видимые как области повышенного свечения плазмы на рентгеновских изображениях Солнца. Величина поля внутри солнечных пятен достигает 0,01 тесла, в сто раз больше, чем поле спокойного Солнца.

-6-

Интуитивно энергию магнитного поля можно связать с длиной и количеством силовых линий: их тем больше, чем выше энергия. При подходе к солнечному максимуму накопленная в поле огромная энергия начинает периодически взрывным образом высвобождаться, расходуясь на ускорение и разогрев частиц солнечной короны. Резкие интенсивные всплески коротковолнового электромагнитного излучения Солнца, сопровождающие этот процесс, носят название солнечных вспышек. На поверхности Земли вспышки регистрируются в видимом диапазоне как небольшие увеличения яркости отдельных участков солнечной поверхности. Однако уже первые измерения, выполненные на борту космических аппаратов, показали, что наиболее заметным эффектом вспышек оказывается значительное (до сотен раз) увеличение потока солнечного рентгеновского излучения и энергичных заряженных частиц - солнечных космических лучей. Во время некоторых вспышек происходят также выбросы значительного количества плазмы и магнитного поля в солнечный ветер - так называемых магнитных облаков, которые начинают быстро расширяться в межпланетное пространство, сохраняя форму магнитной петли с концами, опирающимися на Солнце. Плотность плазмы и величина магнитного поля внутри облака в десятки раз превосходят типичные для спокойного времени значения этих параметров в солнечном ветре.

Несмотря на то, что во время крупной вспышки может выделиться до 1025 джоулей энергии (поистине астрономическая величина), общее увеличение потока энергии в солнечный максимум невелико и составляет всего 0,1-0,2%. Можно сказать, что солнечная активность - это всего лишь гримаса на чистом и спокойном солнечном диске, обогревающем Землю. Но так же как выражение лица человека может иногда ранить больнее, чем какое-либо его действие, так и межпланетное пространство и окрестности Земли очень чувствительны к всплескам солнечной активности и их проявлениям в межпланетном пространстве - солнечным космическим лучам, магнитным облакам, коротковолновому электромагнит ному излучению. Посмотрим, что Земля может противопоставить в свою защиту. [5]

**2.2 ЗЕМЛЯ**

Если основной поток солнечного излучения в видимом и инфракрасном диапазоне необходим для существования биосферы, то солнечное рентгеновское и ультрафиолетовое излучение губительно для живой материи. К счастью, практически все оно поглощается еще в атмосфере Земли при ионизации ее верхних слоев. Образующаяся в результате этого на высотах от 80 до нескольких сотен километров оболочка, в которой плазма соседствует с нейтральными атомами и молекулами, называется ионосферой. Ионосфера - ближайший к поверхности Земли слой, проводящий электричество. Она лежит на изоляторе - нейтральной атмосфере. В отличие, например, от солнечного ветра, ионосфера "умеет" проводить ток поперек силовых линий магнитного поля. Эту способность создают частые соударения ионов и электронов с нейтральными атомами, в большом количестве присутствующими на таких высотах. Сталкиваясь, заряженные частицы меняют

-7-

направление движения и переходят от одной силовой линии к другой, разрушая их изоляцию.

От потока солнечных космических лучей и солнечного ветра Землю защищает магнитный щит. Хотя эту оболочку невозможно увидеть, люди издавна пользовались земным магнитным полем для определения направления при помощи компаса. После догадки жившего в XVI веке английского физика Уильяма Гильберта, что Земля - огромный магнит, стало понятно, что геомагнитное поле существует и в околоземном пространстве. Если на ее поверхности величина магнитного поля составляет (3-5)ґ10-5 тесла, в зависимости от широты места измерения, то с удалением от Земли магнитное поле ослабевает пропорционально третьей степени расстояния и скоро становится достаточно слабым, чтобы ощущать воздействие межпланетной среды.

Солнечный ветер у орбиты Земли сильно разрежен и непостоянен - средняя концентрация частиц в нем составляет около 1-10 см-3, скорость - 250-1000 км/с, величина межпланетного магнитного поля - (1-10)ґ10-9 тесла. Так как заряженные частицы неохотно меняют силовые линии магнитного поля, поток солнечного ветра не смешивается с геомагнитным полем и околоземным плазменным населением, а обтекает их, образуя геомагнитную полость - магнитосферу Земли. Граница магнитосферы - магнитопауза - проходит там, где давление солнечного ветра уравнивается давлением геомагнитного поля. В подсолнечной точке она находится в среднем на расстоянии девяти радиусов Земли (55-60 тысяч километров) от ее центра. Полное усилие, которое солнечный ветер оказывает на магнитосферу, ничтожно, оно примерно равно весу воды в большом бассейне, но тем не менее внешние области магнитосферы, заполненные слабым геомагнитным полем, сильно искажены относительно начальной - дипольной - формы. Со стороны Солнца (дневной стороны) магнитосфера сплющивается, а с противоположной - ночной - вытягивается, образуя магнитный хвост, тянущийся на сотни радиусов Земли, более миллиона километров. А поскольку поток солнечного ветра сверхзвуковой, то перед магнитосферой, как перед сверхзвуковым самолетом, образуется ударная волна.

Внешняя магнитосфера содержит разреженную (менее 1 см-3) плазму солнечного и ионо-сферного происхождения, нагретую до миллионов и сотен миллионов градусов. Но при таких низких плотностях понятие температуры как меры теплоты объекта, находящегося в термодинамическом равновесии, становится бессмысленным и вместо температуры используют величину средней энергии заряженных частиц, выраженную в электрон-вольтах (эВ). Частица с единичным зарядом приобретает (или теряет, в зависимости от знака заряда) один электрон-вольт энергии, пройдя разность потенциалов 1 В. Температура плазмы в этих единицах составляет от 1 до 100 килоэлектрон -вольт (кэВ).

Несмотря на то, что полная масса горячих частиц внешней магнитосферы составляет всего около тонны, их роль в построении магнитосферы очень важна. Только простейшие конфигурации магнитного поля типа дипольной могут существовать в пространстве сами по себе, в создании же более сложных форм, к которым принадлежит и магнитосфера, согласно уравнениям Максвелла , должны

-8-

участвовать электрические токи. Такую замкнутую систему токов, текущих по большей части в местах резких изменений направления магнитного поля - вокруг Земли вдоль магнитопаузы (ток Чепмена-Ферраро), поперек магнитного хвоста и некоторых других, и формируют частицы плазмы.

В целом влияние солнечного ветра на магнитосферу достаточно сильно, но ее форма искаженного диполя всегда сохраняется. Так как частицы легко передвигаются вдоль силовых линий магнитного поля, особенности различных областей магнитосферы проецируются вдоль линий и на малые высоты, в ионосферу. Силовые линии из более удаленных областей подходят к Земле в более близких к полюсам районах. Приполярные районы - "полярные шапки" - всегда заполнены так называемыми "открытыми" силовыми линиями, другой конец которых уходит в межпланетное пространство. Все более близкие к экватору силовые линии замкнуты, и оба их конца упираются в Землю. Линии, наиболее удаленные точки которых находятся в окрестностях магнитопаузы и в магнитном хвосте - самых динамичных областях магнитосферы, сильно реагирующих на изменения в солнечном ветре, подходят к Земле в зонах так называемого аврорального овала, расположенных на 65-72 градусах магнитной широты. (Здесь надо помнить, что магнитные полюса смещены относительно географических и южный магнитный полюс находится на севере канадского архипелага, в точке с координатами 71° северной широты и 265° долготы). В экваториальной области к Земле подходят линии из более стабильной внутренней магнитосферы, сохраняющей дипольную конфигурацию поля.

Описанная выше схема магнитосферы была впервые предложена американскими физиками Сидни Чeпменом и Винцентом Ферраро в 30-х годах XX века. Она удачно описывала форму магнитосферы, но не могла объяснить внезапных отклонений геомагнитного поля от своего постоянного значения. Такие отклонения исторически называют геомагнитной активностью.

Более близкой к реальности оказалась предложенная в 1961 году британским ученым Джеймсом Данжи модель "открытой" магнитосферы, которая учитывала взаимодействие геомагнитного и межпланетного магнитных полей. Согласно этой модели, когда направление межпланетного магнитного поля становится противоположным направлению геомагнитного поля на дневной стороне, начинается процесс так называемого пересоединения. При сближении противоположно направленных силовых линий магнитное поле обращается в нуль и принцип вмороженности нарушается. Из "замкнутой" геомагнитной линии и "свободной" линии межпланетного поля образуются две "открытые" силовые линии, которые одним концом начинаются на Земле в полярной шапке, а другим - уходят в межпланетное пространство. Пересоединение "выгодно" с энергетической точки зрения, так как суммарная длина силовых линий уменьшается. Поток солнечного ветра сносит "открытые" линии на ночную сторону. Здесь противоположно направленные линии снова сближаются, и процесс ночного пересоединения воссоздает линии солнечного ветра и замкнутые геомагнитные линии, которые постепенно возвращаются на дневную сторону. При этом магнитосфера и ионосфера оказываются вовлеченными в круговорот - глобальную конвекцию. Интенсивность

-9-

конвекции зависит от величины и направления межпланетного поля, а также скорости солнечного ветра, определяющей "количество" его силовых линий, падающих на магнитопаузу. Так как геомагнитное поле на экваторе направлено на север, "открывает" магнитосферу "южное" направление межпланетного поля. Когда его направление "северное", процесс пересоединения не идет и магнитосфера "закрыта".

Скорость пересоединения на ночной стороне обычно меньше, чем на дневной, поэтому в хвосте магнитосферы происходит накопление открытых силовых линий и, следовательно, магнитной энергии. Размер полярной шапки растет, и зона аврорального овала сдвигается ближе к экватору на несколько градусов. Через некоторое время (1 - 2 часа) магнитный хвост, "переполненный" магнитным полем, теряет устойчивость, процесс пересоединения на ночной стороне принимает взрывной характер, и за несколько минут избыточные силовые линии сбрасываются. Этот циклический процесс называется магнитосферной суббурей и сопровождается значительным возмущением всей внешней магнитосферы Земли. Фактически происходит обрыв части магнитного хвоста, а его остаток поджимается к Земле. В этот момент часть плазмы внешней магнитосферы становится "лишней" и сбрасывается по силовым линиям в авроральную зону ионосферы. Здесь энергичные ионы и электроны сталкиваются с нейтральными атомами и заставляют их испускать фотоны. Именно так возникают замечательные по своей красоте полярные сияния (auroras borealis - по-латыни), давшие свое название авроральной зоне.

Другое важное следствие суббури - изменения в системе магнитосферных токов. При "отрыве" магнитного хвоста электрический ток, в нормальных условиях текущий поперек хвоста, вынужден обойти этот разрыв через ионосферу, используя "резервную цепь": вдоль силовых линий к Земле, затем вдоль авроральной зоны ионосферы и обратно в хвост. Сила возникающего при этом ионосферного тока - электроджета - составляет более миллиона ампер, а магнитное поле, наводимое им на поверхности земли в авроральной зоне, вносит существенные, до 10-6 тесла (2% величины стабильного поля), вариации в геомагнитное поле. Наряду с полярными сияниями появление вариаций служит основным признаком начала суббури, а их величина, называемая индексом *АЕ,* - главной характеристикой силы суббури.

Направление межпланетного магнитного поля постоянно меняется более или менее случайным образом, поэтому "рядовые" суббури, связанные с "южными" полями, случаются несколько раз за сутки, независимо от текущей солнечной активности. Более известные широкому читателю магнитные бури регистрируются реже. Они непосредственно связаны со вспышками солнечной активности, а точнее, с попаданием Земли в зоны аномально интенсивного солнечного ветра и в межпланетные магнитные облака.

Величина поля в магнитном облаке у орбиты Земли возрастает до 50-100 нанотесла (1нТл = 10-9 Тл), а скорость солнечного ветра - до 1000 км/с. Эффект такого увеличения подобен смене легкого ветерка на ураган. Интенсивность магнитного пересоединения на дневной стороне возрастает на порядок, приводя к разрастанию области, занимаемой полярной шапкой. Во время сильной бури мощнейшие

-10-

магнитные суббури следуют одна за другой, а авроральная зона расширяется вплоть до умеренных широт. Конвекция, прежде незаметная на фоне взрывных процессов в хвосте, начинает доминировать, возмущая внутреннюю магнитосферу и создавая кольцевой ток, опоясывающий Землю на высоте 20-30 тысяч километров. У ее поверхности ток создает магнитное поле, направленное противоположно основному геомагнитному. Амплитуда регистрируемого в результате уменьшения полного поля называется *Dst*-индексом и служит основной характеристикой силы магнитной бури. Так, во время крупнейшей бури этого солнечного максимума, разыгравшейся 31 марта 2001 года и длившейся более суток, индекс *Dst* составил \_358 нТл, а полярные сияния наблюдались даже в Москве. Энергия, выделившаяся тогда в магнитосфере Земли, составила около 5ґ1017 Дж, что примерно равно энергии взрыва 100 мегатонн тротила. [5]

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  |  | | --- | --- | --- | | **Солнечный ветер вблизи орбиты Земли:** | | | | Скорость | **400 – 700** | км/с | | Температура | **5 · 10 4 – 5 · 10 5** | К | | Магнитная индукция | **10 -9 – 10 -8** | Тл | | Концентрация | **1 – 10** | 1/см**3** | | Поток массы | **10 8 – 10 10** | кг/с | | Поток энергии | **10 19** | Вт | |

**2.3 КОМЕТЫ**

На фреске известного итальянского художника Джотто ди Бондоне "Поклонение волхвов" (1303) можно увидеть изображенную на небе хвостатую комету (рис. 1).

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 1.** Изображение хвостатой кометы (предположительно кометы Галлея) на фреске знаменитого итальянского художника Джотто "Поклонение волхвов" (1303) |
| -11- |

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 исследований 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 "Сакигаке" (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 CO2 и CO, начинают проявлять активность уже на расстоянии от Солнца *d* 3 а.е. Кометы, вещество которых состоит в основном из молекул воды (H2O), проявляют значительную активность только при *d* 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 H2O, практически не является препятствием для течения солнечного ветра при *d* 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



-12-

случае солнечный ветер чувствует кометную атмосферу на расстоянии, которое на 5-6 порядков величины и более может превосходить размер самого ядра кометы.

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 2.3.5 проводится сравнение некоторых результатов экспериментальных исследований обтекания кометы Галлея солнечным ветром, полученных при помощи космических аппаратов в марте 1986 года, с предсказаниями теории.

### **2.3.1.** 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 CO2 , H2O, CH4 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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (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 *n0kT0* соответствует давлению пара при *T*s = *T*0 (в некоторых теоретических моделях для ядер из замерзшего льда H2O использовались значения *n*0 = 1,94 1019 см-3, *T*0 = 373 K, *L* = 5 1011 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



|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |
| -13- |  |

В уравнении (2) - болометрическое альбедо, характеризующее способность поверхности отражать падающее на нее излучение, - расстояние от кометы до Солнца (в а.е.), - солнечная постоянная, - излучательная способность поверхности ядра в инфракрасном диапазоне частот, - постоянная Стефана-Больцмана, - 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 , , . Поэтому в литературе часто используется дополнительное предположение, что скорость истечения молекул равна скорости звука для ядер комет с малым содержанием пыли, то есть



|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

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



Результат решения системы уравнений (1)-(3) при = 0,63, = 0,37 и = 5/4 представлен на рис. 2 , где , и даны как функции расстояния от Солнца *d*. 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 |
| -14- |

### **2.3.2.** 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 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 H2O, то в результате химических реакций в потоке образуется одиннадцать главных компонент: H2O, OH, H, O, H2 , O2 , H3O+, H2O+, 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. 3a, б (рисунки взяты из [2]).



-15-

|  |
| --- |
|  |
| **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 |

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. 3а), для взаимодействия с солнечным ветром важно то обстоятельство, что газ становится ионизованным. Именно ионизованная компонента (как видно на рис. 3б, преобладающими ионами являются ионы H3O+) 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

-16-

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 комет 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.

### **2.3.3.** 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 *nn* (это могут быть молекулы H2O или CO2 , характеризующие состав данного кометного ядра) и ионов с концентрацией *ni* (как видно на рис. 3, это могут быть ионы H3O+). Скорость радиального расширения соответствующих газов будем обозначать и . Тогда при предположении о сферической симметрии течения (см. 2.3.1) и некоторых других дополнительных предположениях (в частности, при предположении = = = const) из законов сохранения числа частиц при расширении будем иметь



|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

Здесь - среднее время свободного пробега нейтральной молекулы для процесса ионизации, а - расстояние от кометного ядра. Индексом , как и в 2.3.1, 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 несущественны при ), 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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

-17-

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.

### **2.3.4.** 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.

Интересно, что нейтральная и ионизованная компоненты кометного газа по-разному воздействуют на солнечный ветер, о чем уже было упомянуто в 2.3.2. 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 [4]),. 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. 2.3.3) 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 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 2.3.3.

-18-

|  |
| --- |
|  |
| **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 |

Какова же роль нейтральных молекул, вытекающих из кометного ядра, в проблеме взаимодействия солнечного ветра с кометными атмосферами? Как уже было упомянуто в 2.3.3, 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 фотоионизуются 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.

-19-

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 [3].

### **2.3.5.** 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

Какие же явления предсказывала теория? Как было рассказано в 2.3.3, 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. 2.3.4), 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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (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* ~ 1030 с-1 для кометы Галлея

-20-

следовало, что головная ударная волна *BS* находится на расстоянии порядка 106 км от поверхности ядра, а контактный разрыв *CD* - на расстоянии порядка 104 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 c 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 наибольшего 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.

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

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.

-21-

|  |
| --- |
|  |
| **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 |

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 15h UT) совпал по величине и положению на выходной части траектории "Суиссеи" (на входном участке прибор, измерявший скорость, не работал).

-22-

|  |
| --- |
|  |
| **Рис. 7.** Теоретическое (сплошная линия) и экспериментально измеренное 8 марта 1986 года вдоль траектории "Суиссеи" (точки) изменение скорости солнечного ветра (UT - всемирное время) |

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, 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. Кроме того, ученые, приборы которых стояли на наиболее приблизившемся к комете Галлея аппарате "Джотто", утверждают, что они не обнаружили внутренней ударной волны *IS*.

Несмотря на имеющиеся количественные расхождения между теорией и экспериментом, можно 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.[1]

-23-

**2.4 ПЛАНЕТЫ**

Все планеты Солнечной системы постоянно подвергаются бомбардировке потоком заряженных частиц; наибольшей силы она, естественно, достигает на Меркурии, несколько меньше на Венере и Земле. Правда, на единицу площади их поверхности приходится примерно в 1 млн раз меньшая мощность солнечного ветра по сравнению с электромагнитной радиацией Солнца, зато он значительно эффективней в своем разрушающем воздействии на атмосферы планет.

Земля, согласно подсчетам К.Секи (K.Seki) и его коллег из Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) и Института космических и астронавтических исследований в Канагаве (Япония), каждую секунду теряет из атмосферы менее 3 кг вещества, в основном водорода (состав и точное количество улетучивающегося газа колеблется в зависимости от цикла солнечной активности). Это означает, что на полную потерю ЗемДей всей ее атмосферы должно уйти более 50 млрд лет, а для исчезновения и Мирового океана — еще 15 трлн лет! Между тем срок жизни. Солнца не превышает «каких-нибудь» 10 млрд лет.

Итоговая потеря вещества любой планетой зависит от баланса между его приходом и уходом. Чем сильней тяготение небесного тела, тем труднее материи «сбежать». Мелкие тела теряют вещество куда активнее, чем крупные. Особенно это заметно у кометы, идущей на сближение с Солнцем: хотя ее ядро в диаметре всего несколько километров, зато газовый хвост достигает огромной длины и виден иногда в ночное время даже невооруженным глазом. Но более детальные исследования показывают, что хвостов у кометы на самом деле два: один — диффузный и сравнительно короткий, образованный мелкими пылинками, второй — длинный, светящийся сине-зеленоватым цветом, четко структурированный, порожденный взаимодействием солнечного ветра с расширяющимися газами кометного происхождения, которые, подвергаясь ионизации, разгоняются до огромных скоростей.

Эти два хвоста иллюстрируют два разных процесса разрушения атмосферы — тепловое и нетепловое «бегство» плазмы. Близко к Солнцу у планет со слабым тяготением главный фактор потери вещества — тепловой, в условиях же мощного притяжения он основной роли обычно не играет (за исключением Меркурия, орбита которого лежит слишком близко к Солнцу). Таким образом, эрозию атмосферы у большинства планет вызывает нетепловой процесс. Подобно кометам, они тоже имеют вытянутые сильно структурированные плазменные хвосты, но эрозия идет здесь намного пассивнее, и хвосты для наземных оптических телескопов остаются невидимыми.

-24-

Разный характер процесса потери вещества планетами земного типа может объясняться различиями в составе, физических свойствах их атмосфер и особенностях их поверхности: Земля чуть ли не на две трети покрыта океаном; на поверхности Венеры царят высокие температуры при чрезвычайно плотной атмосфере; на Марсе, возможно, некогда существовал океан... Но если все планеты земного типа сложились из древнейшей солнечной туманности — одного и того же газово-пылевого облака (что почти несомненно с учетом их сходных масс и свойств ядра), то почему они в дальнейшем развивались неодинаково?

Частичный ответ дает различие в скорости эрозии их атмо- и гидросфер. Ближайший к Солнцу Меркурий практически лишен летучих веществ, которые давно изгнаны мощным тепловым излучением и потоком солнечного ветра. У Земли есть могучее магнитное поле, отклоняющее солнечный ветер задолго до его соприкосновения с атмосферой (та незначительная ее потеря, которую зафиксировал Секи с коллегами, лишь подтверждает надежность защитного свойства магнитного поля Земли). У Венеры и Марса своего магнитного поля почти нет, так что их взаимоотношение с солнечным ветром подобно наблюдаемому у комет. О том, как идет потеря вещества в атмосфере Венеры, пока известно очень мало, а у Марса, согласно последним измерениям, атмосфера теряет около 1 кг вещества в секунду; значит, примерно 4 млрд лет назад Красная планета могла быть покрыта слоем воды толщиной в несколько метров (при условии, что влага была распределена равномерно). Но это в случае, если процесс потери вещества шел так же, как сегодня, однако, судя по ряду признаков, древняя более плотная и влажная атмосфера теряла вещество приблизительно в 10 раз интенсивней. Магнитное поле у Марса когда-то было, но оно почти совсем исчезло еще несколько миллиардов лет назад, оставив планету на произвол солнечного ветра — в итоге моря там исчезли, а воздушная оболочка сильно поредела.

Среди специалистов давно идут споры о причинах столь радикальных различий между планетами земного типа. Попытка Секи и его коллег связать это с эрозией атмосфер и гидрбсфер за счет солнечного ветра — новый шаг в данной области. [6]

**3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Время подтвердило правоту слов А. Л. Чижевского о том, что Земля находится в "объятиях Солнца". Поток солнечного ветра обтекает Землю, формируя магнитосферу, а межпланетное магнитное поле играет роль ключа, открывающего ее и соединяющего геомагнитное поле с солнечным магнитным полем. Солнечная активность, как настроение человека, передается Земле через эти объятия. С технической точки зрения магнитосферу удобно представить себе как совокупность электрических токов, текущих по цепи, в которой различные области магнитосферы и ионосферы играют роль резисторов и конденсаторов. Так как движущееся

-25-

магнитное поле создает динамо-эффект, магнитное соединение магнитосферы с межпланетным магнитным полем, вмороженным в поток солнечного ветра, эквивалентно подключению к нашей схеме ЭДС, равной 50-100 кВ в спокойных условиях и возрастающей в несколько раз во время магнитных бурь. Нетрудно подсчитать, что средняя мощность магнитосферной цепи (суммарная сила всех токов близка к 10 миллионам ампер) составляет около 1012 ватт, что по порядку величины равно мощности всей мировой электроэнергетики. Таким образом, Земля фактически находится в середине исполинской электроустановки. А к каким последствиям приводит подобное соседство для человека и современной техники - это совсем другая тема. [5]

|  |  |
| --- | --- |
| ЛИТЕРАТУРА | |
| [1] | Баранов В.Б. Газодинамическое взаимодействие кометных атмосфер с солнечным ветром // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. No 1. |
| [2] | Marconi M., Mendis D. // Astrophys. 1982. Vol. 260. P. 386. |
| [3] | Biermann L., Brosowski B., Schmidt H.U. // Solar Phys. 1967. Vol. 1. P. 254. |
| [4] | Баранов В.Б., Краснобаев К.В. Гидродинамическая теория космической плазмы. М.: Наука, 1977, c.336 |
| [5] | http://nauka.relis.ru/05/0107/05107002.htm |
| [6] | Science. 2001. V.291. №5510. P.1909, 1939 (США)*.* |
| [7] | http://encyclopedia.astrologer.ru/cgi-bin/index?S/soln\_v.html |

-26-