

УДК 523.45

В. В. Прокофьева, В. П. Таращук, Ю. Т. Цап

Крымская астрофизическая обсерватория  
98409, п. Научный, Крым, Украина

### Взаимодействие вещества кометы Шумейкер—Леви 9 с магнитосферой Юпитера и образование натриевых облаков

*Взаимодействие вещества кометы Шумейкер—Леви 9 с внутренней магнитосферой Юпитера проявилось в образовании быстро движущихся облаков атомов натрия, которые были зарегистрированы в Крымской астрофизической обсерватории 20 июля 1994 г. перед падением на планету фрагментов Q. Атомы натрия освобождались из пылевых частиц комы фрагментов в результате распыления кометного вещества. Лавинообразное увеличение количества ионов натрия происходило вследствие столкновений его атомов с электронами, ускоренными нижнегибридными волнами. Ионы, попадающие в двунаправленные продольные электрические поля токовой трубки Ио—Юпитер, приобретали скорости до 1500 км/с и распространялись на большие объемы. Предполагается, что эмиссия D-линии натрия обусловлена процессом рекомбинации.*

*ВЗАЄМОДІЯ РЕЧОВИНИ КОМЕТИ ШУМЕЙКЕР—ЛЕВІ 9 З МАГНІТОСФЕРОЮ ЮПІТЕРА І УТВОРЕННЯ НАТРІЄВИХ ХМАР, Прокоф'єва В. В., Таращук В. П., Цап Ю. Т. — Взаємодія речовини комети Шумейкер — Леві 9 з внутрішньою магнітосферою Юпітера проявилась в утворенні хмар атомів натрію, які швидко рухались. Вони були зареєстровані в Кримській астрофізичній обсерваторії 20 липня 1994 р. перед падінням фрагментів Q на планету. Натрій вивільнявся з пилових частинок коми фрагментів в результаті розпорошення кометної речовини. Лавиноподібне збільшення кількості іонів натрію відбувалось внаслідок зіткнення його атомів з електронами, прискореними нижньогібридними хвилями. Іони, які потрапляли у двонаправлені поздовжні електричні поля токової трубки Іо—Юпітер, досягали швидкості 1500 км/с і розповсюджувались у великих об'ємах. Припускається, що емісія D-лінії натрію обумовлена процесом рекомбінації.*

*INTERACTION OF THE COMET SHOEMAKER—LEVY 9 MATTER WITH THE JOVIAN MAGNETOSPHERE AND FORMATION OF SODIUM CLOUDS, by Prokof'eva V. V., Tarashchuk V. P., Tsap Yu. T. — The interaction of the S-L9 comet matter with the inner Jovian magnetosphere gave rise to high-speed sodium clouds which were observed on July 20, 1994 at the*

*Crimean Astrophysical Observatory before the impacts of Q fragments. Sodium atoms are released from coma particles by means of the sputtering mechanism. The ionization of Na I atoms occurred due to collisions with electrons accelerated by low gibrid waves. Ions were accelerated to velocities of 1500 km/s in bi-directional electric fields in the Io-Jupiter current tube and propagated over large volumes. The radiation of Na I atoms in the D-line is assumed to be caused by recombinations.*

## ВВЕДЕНИЕ

В ожидании падения фрагментов кометы Шумейкер—Леви 9 на Юпитер теоретики разработали достаточно подробный сценарий этого грандиозного космического события. Многие явления, вызванные взаимодействием кометного вещества с магнитосферой, были предсказаны, но появление крупных быстро движущихся облаков ионизованных элементов оказалось неожиданным. В то же время вопросы взаимодействия кометной пыли с магнитосферой Юпитера представляют особый интерес [32].

Предсказание различных явлений, сопровождавших падение фрагментов кометы на Юпитер, позволило астрофизикам хорошо подготовиться к наблюдениям. В Крымской астрофизической обсерватории был выполнен длительный спектральный мониторинг Юпитера, в том числе и во время видимого в Европе падения фрагментов Q. 20 июля 1994 г. высокоскоростной мониторинг (временное разрешение 26 с) деталей на диске Юпитера в области спектра 570—760 нм со спектральным разрешением 2 нм проводился в течение четырех часов. Была обнаружена эмиссия D-линии натрия, состоящая из двух компонентов с величиной смещения каждого около 3 нм [12—14]. Средние за время наблюдений величины эквивалентных ширин коротковолнового и длинноволнового компонентов эмиссии оценены как 0.22 нм и 0.07 нм соответственно [15]. При прохождении фрагментами Q области магнитосферы, расположенной на расстоянии около трех радиусов Юпитера ( $3R$ ) от его центра, наблюдалось резкое увеличение этой эмиссии. Частотный анализ эквивалентных ширин выявил наличие квазипериодических колебаний в эмиссии натрия.

Рассмотрение процессов, происходящих при взаимодействии пылевой составляющей и более крупных частиц внутренней комы с энергичными частицами внутренней магнитосферы Юпитера показало, что атомы и ионы натрия освобождались с поверхности пылевых частиц комы разных размеров под действием механизма распыления, а сделанная нами оценка числа атомов свидетельствовала о том, что кометного натрия было достаточно для обеспечения наблюдавшейся энергии излучения D-линии [15].

Здесь рассмотрены процессы взаимодействия кометного вещества с плазмой внутренней магнитосферы Юпитера с целью выяснения механизмов, обеспечивающих ионизацию и ускорение большого числа атомов кометного натрия с последующим высвечиванием D-линии в результате рекомбинаций.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННЕЙ МАГНИТОСФЕРЫ ЮПИТЕРА И ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ФРАГМЕНТАМИ КОМЕТЫ ШУМЕЙКЕР—ЛЕВИ 9

Юпитер обладает протяженной магнитосферой, жестко связанной с планетой, имеющей тот же период вращения. По основным физическим свойствам она делится на внутреннюю (до  $20R$ ) и внешнюю (область  $(12—20)R$ , по мнению некоторых исследователей, является переходной). Характеристики внутренней магнитосферы стабильны и определяются собственным ди-

польным магнитным полем планеты. Она подобна магнитосфере Земли, но имеет в сто раз большие масштабы, а магнитный момент Юпитера в  $10^4$  раз превышает земной. Напряженность поля вблизи полюсов составляет 1.44 мТл в северном полушарии и 1.08 мТл в южном. Магнитный диполь наклонен на  $10^\circ$  к оси вращения Юпитера и смещен на  $0.1R$  от его центра [18, 21]. Считается, что магнитное поле генерируется динамо-механизмом внутри планеты.

Особенностью внутренней магнитосферы Юпитера является ее сильное взаимодействие со спутниками Юпитера, находящимися внутри радиационных поясов [28]. Они создают в магнитосфере возмущения и токовые структуры вследствие поглощения и инжекции частиц. На орбитах спутников Ио, Европа и Ганимед, расположенных на расстояниях 5.9, 9.4,  $14.99R$  от центра планеты, наблюдается уменьшение потоков электронов и протонов [2]. По измерениям, выполненным на КА «Пионер-11», Ио удаляет из плазмы до 99 % протонов с энергиями 1.2—2.1 МэВ, а аналогичные измерения на КА «Пионер-10» показали уменьшение потока таких же протонов в 30 раз. На силовых линиях, проходящих через спутники, наблюдается аномальная проводимость [10, 17], а в так называемом торе Ио обнаружена стоячая альвеновская волна [16]. В свою очередь, от спутника Ио к ионосфере Юпитера вдоль магнитных силовых линий распространяется бегущая альвеновская волна, которая возбуждает эмиссию  $H_3^+$ , наблюдаемую в ИК-диапазоне в полярной области планеты [27]. С поверхности Ио в магнитосферу поступает натрий, и его свечение наиболее ярко в области около Ио, имеющей форму банана с размерами:  $4R$  впереди спутника,  $1R$  позади и около  $2R$  в меридиональном направлении [11]. Среднее время жизни атомов натрия в облаке оценено в пределах от одного часа до нескольких десятков часов, доплеровские скорости не превышают 18 км/с. Более слабое переменное во времени свечение натрия наблюдалось также в плоскости орбит галлилеевых спутников на расстояниях до  $24R$  от планеты. Известно, что Ио является также источником большого количества ионов кислорода, а также серы и ее соединений во внутренней магнитосфере. Взаимодействие осколков кометы с плазменным тором Ио было зарегистрировано в виде небольших колебаний (до 20 %) светимости эмиссионных линий в торе [31].

Внимания заслуживает область магнитосферы, расположенная на расстояниях  $3R$  от центра Юпитера, где находились фрагменты Q во время наибольшей по величине эмиссии натрия. Потоки высокоэнергетичных электронов и протонов здесь достигают максимальных значений [2—4]. Кроме того, на расстояниях  $(3—6)R$  концентрация ионов серы, ее соединений и кислорода также максимальна, и именно здесь находится источник дециметрового радиоизлучения Юпитера [1]. Мониторинг этого излучения Юпитера, проведенный на VLA и WSRT, показал, что увеличение потока составило 43 % на  $\lambda = 6$  см и 10—13 % на  $\lambda = 70...90$  см. Радиоспектр оставался более жестким в течение недели после падения фрагментов. В Канаде дециметровое излучение наблюдалось на радиотелескопе DRAO [41] на длинах волн  $\lambda\lambda$  20 и 74 см, где было также зарегистрировано аналогичное увеличение потока при падении первых фрагментов. Дециметровое излучение Юпитера, достигнув максимума около 20 июля, в дальнейшем уменьшалось с характерным временем около 100 сут, причем уменьшение на длинных волнах началось на 2 сут раньше, чем на коротких, и достигло уровня ниже предимпактного. Источник излучения, обычно локализованный в области экватора планеты, расширился, захватив и более высокие широты. Фортов и др. [20] отмечают три возможных механизма, ответственные за такое поведение дециметрового излучения: ускорение имеющихся

релятивистских электронов, увеличение скорости питч-углового рассеяния и увеличение популяции релятивистских электронов.

Сразу после падения фрагмента К в северном полушарии КА ROSAT зарегистрировал рентгеновскую вспышку. Как считают Кларк и др. [26], она вызвана высокоэнергичными заряженными частицами. Серии наблюдений в далекой УФ-области спектра короче 210 нм, проведенные с телескопа Хаббла, показали эффекты появления «полярных сияний» в средних широтах Юпитера. В частности, 19 июля в северном полушарии были обнаружены две яркие дуги на широтах 51—52° и 56°. В южном полушарии им соответствовали более слабые свечения на магнитосопреженных широтах -54° и -52°, возбуждение которых шло через магнитную трубку.

Таким образом, приведенные данные показывают, что во время падения фрагментов кометы был зарегистрирован ряд явлений в магнитосфере планеты, свидетельствующих об активном взаимодействии с ней кометного вещества.

#### СВЯЗЬ СВЕЧЕНИЯ НАТРИЯ С ДВИЖЕНИЕМ ФРАГМЕНТОВ Q ЧЕРЕЗ ВНУТРЕННЮЮ МАГНИТОСФЕРУ ЮПИТЕРА

Фрагменты кометы Шумейкер—Леви 9, падающие на Юпитер под углом около 45° к его экватору, попадали в зону широт магнитного диполя от 35° до 55° вследствие его коротации с вращением планеты. Внутренние комы, гравитационно связанные с фрагментами и состоящие преимущественно из крупных частиц и осколков, свободно прошли во внутреннюю магнитосферу Юпитера. Долготы мест падения фрагментов Q1 и Q2 на Юпитере были оценены как 60 и 40° в системе III [19, 22]. Фрагменты Q были одними из самых ярких и обладали мощной комой [40]. По данным телескопа Хаббла [42] они состояли из семи осколков. При их падении на Юпитер наблюдалось не менее восьми взрывов в атмосфере планеты [14]. Можно предположить, что они были наименее прочными, и по мере их движения в магнитосфере и вхождения во все более плотные слои продолжалось их дальнейшее дробление, эрозия поверхностей, образование мелкой пыли и ее испарение. Следствием этих процессов явилось увеличение количества нейтрального газа и ионов кометного происхождения, находящихся во внутренней коме, окружавшей эти фрагменты. Развитая кома увеличивала область взаимодействия с магнитосферой планеты.

Обратим внимание, что 20 июля было зарегистрировано необычное мерцающее УФ-свечение в южной полярной области [26]. Яркость его была высокой с 14<sup>h</sup>10<sup>m</sup> до 14<sup>h</sup>17<sup>m</sup> UT, а через несколько минут уменьшилась, оставаясь таковой в интервале времени 14<sup>h</sup>19<sup>m</sup>—14<sup>h</sup>26<sup>m</sup> UT. Затем снова усилилась в течение 5 мин, несколько превысив первоначальный уровень, и не изменяла этого уровня в интервале времени 14<sup>h</sup>29<sup>m</sup>—14<sup>h</sup>34<sup>m</sup> UT, но через 10 мин снова уменьшилась на порядок и оставалась таковой в интервале 14<sup>h</sup>41<sup>m</sup>—14<sup>h</sup>46<sup>m</sup> UT. Во время появления данного мерцающего свечения фрагменты Q, находились на расстоянии около восьми радиусов планеты от ее центра. Прэнгле и др. [36] показали, что проекция положения этих фрагментов, сделанная по магнитным трубкам, как раз попадала в то место южной полярной области, где и наблюдалось мерцающее свечение. Этим они доказали фактическую связь мерцающего полярного сияния с фрагментами Q. Поэтому нет сомнения, что переменное по яркости свечение было вызвано взаимодействием фрагментов Q с магнитосферной плазмой.

Схема, приведенная на рис. 1, показывает расположение токовых трубок Ио и Европы [9] и направление траектории фрагментов Q. По-ви-

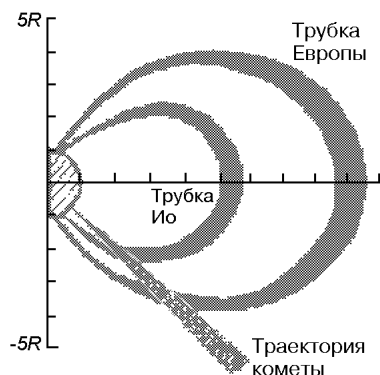


Рис. 1. Схема расположения токовых трубок в плоскости магнитного меридиана Юпитера, образованных во внутренней магнитосфере планеты при движении спутников Ио и Европа, построенная по данным КА «Пионер-10». По осям отложено расстояние от центра Юпитера в его радиусах  $R$

димому, момент пересечения фрагментами токовой трубки Европы был близок к моменту появления мерцающего полярного сияния, о котором упоминалось выше. Это позволяет сделать заключение, что при пересечении фрагментами, окруженными развитой комой, токовой трубки могут наблюдаться аномальные явления, связанные с взаимодействием кометного вещества с токовыми структурами. Переменность яркости полярного сияния во времени свидетельствует, по нашему мнению, о возникновении в плазме магнитосферы быстро протекающих процессов, обусловленных нестационарными физическими условиями, вызванными движением кометного вещества.

**ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМИССИИ НАТРИЯ**

Рассмотрим подробно временной интервал наблюдений с 18.0<sup>h</sup> до 19.17<sup>h</sup> UT, в течение которого эквивалентные ширины синего компонента эмиссии натрия были максимальны (см. рис. 2). В начале этого интервала (18.0<sup>h</sup>) фрагмент Q2, идущий впереди, находился на расстоянии 3.2R от центра планеты, а когда яркие вспышки закончились (в момент 19.17<sup>h</sup>), фрагмент Q1 находился на расстоянии примерно 2.7R. Поэтому область, находящуюся на расстоянии около 3R, можно считать в данном случае особой, поскольку при прохождении ее кометным веществом эмиссия натрия усиливалась.

Проследим изменения эквивалентных ширин эмиссии натрия более детально. По характеру изменений эквивалентных ширин можно выделить

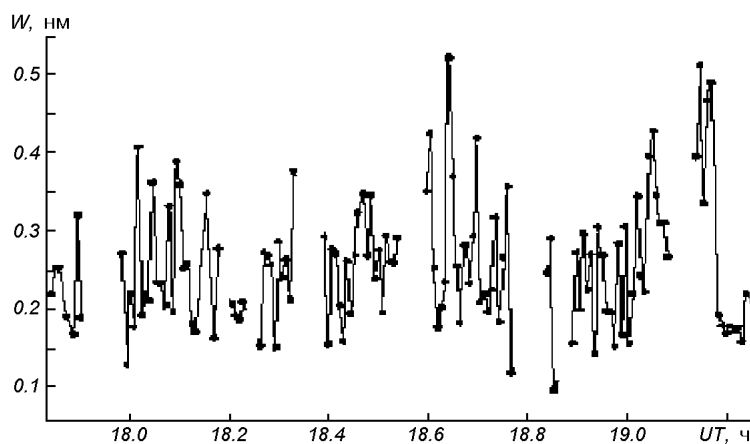


Рис. 2. Зависимость от времени эквивалентной ширины коротковолнового компонента эмиссии натрия, наблюдавшейся в спектре Юпитера 20 июля 1994 г. во время наибольшей вспышечной активности.

два интервала 18.0—18.75<sup>h</sup> и 18.85—19.17<sup>h</sup>. В первом интервале времени 18.0—18.75<sup>h</sup> средний уровень значений эквивалентной ширины оставался примерно постоянным. На этом фоне наблюдался ряд небольших вспышек, однако около 18.6<sup>h</sup> видно увеличение эквивалентной ширины до 0.42—0.53 нм. В начале второго интервала времени 18.85—19.17<sup>h</sup> происходили колебания значений эквивалентной ширины, имеющие примерно одинаковую амплитуду, а с 19.0<sup>h</sup> наблюдался ряд быстро возрастающих по амплитуде увеличений эквивалентной ширины вспышечного характера. После 19.17<sup>h</sup> эквивалентная ширина резко уменьшилась до величины 0.17 нм и потом оставалась на этом уровне.

Можно предположить, что две серии вспышек, представленных на рис. 2, вызваны взаимодействием вещества внутренних ком, окружающих фрагменты Q2 и Q1, с участком токовой трубки Ио—Юпитер. Отметим, что спутник Ио в это время находился на долготах, близких к долготе фрагментов Q. Размер фрагмента Q1 был больше, поэтому он вызвал более мощные вспышки излучения натрия.

Проведенное нами ранее исследование временных характеристик эмиссии натрия показало наличие характерного времени переменности 1 мин. В то же время известно, что движение спутника Ио поперек магнитных силовых линий внутренней магнитосферы Юпитера генерирует альвеновскую волну, имеющую такое же характерное время [30]. Это позволяет нам сделать вывод о связи наблюдавшегося нами свечения натрия с процессами, происходящими в токовой трубке Ио—Юпитер.

Таким образом, два наблюдательных фактора свидетельствуют о возникновении свечения натрия при пересечении фрагментами Q1 и Q2 участка токовой трубки Ио—Юпитер:

а) связь моментов вспышек натрия с временем прохождения этими фрагментами участков магнитосферы, расположенных на расстоянии около  $3R$  от центра планеты, где они и их комы пересекали токовую трубку Ио—Юпитер.

б) совпадение характерных времен переменности эмиссии натрия и альвеновских волн, возникающих при движении Ио во внутренней магнитосфере Юпитера.

#### МЕХАНИЗМЫ ИОНИЗАЦИИ, УСКОРЕНИЯ И РЕКОМБИНАЦИИ ИОНОВ НАТРИЯ

Область внутренней магнитосферы, где происходило свечение натрия, является плазменной средой с концентрацией  $n_0 < 10^8$  см<sup>-3</sup> и состоящей в основном из низкоэнергичных частиц ( $E < 1$  эВ), в которой доминируют коллективные взаимодействия [29]. Согласно полученным результатам в ходе взаимодействия фрагментов Q с магнитосферой атомы натрия приобрели направленные скорости до 1500 км/с. По нашему мнению, это могло быть вызвано тем, что при прохождении комы и осколков кометы через магнитосферу имели место эффективные процессы освобождения атомов натрия из кометного вещества [15], ионизации атомов натрия, ускорения образовавшихся ионов и нейтрализации. Рассмотрим предлагаемый сценарий более детально, акцентируя внимание на физической сущности привлекаемых механизмов.

Можно предположить, что при движении заряженных частиц кометного вещества внутри магнитосферы возникали плазменные кинетические неустойчивости, основанные на эффективном резонансном взаимодействии между волнами и заряженными частицами ввиду неравновесности функций распределения ионов и электронов. В частности, мог иметь место процесс аномальной критической ионизации [5, 23, 25], при котором происходит

бесстолкновительная передача энергии от ионизованных атомов электронам, обеспечивающим лавинообразную ионизацию. Для реализации этого процесса необходимо, чтобы относительная направленная скорость нейтрального газа и замагниченной плазмы превысила некоторое критическое значение  $v_c$ :

$$u > v_c = \sqrt{E_i / (mK)}, \quad (1)$$

где  $E_i$  — энергия ионизации атома с массой  $m$ ,  $K$  — коэффициент передачи, т. е. доля кинетической энергии ионизируемого атома, передаваемая ионизирующим электронам. Принимая  $K = 0.1$  [5],  $m_{\text{Na}} = 3.6 \cdot 10^{-23}$  г и  $E_i = 5.1$  эВ, из (1) находим критическую скорость  $v_c \approx 21$  км/с, которая меньше направленной скорости кометного вещества относительно силовых линий магнитосферы  $V_k = 40$  км/с на расстоянии около  $3R$  от центра планеты, т. е. в интересующем нас случае явление аномальной критической ионизации представляется вполне возможным. Однако неравенство (1) является лишь необходимым условием возникновения критической ионизации. Достаточное условие состоит в том, что длина свободного пробега для Na II не может превышать характерный размер области взаимодействия  $L$ , т. е.

$$L > 1 / (n\sigma), \quad (2)$$

где  $n$  — концентрация электронов,  $\sigma$  — эффективное сечение ионизации электронным ударом. Принимая  $L \approx 10^9$  см,  $\sigma \approx 10^{-15}$  см<sup>2</sup>, из (2) находим  $n \geq 10^6$  см<sup>-3</sup>, что также не противоречит максимальным оценкам плотности в магнитосфере Юпитера на расстояниях от  $0.5R$  до  $3.5R$  [29]. Кроме того, следует также учесть увеличение плотности плазмы в результате распыления кометного вещества.

Ускорение электронов могли обеспечить электростатические волны нижегибридной частоты,  $\omega_{\text{ни}} \ll \omega \ll \omega_{\text{пе}}$ , дисперсионное соотношение для которых имеет вид

$$\omega = \frac{\omega_{\text{пи}}}{\sqrt{1 + \omega_{\text{пе}}^2 / \omega_{\text{He}}^2}} \left( 1 + \frac{m_i k_{\parallel}^2}{m_e k^2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\omega_{\text{пи}}$  и  $\omega_{\text{пе}}$  — плазменная частота ионов и электронов,  $\omega_{\text{He}}$  — гирочастота электронов,  $k_{\parallel}$  — компонент волнового вектора, параллельный магнитному полю. Данные волновые моды могут генерироваться направленным потоком ионов кометного вещества, двигающихся в направлении, перпендикулярном к магнитному полю [5]. Их важная особенность состоит в том, что поскольку  $k_{\parallel} / k_{\perp} \ll 1$ , то параллельная составляющая фазовой скорости волны

$$v_{\text{г}\parallel} = \omega / k_{\parallel} > v_{\text{г}\perp} = \omega / k_{\perp}, \quad (4)$$

где  $k_{\perp}$  — перпендикулярная составляющая волнового вектора,  $v_{\text{г}\perp}$  — перпендикулярная составляющая фазовой скорости. Поэтому они могут сравнительно легко возбуждаться посредством поперечного черенковского резонанса ( $\omega_{\perp} \approx k_{\perp} v_{\perp}$ ) и ускорять электроны при возникновении продольного резонанса ( $\omega_{\parallel} \approx k_{\parallel} v_{\parallel}$ ), где скорость заряженных частиц  $v = (v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2)^{1/2}$ . Причем согласно (3) групповая скорость нижегибридных волн в направлении магнитного поля

$$V_{\text{гр}\parallel} = (k_{\perp} / k_{\parallel}) V_{\text{гр}\perp}, \quad (5)$$

т. е. поток волновой энергии распространяется главным образом вдоль магнитного поля. Это указывает на возможность эффективной передачи

энергии от ионов к электронам, что должно приводить к быстрому ускорению последних и ионизации атомов электронным ударом.

Отметим, что рассмотренные выше физические процессы достаточно широко распространены в космосе. Подобные явления наблюдаются, например, при взаимодействии частиц солнечного ветра с кометным веществом [35]. В частности, КА ВЕГА, пролетая через комету Галлея, регистрировал нижнегибридные волны и сверхтепловые электроны с энергией до нескольких кэВ [33]. Эффекты критической ионизации были обнаружены КА «Вояджер-1, -2» в плазменном торе Ио.

Максимальная интенсивность свечения натрия наблюдалась, когда фрагменты Q2 и Q1 проходили область, расположенную на расстоянии около  $3R$ , отстоящую в это время на  $50^\circ$  по долготе от Ио, поэтому комы фрагментов пересекали токовую трубку Ио—Юпитер, в которой сила электрического тока достигает  $3 \cdot 10^6$  А [24]. Происхождение его связано с тем, что в результате движения Ио через магнитосферу Юпитера в ее ионосфере индуцируется электрическое поле

$$E = v_{\text{Io}} \times \mathbf{B} / c, \quad (6)$$

где  $v_{\text{Io}}$  — скорость спутника относительно магнитосферы,  $\mathbf{B}$  — магнитное поле Юпитера.

При этом возбуждается бегущая альвеновская волна, распространяющаяся в направлении северного и южного полюсов планеты с частотой [34]

$$\omega \approx v_{\text{Io}} / d, \quad (7)$$

где  $d$  — диаметр Ио, которая генерирует бинаправленное продольное электрическое поле  $E_{\parallel}$  и электрический ток  $J_{\parallel}$ . В качестве достаточно хорошей аналогии данного явления может служить процесс последовательного пере замыкания линий передачи при перемещении источника тока.

Мы полагаем, что ускорение вновь образовавшихся ионов натрия до энергий в несколько десятков кэВ обеспечивали электрические поля в силовой трубке цепи Ио—Юпитер. В пользу данного предположения свидетельствует тот факт, что для  $v_{\text{Io}} = 57$  км/с характерное время протекания тока  $\tau_p \sim d/v_{\text{Io}} \approx 60$  с соответствует обнаруженному нами времени переменности свечения атомов натрия.

Резкое изменение потенциала в силовой трубке электрической цепи Ио—Юпитер, ответственное за ускорение ионов натрия, могло произойти из-за увеличения активного сопротивления плазмы, обусловленного столкновениями нейтральных частиц с ионами и возникновения нескомпенсированной силы Ампера. Последнее можно объяснить тем, что ввиду распространения альвеновской волны, а также процесса аномальной критической ионизации, плотность тока в трубке Ио—Юпитер быстро увеличивалась, обуславливая увеличение силы Ампера, пропорциональной  $J_{\parallel} B_{\perp}$ , где  $B_{\perp}$  — магнитное поле, создаваемое продольным током  $J_{\parallel}$ . При этом напряженность электрического поля в системе координат, движущейся с плазмой  $E_{\parallel}^*$ , можно представить следующим образом [8]:

$$E_{\parallel}^* = \frac{F^2 B^2}{c^2 n_a m_a \nu_{\text{ai}}} j_{\parallel}, \quad (8)$$

где  $F = n_a m_a / (n_a m_a + n_i m_i)$  — доля нейтрального компонента,  $\nu_{\text{ai}}$  — эффективная частота столкновений ионов с атомами,  $n_a$ ,  $n_i$  — концентрация нейтральных атомов и ионов водорода. Принимая  $F = 0.1$ ,  $B_{\perp} = 10$  мкТл,  $J_{\parallel} = 3 \cdot 10^{-10}$  А/см<sup>2</sup>,  $n_a = 10^6$  см<sup>-3</sup>,  $m_a = 10^{-24}$  г,  $\nu_{\text{ai}} = 0.1$  с, находим  $E_{\parallel}^* \approx$



$\approx 3 \cdot 10^{-4}$  В/см. Значит, максимально возможная энергия, приобретенная однократно ионизованным атомом,  $W = eE_{\parallel}^* L \approx 300$  кэВ, что вполне достаточно для объяснения наблюдаемых значений скоростей натрия. Ускорение ионов натрия электрическим полем альвеновской волны носит бинаправленный характер, что должно приводить к наблюдаемому доплеровскому смещению линий его атомов в синюю и красную стороны. Под действием электрического поля будут ускоряться заряженные частицы всех сортов. Поэтому следует ожидать усиления синхротронного излучения, а также поярчаний полярных областей, вызванных энергичными электронами, что находится в согласии с наблюдениями. Процессы рекомбинации и перезарядки могли приводить к образованию нейтральных атомов натрия. Однако коэффициент рекомбинации электронов и легких ионов с энергиями в несколько десятков кэВ чрезвычайно мал, в то время как эффективное сечение нерезонансной перезарядки для заданных значений энергии достигает величины порядка  $10^{-15}$  см<sup>2</sup> [6], что позволяет обеспечить требуемую скорость нейтрализации. Более детальное рассмотрение данного вопроса затруднительно ввиду сложности и неоднозначности данного явления в условиях неравновесной плазмы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектральные наблюдения, проведенные 20 июля 1994 г. перед падением на Юпитер фрагментов Q кометы Шумейкер — Леви 9, позволили впервые обнаружить в магнитосфере планеты высокоскоростные облака атомов натрия, который образовывался в результате освобождения его атомов из кометного вещества. По нашему мнению, прохождение фрагментов Q, окруженных комой, через участок токовой трубки Ио—Юпитер на расстоянии около  $3R$  от центра планеты привело к ионизации атомов натрия электронным ударом в результате турбулизации плазмы, а образовавшиеся ионы ускорялись электрическими полями. В различных частях трубки электрические поля направлены в противоположные стороны, поэтому ускоренные и в дальнейшем нейтрализованные вследствие механизма перезарядки ионы натрия двигались в противоположных направлениях со скоростями, порядка 1500 км/с. Альвеновская волна, распространяющаяся в токовой трубке с периодом, близким к 1 мин, модулировала интенсивность излучения атомов натрия с таким же характерным временем.

Укажем также, что обнаруженное нами явление, по-видимому, обычно для взаимодействия магнитосферной плазмы небесных тел и облаков пыли. Это подтверждает факт регистрации Гуляевым и Щегловым [7] высокоскоростных облаков ионизованного кальция в области пылевой составляющей солнечной короны.

В заключение необходимо отметить, что исследуемые явления взаимодействия магнитосферы и кометного вещества достаточно сложны и мало изучены. Поэтому вследствие отсутствия многих необходимых для точных расчетов физических параметров плазмы, проведенный анализ носит в значительной степени качественный характер.

Мы благодарны Ю. Д. Медведеву за предоставленные результаты расчетов положений и скоростей осколков фрагментов кометы.

Настоящие исследования поддержаны фондом фундаментальных исследований Украины (договор Ф4/172-97 от 1 апреля 1997 г).

1. Акуна М. Х., Несс Н. Ф. Результаты, полученные с помощью феррозондового магнитометра на борту КА Пионер 11 // Юпитер III. Магнитосфера и радиационные пояса / Под

- ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1979.—С. 248—266.
2. *Алексеев И. И.* Магнитосфера Юпитера. — М.: ВИНТИ, 1976.—С. 176—191.—(Итоги науки и техники. Сер. Исследования космического пространства; Т. 7).
  3. *Бердж Дж. Л. и Галкис Дж.* Наземные радиоастрономические наблюдения Юпитера в диапазоне от миллиметровых до метровых волн // Юпитер III. Магнитосфера и радиационные пояса / Под ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1979.—С. 7—90.
  4. *Ван Аллен Дж. А.* Частицы высокой энергии в магнитосфере Юпитера // Юпитер III. Магнитосфера и радиационные пояса / Под ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1979.—С. 356—393.
  5. *Галеев А. А., Хабибрахманов И. Х.* Явления критической ионизационной скорости в астрофизике. — М. ВИНТИ, 1988.—С. 56—142.—(Итоги науки и техники. Исследования космического пространства. Плазменные процессы в солнечной системе—II / Под ред. Р. З. Сагдеева, Т. 27).
  6. *Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров С. А.* Основы физики плазмы. — М.: Атомиздат, 1977.—384 с.
  7. *Гуляев Р. А., Щеглов П. В.* Эмиссионные образования в F короне // Докл. Академии Наук РАН.—1999.—366.—С. 199—201.
  8. *Зайцев В. В. и Шапошников В. Е.* О механизме ускорения и нагрева заряженных частиц в ионосфере Юпитера // Письма в Астрон. журн.—1992.—18, № 4.—С. 380—390.
  9. *Итрилигатор Д. Ш. и Вольф Дж. Х.* Результаты плазменного эксперимента на КА «Пионер-10» // Юпитер III. Магнитосфера и радиационные пояса / Под ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1979.—С. 267—288.
  10. *Мак Дональд Ф. Б., Трейнор Дж. Г.* Наблюдения энергичных юпитерианских электронов и протонов // Юпитер III. Магнитосфера и радиационные пояса / Под ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1979.—С. 395—424.
  11. *Пилчер К. Б., Стробел Д. Ф.* Эмиссия от нейтральных частиц и ионов в магнитосфере Юпитера // Спутники Юпитера / Под ред. Д. Моррисона. — М.: Мир, 1986.—Т. 3.—С. 197.
  12. *Прокофьева В. В., Таращук В. П., Лютый В. М., Метлов В. Г.* Дезинтеграция фрагментов Q1 и Q2 кометы Шумейкер—Леви 9 во время падения на Юпитер // Письма в Астрон. журн.—1996.—22, № 11.—С. 858—867.
  13. *Прокофьева В. В. и Таращук В. П.* Спектральная переменность излучения в местах падения фрагментов кометы Шумейкер—Леви 9 на Юпитер (16—22 июля 1996 г.) // Астрон. вестник.—1996.—30, № 2.—С. 140—149.
  14. *Прокофьева В. В. и Таращук В. П.* Спектральный мониторинг мест падения фрагментов кометы Шумейкер—Леви 9 на Юпитер // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 5.—С. 82—93.
  15. *Прокофьева В. В., Таращук В. П., Цап Ю. Т.* Свечение натрия кометы Шумейкер—Леви 9 в магнитосфере Юпитера // Письма в Астрон. журн.—2002.—28, № 2.
  16. *Саливен Д. Д., Сиско Дж. Д.* Наблюдения плазменного тора Ио // Спутники Юпитера / Под ред. Д. Моррисона. — М.: Мир, 1986.—Т. 3.—С. 238—263.
  17. *Скарф Ф. Л.* Плазменные процессы в магнитосфере Юпитера // Юпитер III. Магнитосфера и радиационные пояса / Под ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1979.—С. 289—320.
  18. *Смит Е. Дж., Дэвис А., Джонс Д. Е.* Магнитное поле Юпитера и его магнитосфера // Юпитер III. Магнитосфера и радиационные пояса / Ред. Т. Герельс. — М.: Мир, 1979.—С. 202—247.
  19. *Тейфель В. Г.* Физические характеристики планет-гигантов. Справочник-обзор. — Алма-Ата: Наука, 1971.—175 с.
  20. *Фортон В. Е., Гнедин Ю. Н., Иванов М. Ф. и др.* Столкновение кометы Шумейкер — Леви 9 с Юпитером что мы увидели // Успехи физ. наук.—1996.—166, № 4.—С. 390—422.
  21. *Хайд Р., Стэннард Д.* Магнитное поле Юпитера // Юпитер III. Магнитосфера и радиационные пояса / Под ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1979.—С. 187.
  22. *Черных Н. С., Румянцев В. В., Черных Л. И., Журавлева Л. В.* Визуальные наблюдения следов падений кометы Шумейкер—Леви // Астрон. вестник.—1996.—30, № 2.—С. 153.
  23. *Шаширо В. Д., Шевченко В. И.* Плазменная турбулентность в космосе. — М.: ВИНТИ, 1987.—С. 235—319.—(Итоги науки и техники. Сер. Астрономия. Астрофизика и космическая физика / Под ред. Р. А. Сюняева; Т. 32).
  24. *Acuna M. H., Neubauer F. M., Ness N. F.* Standing Alfvén wave current system at Io: Voyager 1 observations 1981 // J. Geophys. Res.—1981.—86.—P. 8513—8521.
  25. *Alfvén H. and Wilcox J. M.* On the origin of the satellites and the planets // Astrophys. J.—1962.—136, N 3.—P. 1016—1022.
  26. *Clarke J. T., Prangle, R., Ballster G. E., et al.* HST far-ultraviolet imaging of Jupiter during the impacts of comet SL-9 // Science.—1995.—267, N 5202.—P. 1302—1307.

27. Connerney J. E. P., Baron R., Satoh T., Owen T. Images of excited  $H_3^+$  at the foot of the Io flux tube in Jupiter's atmosphere // *Science*.—1993.—262, N 5136.—P. 1035—1038.
28. Drell S. D., Foley H. M., Rudenman M. A. Dray and propulsion of large satellites in the ionosphere: an Alfvén propulsion engine in space // *J. Geophys. Res.*—1965.—70, N 13.—P. 3131—3145.
29. Gledhill J. A. Magnetosphere of Jupiter // *Nature*.—1967.—214, N 5084.—P. 155—156.
30. Goertz C. K., Boswell R. W. Magnetosphere-ionosphere coupling // *J. Geophys. Res.*—1979.—84.—P. 7239—7246.
31. Hall D. T., Gladstone G. R., Herbert F., et al. Io torus EUV emission during the comet S—L/9 impacts // *Geophys. Res. Lett.*—1995.—22.—P. 3441—3448.
32. Ip W.-H. Dust—magnetosphere interaction at comet Shoemaker—Levy 9 // *ESO Conf. and Proc. N 52. Proc. European SL—9/Jupiter Workshop.*, Febr. 13—15 1995 / Eds R. West, H Bohnhardt. — Germany: ESO Headquarters Garching bei München, 1995.—P. 57—62.
33. Klimov S., Savin S., Aleksevich Ya., et al. Extremely-low-frequency plasma waves in the environment of comet Halley // *Nature*.—1986.—321, N 6067.—P. 292—293.
34. Marshall L., Libby W. F. Stimulation of Jupiter's radio emission by Io // *Nature*.—1967.—214, N 5084.—P. 126—128.
35. Múbius E., Papadopoulos K., Piel K. On the turbulent heating and the threshold condition in the critical ionization velocity interaction // *Planet. and Space Sci.* 1987.—35, N 3.—P. 345—352.
36. Prangle R., Engle I. M., Clarke J. T., et al. Auroral signature of comet Shoemaker—Levy 9 in the Jovian magnetosphere // *Science*.—1995.—267, N 5202.—P. 1317—1320.
37. Prokof'eva V. V., Tarashchuk V. P., Churyumov K. I. On spectral peculiarities recorded by fast monitoring during the collision of comet SL—9 with Jupiter // *Astron and Astrophys. Transactions*.—1997.—13.—P. 199—204.
38. Sekanina Z. The splitting of the nucleus of Comet Shoemaker Levy 9 // *ESO Conf. and Proc. N 52. Proc. European SL—9/Jupiter Workshop.*, Febr. 13—15 1995 / Eds R. West, H Bohnhardt. — Germany: ESO Headquarters Garching bei München, 1995.—P. 43—55.
39. Sekanina Z. Nuclei of comet Shoemaker—Levy 9 on images taken with the Hubble Space Telescope // *ESO Conf. and Proc. N 52. Proc. European SL—9/Jupiter Workshop.*, Febr. 13—15 1995 / Eds R. West, H Bohnhardt. — Germany: ESO Headquarters Garching bei München, 1995.—P. 29—35.
40. Stüve J. A., Schulz R., A'Hearn F. M. NTT Observations of Shoemaker—Levy 9 // *European SL—9/Jupiter workshop. ESO Conference and workshop proceedings N 52.*—1995.—P. 17—22.
41. Sukumar S. Changes in Jupiter's synchrotron radiation due to the impact of Comet Shoemaker—Levy 9 // *Astron. J.*—1995.—110, N 3.—P. 1397—1404.
42. Weaver H. A., A'Hearn M. F., Arpigni C., et al. The Hubble Space Telescope (HST) observing campaign on comet Shoemaker—Levy 9 // *Science*.—1995.—267, N 5202.—P. 1282—1287.

Поступила в редакцию 27.09.01