



УДК 519.6

Л. В. Зинин, А. А. Шарамет, А. Ю. Васильева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОЙ ТЕНИ ЗА ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫМ МИКРОСПУТНИКОМ В КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

48

Приводятся результаты моделирования формирования ионной тени в тепловой ионосферной плазме, состоящей из ионов кислорода и электронов, за заряженным микроспутником. Для моделирования использовался метод молекулярной динамики. Показано, что за время порядка $6 \cdot 10^{-5}$ с ионная тень с низкой ионной концентрацией практически сформирована.

Results of modeling the formation of ion shadows in a thermal ionospheric plasma consisting of oxygen ions and electrons behind a charged microsatellite are presented. The molecular dynamics method was used for modeling. It is shown that in a time of the order of $6 \cdot 10^{-5}$ s an ionic shadow with a low ion concentration is practically formed.

Ключевые слова: математическое моделирование, тепловая плазма, метод молекулярной динамики, заряженный спутник, ионная тень.

Key words: mathematical modeling, thermal plasma, molecular dynamics method, charged satellite, ion shadow.

Введение

Влияние заряда спутника на масс-спектрометрические измерения тепловой плазмы исследуется в течение долгого времени. Особенные трудности вызывает случай, когда радиус Дебая сравним с геометрическими размерами спутника, а также когда его поверхность имеет сложную форму: как правило, это штанги и солнечные батареи. Отметим важность анализа ионных траекторий, что необходимо для некоторых моделей масс-спектрометров [1–3].

Существование ионной тени за заряженным спутником известно еще со времен опубликования классической теоретической работы [4]. Вместе с тем процессы ее формирования, их временные характеристики еще недостаточно исследованы. Здесь на основе модели, описанной в статьях [5–8], приводятся результаты моделирования формирования ионной тени в кислородной плазме для одного варианта внешних (скорости спутника относительно тепловой плазмы и его потенциала) и внутренних (температуры и состава тепловой плазмы) условий.

1. Постановка задачи

Расчеты, приведенные в данной работе, соответствуют условиям, указанным в нашей статье [8]. Приведем их.

Модельная область представляет из себя куб с ребром 1 метр. В центре этого куба расположен микроспутник диаметром 10 см.



Относительная скорость спутника и плазмы составляет 10 км в секунду и направлена вдоль горизонтальной оси X .

Тепловая плазма состоит из однозарядных ионов кислорода и электронов. Общее число частиц каждого типа в расчетной области $2 \cdot 10^7$, что соответствует концентрации 20 см^{-3} .

В начальный момент времени все частицы распределены равномерно внутри рабочей области, а их скорости подчиняются закону распределения Максвелла с температурой 5000 К.

Заряд спутника составляет +5 В, что типично для высот магнитосферы на освещенных участках.

Временной шаг численного моделирования составляет 10^{-8} с, что соответствует пространственному масштабу примерно 5 мм для электронов, чьи тепловые скорости порядка 500 км/с.

Электроны, попавшие на поверхность спутника поглощаются, а электрический потенциал микроспутника поддерживается инжектируемыми фотоэлектронами.

Ионы кислорода и электроны, вылетевшие из расчетной области, возвращаются обратно с невозмущенными «максвелловскими» скоростями вследствие того, что на передней и боковых границах расчетной области должно поддерживаться условие квазинейтральности, соответствующее невозмущенным условиям [8].

2. Формирование ионной тени

Рассмотрим процесс формирования ионной тени. На рисунке 1 показаны ионы кислорода (один ион на одну точку), пересекшие плоскость XOZ за два последних временных шага для времени $t = 2 \cdot 10^{-6}$ с с момента начала моделирования (что соответствует 200 временным шагам по 10^{-8} с). Хорошо видно, что процесс формирования ионной тени уже начался и его пространственные размеры не превышают 3 см.

На рисунке 2 представлено пространственное распределение ионов кислорода через 1000 временных шагов, то есть через 10^{-5} с. Характерные размеры ионной тени составляют около 15 см, что уже больше диаметра микроспутника.

Дальнейшая эволюция ионной тени приведена на рисунках 3–6.

Так, на рисунке 3 продольный размер ионной тени составляет около 25 см, а через $t = 3 \cdot 10^{-5}$ уже 35 см (рис. 4).

Поперечные размеры ионной тени немного увеличиваются и для этого времени составляют около 20 см, что в два раза больше диаметра микроспутника.

Рисунки 5 и 6 демонстрируют финальную часть формирования ионной тени.

Так, через $4 \cdot 10^{-5}$ с ее длина порядка 40 см, а еще через 1000 временных шагов простирается до конца области моделирования, и в дальнейшем ее характерные размеры практически не изменяются и подержены только статистическим флуктуациям.

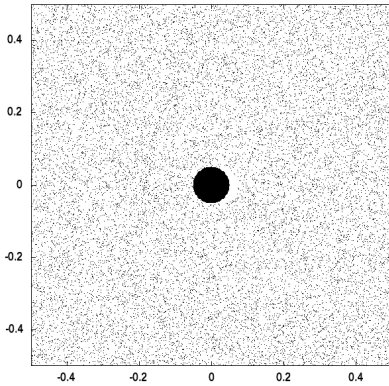


Рис. 1. Распределение ионов кислорода в плоскости XOZ. Время после начала моделирования $t = 2 \cdot 10^{-6}$ с

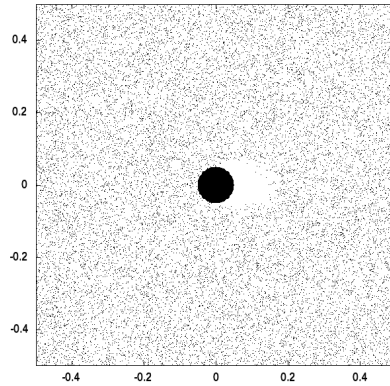


Рис. 2. То же, что и на рисунке 1. Время $t = 1 \cdot 10^{-5}$ с

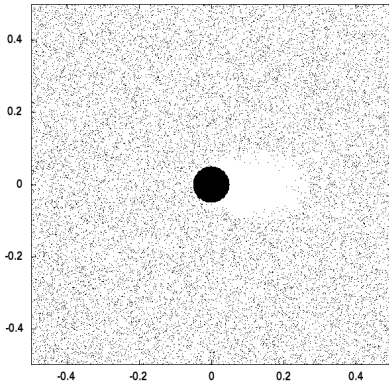


Рис. 3. То же, что и на рисунке 1. Время $t = 2 \cdot 10^{-5}$ с

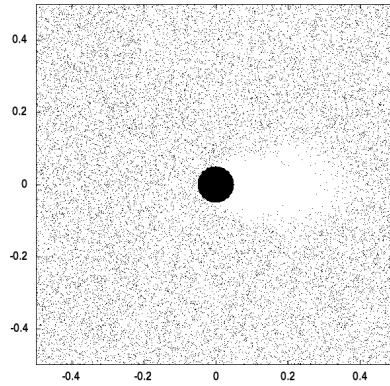


Рис. 4. То же, что и на рисунке 1. Время $t = 3 \cdot 10^{-5}$ с

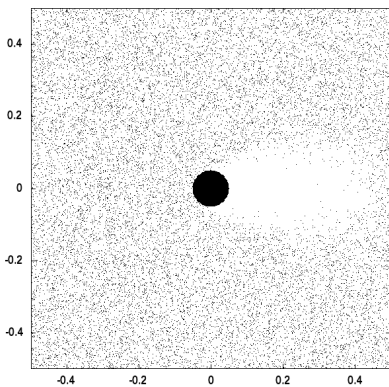


Рис. 5. То же, что и на рисунке 1. Время $t = 4 \cdot 10^{-5}$ с

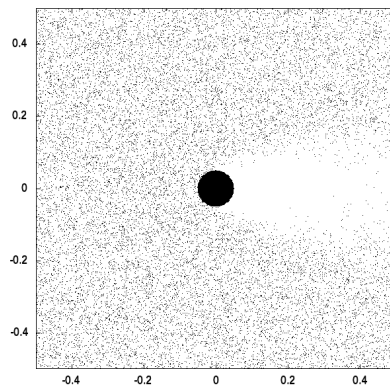


Рис. 6. То же, что и на рисунке 1. Время $t = 6 \cdot 10^{-5}$ с



Параметры моделирования соответствуют радиусу Дебая ~ 1 м и плазменной частоте $4 \cdot 10^4$ Гц, что соответствует характерным временам $\sim 2,5 \cdot 10^{-5}$ с. Таким образом, формирование ионной тени происходит за два характерных временных интервала, а ярко выраженная ионная тень не превышает радиус Дебая.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 15-01-00369-а.

Список литературы

1. Hamelin M., Bouhram M., Dubouloz N. et al. Combined effects of satellite and ion detector geometries and potentials on the measurements of thermal ions. The Hyperboloid instrument on Interball // Proc. 7th Spacecraft Charging Technology Conference, 23–27 April 2001, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. ESA SP-476. P. 569–574.
2. Bouhram M., Dubouloz N., Hamelin M. et al. Electrostatic interaction between Interball-2 and the ambient plasma. 1. Determination of the spacecraft potential from current calculations // Ann. Geophys. 2002. Vol. 20, № 3. P. 365–376.
3. Hamelin M., Bouhram M., Dubouloz N. et al. Electrostatic interaction between Interball-2 and the ambient plasma. 2. Influence on the low energy ion measurements with Hyperboloid // Ibid. P. 377–390.
4. Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Пятаевский Л. П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М., 1964.
5. Зинин Л. В., Ишанов С. А., Шарамет А. А., Мациевский С. В. Моделирование распределения ионов вблизи заряженного спутника методом молекулярной динамики. 2-D приближение // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2012. Вып. 10. С. 53–60.
6. Шарамет А. А., Зинин Л. В., Ишанов С. А., Мациевский С. В. 2D моделирование ионной тени за заряженным спутником методом молекулярной динамики // Там же. 2013. Вып. 10. С. 26–30.
7. Зинин Л. В., Шарамет А. А., Ишанов С. А., Мациевский С. В. Моделирование траекторий электронов и ионов тепловой плазмы в электрическом поле спутника методом молекулярной динамики // Там же. 2014. Вып. 10. С. 47–52.
8. Зинин Л. В., Шарамет А. А., Васильева А. Ю. Моделирование взаимодействия кислородной плазмы с положительно заряженным микроспутником методом молекулярной динамики // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2017. № 2. С. 29–34.

Об авторах

Леонид Викторович Зинин — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: leonid.zinin@gmail.com

Александр Александрович Шарамет — асс., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: alexsharamet@gmail.com

Алевтина Юрьевна Васильева — асс., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: vasilyeva.alevtina@gmail.com



About the authors

Prof Leonid Zinin, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: leonid.zinin@gmail.com

Alexandr Sharamet, ass., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: alexsharamet@gmail.com

Alevtina Vasileva, ass., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: vasilyeva.alevtina@gmail.com

УДК 514.75 (08)

Ю. И. Попов

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ,
АССОЦИИРОВАННЫЕ С РЕГУЛЯРНОЙ
КАСАТЕЛЬНО r -ОСНАЩЕННОЙ
ГИПЕРПОЛОСОЙ ПРОЕКТИВНОГО ПРОСТРАНСТВА

Введены π -структуры и почти контактные структуры в касательных T -, Λ -, L -подрасслоениях регулярной касательно r -оснащенной гиперполосы $H_{m,r}$ n -мерного проективного пространства.

Даны аналитические признаки и геометрические интерпретации рассматриваемым структурам.

π -structures and almost contact structures in the tangent T -, Λ -, L -subbundles of the regular tangentially r -framed hyperstrip H_m of the n -dimensional projective space are introduced.

Analytical signs and geometrical interpretations characterize the examined structures.

Ключевые слова: гиперполоса, π -структура, T -структура, почти контактная структура, касательное оснащение, подрасслоение, проективное пространство.

Key words: hyperstrip, π -structure, T -structure, almost contact structure, tangent framing, subbundle, projective space.

Во всей работе использована следующая схема индексов:

$$J, K, L = \overline{1, n}; \bar{J}, \bar{K}, \bar{L} = \overline{0, n}; i, j, k, l = \overline{1, m}; \tilde{i}, \tilde{j}, \tilde{k} = \overline{1, m-1}; u, v, w = \overline{m+1, n};$$
$$a, b, c = \overline{r+1, m}; \tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c} = \overline{r+1, m-1}; p, q, s, t = \overline{1, r}; \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{t} = \overline{1, r-1};$$
$$\tilde{A}, \tilde{B} = \overline{r+1, n}; s = m-r; i = \{a, p\}; \alpha, \beta, \gamma = \overline{m+1, n-1}.$$