

*Л. В. Зинин, А. А. Шарамет,
С. А. Ишанов, С. В. Мациевский*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ
ТЕПЛОЙ ПЛАЗМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ СПУТНИКА
МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ**

Рассмотрена трехмерная модель взаимодействия заряженного микроспутника и тепловой плазмы. В качестве метода решения использовался метод молекулярной динамики. Приведены траектории движения электронов и ионов для различных начальных скоростей и их направлений. Показано, что рассчитанные траектории частиц имеют некоторые отклонения от классических траекторий в скрещенных электрических и магнитных полях. Обсуждаются примеры замкнутых траекторий электронов.

A three-dimensional model of the interaction of a charged micro satellite and thermal plasma was considered. The ion and electron trajectories for different initial velocities and directions are shown. The calculated particle tra-



jectories have some deviations from the classical trajectories in crossed electric and magnetic fields. The examples of closed trajectories of electrons are discussed.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод молекулярной динамики, параллельное программирование.

Key words: mathematical modeling, molecular dynamics method, parallel programming.

Хорошо известны проблемы, которые возникают при измерении тепловой плазмы космическими аппаратами. Они прежде всего связаны с наличием потенциала на поверхности космического аппарата. Различные меры по его уменьшению [1–3] зачастую мешали самому проведению экспериментальных измерений и так или иначе не решали проблему взаимодействия космического аппарата и плазмы.

Изучению особенностей распределения космической плазмы вокруг заряженного спутника посвящено большое количество исследований. Отметим в первую очередь классическую работу [4]. С появлением высокопроизводительных компьютерных систем были разработаны многочисленные модели взаимодействия КА и плазмы как у нас в стране [5–7], так и за рубежом [8–10]. В этих и других моделях использовались два метода: гидродинамический подход, при котором численно решались уравнения непрерывности и движения, и PIC – метод крупных частиц (Particle In Cell).

Появление доступных терафлопных и петафлопных вычислительных систем дало возможность «прямого» моделирования взаимодействия тепловой плазмы и спутника методом молекулярной динамики [11–13]. Модель позволила получить картину взаимодействия космического аппарата и реальных частиц в 2D приближении.

В данной работе рассмотрены некоторые результаты, полученные в трехмерном варианте модели [11–13] с учетом магнитного поля, направленного перпендикулярно скорости спутника.

Анализ траекторий заряженных частиц является необходимой составляющей при тонкой обработке масс-спектрометрических измерений. Такой анализ, в частности, проводился при интерпретации космического эксперимента Гиперболоид на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 [14–16]. Ниже мы рассмотрим ряд полученных модельных траекторий частиц вблизи микроспутника.

Модель, использованная для получения траекторий частиц, описана в [11–13], однако для расчетов применялась ее трехмерная версия. В отличие от приведенных выше работ, ниже учитывалось магнитное поле с индукцией 800γ , что соответствует величине магнитного поля на высоте 15–20 тыс. км в полярной ионосфере. Магнитное поле перпендикулярно направлению скорости спутника, которая составляла 20 км/с. Потенциал спутника +5 В, температура и протонов и электронов 5000 К.

На рисунке 1 изображены типичные проекции траекторий движения протонов на плоскость XOY. В зависимости от величины и направления скорости траектории частиц значительно отличаются, но все траектории укладываются в общепринятые представления, и их характерные особенности как раз и формируют рассмотренные в [11–13] особенности типа фронта уплотнения перед спутником и ионной тени



позади него. Для удобства отображения отбирались только частицы, имеющие компоненту вдоль оси Z равную нулю, а так как магнитное поле направлено вдоль оси Z , то траектория частиц незначительно отклоняется от плоскости XOY .

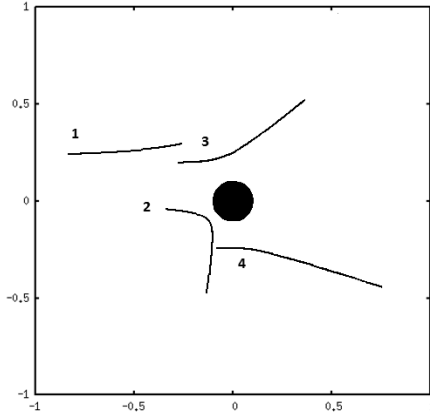


Рис. 1. Траектории движения протонов вблизи спутника в плоскости XOY .
Скорость спутника 20 км/с направлена вдоль оси X справа налево.
Значения начальных координат (м) и скоростей протонов (м/сек):

- 1: $x = 0,83, y = 0,24, v_x = 8300,03, v_y = 690,93$;
- 2: $x = -0,33, y = 0,04, v_x = 0776,53, v_y = -2503,78$;
- 3: $x = -0,27, y = 0,19, v_x = 21636,98, v_y = -68,12$;
- 4: $x = -0,07, y = -0,24, v_x = 21862,95, v_y = 2452,94$

Траектории движения электронов более разнообразны. В зависимости от начальных значений скоростей и координат эти траектории либо заканчиваются на поверхности спутника, либо имеют форму близкую к параболе и гиперболе или даже почти замкнуты и захвачены полем спутника. Начальные значения компонент координат и скоростей приведены в подписях к рисункам 2–3.

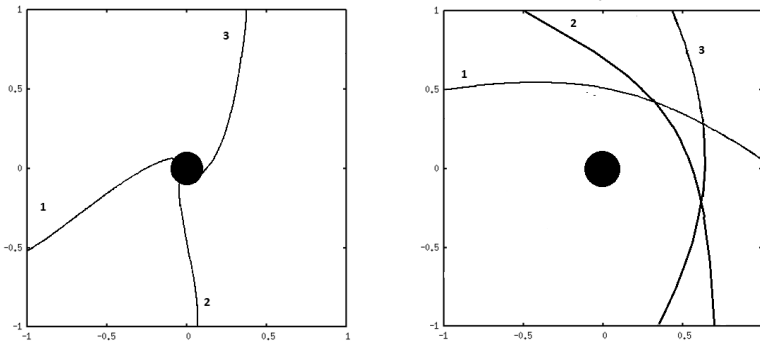


Рис. 2. Примеры финитных траекторий электронов (слева) и траекторий, близких к гиперболическим.

- Начальные значения для траекторий
- слева: 1: $x = -1,00, y = -0,51, v_x = 17123,06, v_y = 10083,38$,
 - 2: $x = 0,05, y = -1,00, v_x = 15225,91, v_y = 14159,03$;
 - 3: $x = 0,36, y = 1,00, v_x = 18874,82, v_y = -6456,28$;
 - и справа: 1: $x = 1,00, y = 0,05, v_x = -707613,18, v_y = 488893,21$,
 - 2: $x = 0,77, y = -1,00, v_x = -450051,43, v_y = 250592,54$,
 - 3: $x = 0,33, y = -1,00, v_x = 332892,46, v_y = 624332,56$

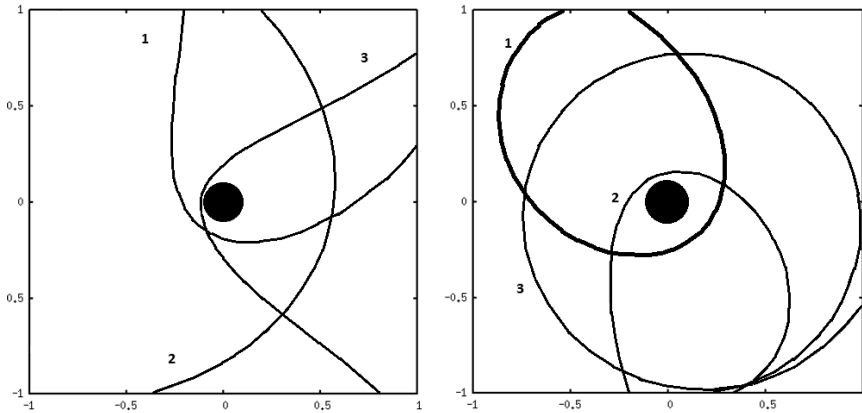


Рис. 3. Примеры траекторий электронов, близких к параболическим (слева) и захваченных электронов (справа).

Начальные значения для траекторий

- слева: 1: $x = 1,00$, $y = 0,30$, $v_x = -61556,16$, $v_y = -98558,09$,
2: $x = -0,39$, $y = -1,00$, $v_x = 441259,96$, $v_y = 121043,66$,
3: $x = 0,81$, $y = -1,00$, $v_x = -46008,58$, $v_y = 44650,23$;
и справа: 1: $x = -0,53$, $y = 1,00$, $v_x = -215129,03$, $v_y = -95426,44$,
2: $x = 0,30$, $y = -1,00$, $v_x = 199789,40$, $v_y = 57445,18$,
3: $x = 0,11$, $y = -1,00$, $v_x = 342945,81$, $v_y = 3201,39$

Таким образом, на основе трехмерной математической модели, основанной на методе молекулярной динамики, получены типичные траектории протонов и электронов вблизи сферического микроспутника. Показано, что в присутствии магнитного поля возникают траектории движения электронов, которые можно отнести к траекториям «захваченных» частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 12-01-00477а.

Список литературы

1. Гальперин Ю. И., Гладышев В. А., Козлов А. И. и др. Электромагнитная совместимость научного космического комплекса АРКАД-3. М., 1984.
2. Ридлер В., Торкар К., Веселов М. В. и др. Эксперимент РОН по активному регулированию электростатического потенциала космического аппарата // Космические исследования. 1998. Т. 36, № 1. С. 53 – 62.
3. Torkar K., Veselov M. V., Afonin V. V. et al. An experiment to study and control the Langmuir sheath around INTERBALL-2 // Ann. Geophys. 1998. Vol. 16. P. 1086 – 1096.
4. Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Пятаевский Л. П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М., 1964.
5. Zinin L., Grigoriev S., Rylina I. The models of electric field distributions near a satellite // Proceedings of the conference in memory of Yuri Galperin. CAWSES. Handbook-001. 2004. P. 76 – 83.



6. Рылина И. В., Зинин Л. В., Григорьев С. А. и др. Гидродинамический подход к моделированию распределения тепловой плазмы вокруг движущегося заряженного спутника // *Космические исследования*. 2002. Т. 40. С. 395–405.

7. Котельников В. А., Котельников М. В., Гидаснов В. Ю. Математическое моделирование обтекания тел потоками столкновительной и бесстолкновительной плазмы. М., 2010.

8. Katz I., Mandell M. L. Differential charging of high-voltage spacecraft: The equilibrium potential of insulated surfaces // *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87. P. 5433.

9. Katz I., Stannart P. R., Gedeon L. et al. NASCAP simulations of spacecraft charging of the SCATHA satellite // *Spacecraft/plasma interactions and their influence on field and particle measurements. Proceeding of the 17th ESLAB symposium*. Noordwijk. The Netherlands. 13–16 Sept., 1983. ESA SP-198. P. 109–114.

10. Mandell M. J., Katz I., Hilton M. et al. Nascap-2K spacecraft charging models: algorithms and applications // 2001: A spacecraft charging odyssey. Proceeding of the 7th Spacecraft Charging Technology Conference. 23–27 April 2001. ESTEC. Noordwijk. The Netherlands. ESA SP-476. P. 499–507.

11. Зинин Л. В., Ишанов С. А., Шарамет А. А. и др. 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.

12. Шарамет А. А., Зинин Л. В., Ишанов С. А. и др. 2D моделирование ионной тени за заряженным спутником методом молекулярной динамики // *Там же*. 2013. Вып. 10. С. 26–30.

13. Шарамет А. А., Зинин Л. В. Влияние относительной скорости спутника и плазмы на ионную тень заряженного спутника при 2D моделировании методом молекулярной динамики // *Высокопроизводительные вычисления – математические модели и алгоритмы: материалы II Международной конференции, посвященной Карлу Якоби*. Калининград, 2013. С. 226–227.

14. 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*, in Proc.7th Spacecraft Charging Technology Conference. 23–27 April 2001. ESTEC. Noordwijk, The Netherlands. ESA SP-476. P. 569–574.

15. 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, N 3. P. 365–376.

16. 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.

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 – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: alexsharamet@gmail.com

Сергей Александрович Ишанов – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: sergey.ishanov@ya.ru



Сергей Валентинович Мацевский — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: matsievsky@newmail.ru

About the authors

Prof. Leonid Zinin — I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: leonid.zinin@gmail.com

Alexandr Sharamet — PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: alexsharamet@gmail.com

Prof. Sergey Ishanov — I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: sergey.ishanov@ya.ru

Dr Sergey Matsievsky — Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: matsievsky@newmail.ru