

УДК 521.31

В. М. Ченурова, С. Л. Шершкина

**Влияние сильнодействующих возмущений
на эволюцию внешних слоев облака Оорта
(численное моделирование)**

Методом Рунге—Кутты четвертого порядка численно интегрируются уравнения возмущенного движения кометных тел, чтобы проследить эволюцию внешней части облака Оорта в течение $65 \cdot 10^6$ лет. На фоне постояннодействующего гравитационного поля Галактики учитываются возмущения от проходящей мимо Солнечной системы звезды и от гигантского облака молекулярного водорода, пересекаемого Солнцем при движении по орбите. Приводятся качественные результаты.

INFLUENCE OF STRONG PERTURBATIONS ON THE EVOLUTION OF OUTER LAYERS OF OORT CLOUD (NUMERICAL SIMULATIONS), by Chepurova V. M., Shershkina S. L.—The evolution of the outer part of Oort cloud in the interval of $65 \cdot 10^6$ years is considered by integrating numerically the equations of perturbed motion of cometary bodies by the Runge—Kutta method of the 4th order. Perturbations from a star passing by the solar system as well as those from a giant hydrogen molecular cloud being crossed by the Sun are taken into account along with the constantly acting background gravitational field of the Galaxy. The results obtained are analysed.

Введение. Эволюция орбит кометных тел, входящих в состав такого далекого от центральной звезды компонента Солнечной системы, как облако Оорта, происходит не только под действием притяжения Солнца и планет-гигантов. На него действуют и звездные возмущения как регулярные (галактическое гравитационное поле), так и иррегулярные (прохождение вблизи Солнечной системы звезды или пересечение Солнечной системой одного из гигантских облаков молекулярного водорода, весьма многочисленных на пути Солнца в Галактике). Влияние галактического поля на облако Оорта рассмотрено в [2, 10]. Исследуем теперь, как эволюционирует внешняя зона облака Оорта под влиянием сильнодействующих звездных возмущений (об этом кратко упоминалось в [10]).

Под внешней зоной облака Оорта мы, вслед за Г. А. Чеботаревым [7, 9], понимаем область, находящуюся на расстоянии более $6 \cdot 10^4$ а. е. от Солнца. Задача решалась на ЭВМ БЭСМ-4М численным интегрированием дифференциальных уравнений движения комет методом Рунге—Кутты четвертого порядка за $65 \cdot 10^6$ лет (т. е. 5—6 оборотов облака Оорта вокруг Солнца). Действие сильных возмущений рассматривается с учетом влияния галактического поля. Приведем некоторые качественные результаты анализа.

Постановка задачи. Рассмотрим инерциальную прямоугольную систему координат с началом в барицентре внутренней части Солнечной системы, основной плоскостью xy , совпадающей с плоскостью галактического диска, т. е. наклоненной к плоскости эклиптики примерно на 60° , осью Ox , направленной так, чтобы при переходе к эклиптическим координатам новая ось Ox' была направлена в точку весеннего равноденствия (система правая). Так как масса кометного тела (около 10^{15} г) намного меньше всех остальных рассматриваемых в задаче масс, то ею пренебрегаем, считая кометное тело частицей с нулевой массой. Тогда уравнения движения кометных тел облака Оорта в на-

шей системе координат можно записать в таком виде:

$$\frac{d^2 k_i}{dt^2} + \frac{f M k_i}{r_i^3} = F_{k_i}. \quad (1)$$

Здесь i — номер изучаемой кометы; $k_i = x_i, y_i, z_i$ — ее прямоугольные координаты; $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$ — ее радиус-вектор; M — масса Солнца и внутренних планет; f — гравитационная постоянная; F_{k_i} — компоненты возмущающего ускорения, принятые нами в виде

$$F_{k_i} = F_{k_i}^{(1)} + F_{k_i}^{(2)} + F_{k_i}^{(3)}, \quad (2)$$

где $F_{k_i}^{(1)}$ — ускорение от потенциала постояннодействующего галактического поля, выражение для которого взято из [3, 4]. Структура этого потенциала такова, что возмущение от него сказывается только на координате z и имеет вид

$$F_{x_i}^{(1)} = F_{y_i}^{(1)} = 0; \quad F_{z_i}^{(1)} = -2\lambda\Phi_c \exp(-\lambda z_i^2) \frac{z_i}{1 + \xi}, \quad (3)$$

где $\Phi_c = 11.3 \cdot 10^{14}$ (см/с)² — значение потенциала в центре Галактики; λ и ξ — константы, имеющие в окрестности Солнца значения 0.056 кпк⁻² и 1.493 соответственно; $F_{k_i}^{(2)}$ и $F_{k_i}^{(3)}$ — соответственно возмущения от проходящей мимо Солнечной системы звезды и от облака молекулярного водорода. Эти иррегулярные возмущения действуют кратковременно даже по сравнению с рассматриваемыми нами промежутками эволюции. Поэтому при изучении их влияния мы ограничивались интервалами времени порядка одного оборота облака Оорта вокруг Солнца. Для полного выявления действия каждого иррегулярного возмущения они исследовались отдельно и включались тогда, когда расстояние кометы до возмущающего тела становилось меньше расстояния R_s , которое вычислялось из условия равенства сил притяжения Солнца и возмущающего тела по формуле из [8]:

$$fM_{\odot}/(r_s - R_s)^2 = fM_s/R_s^2, \quad (4)$$

где M_{\odot} — масса Солнца; M_s — масса проходящей звезды; $r_s = 10$ кпк — расстояние от Солнца до центра Галактики. Отсюда при равенстве масс Солнца и звезды следует, что $R_s = r_s/2$.

Начальные данные для комет задавались с помощью стандартного генератора случайных чисел, но брались из определенных интервалов: $21 \cdot 10^4 \geq a \geq 1 \cdot 10^3$ а. е., $0.53 \leq e \leq 0.92$, $45^\circ < i < 135^\circ$, остальные элементы имели равномерное распределение. Гиперболические кометы не анализировались, но было взято несколько слабоярких эллиптических орбит ($e \approx 0.1 - 0.46$). Всего проинтегрировано более 100 орбит, для детального рассмотрения и получения результатов выбирались те, которые на данном временном отрезке быстрее эволюционировали. Методика выбора таких комет позаимствована из разработанного для задач звездной динамики способа «собственных» времен Ахмада—Козна [11] с введением шагов по «регулярному» и «иррегулярному» времени соответственно преобладанию действия регулярных и иррегулярных возмущающих сил по формулам

$$\Delta T_i = B |F_i| / |\dot{F}_i|; \quad \Delta t_i = A r_{ij}^{3/2},$$

где F_i — регулярная сила; \dot{F}_i — ее производная по времени; r_{ij} — расстояние i -й кометы до j -го возмущающего тела; ΔT_i — шаг по «регулярному» времени; Δt_i — шаг по «иррегулярному» времени; A и B — константы (мы брали $A = B = 0.5$). С помощью этого простого

приема находились кометы с наименьшими шагами (они быстрее изменяли движение), т. е. подвергающиеся наибольшему возмущающему действию. Контроль точности вычислений проводился здесь так же, как в [2, 10]. Для удобства выбиралась следующая система единиц: $5 \cdot 10^4$ лет (ед. вр.); 10^4 а. е. (ед. дл.); $1M_{\odot} = 1.99 \cdot 10^{33}$ г (ед. массы); отсюда единица скорости — 0.5 а. е./год. В этих единицах гравитационный потенциал в центре Галактики равен $20.11328 \cdot 10^6$ (ед. дл./ед. вр.)², гравитационная постоянная $f = 9.8814812 \cdot 10^{-2}$ (ед. дл.)³/[(ед. вр.)² × [ед. массы]], $M = 1.0013429$; один оборот облака Оорта вокруг Солнца совершается за $200-300$ ед. вр., общий интервал интегрирования — 1300 ед. вр., $r_s = 2.06265 \cdot 10^5$ ед. дл., $\lambda = 1.31625 \cdot 10^{-10}$ (ед. дл.)⁻².

Учет возмущений от проходящей звезды. Рассмотрены два модельных варианта задачи: 1) скорости комет и звезды несоизмеримы, звезда движется относительно Солнечной системы по прямой, параллельной галактической плоскости; 2) звезда движется относительно Солнца по гиперболе, лежащей в галактической плоскости, скорости комет и звезды соизмеримы. В обоих случаях считалось, что звезда и Солнце не взаимодействуют, хотя по массе равны. Это возможно, так как с целью выявить только главное направление эволюции кометного облака мы рассматривали очень быстрое (вариант 1) и очень медленное (вариант 2) движение возмущающей звезды.

Вариант 1 — звезда движется по прямой. В начальный момент она находится на расстоянии примерно 10 пк от Солнца, движется со скоростью $v \approx 20$ км/с вдоль оси Ox ; ее координаты: $x_0 = 10$ пк, $y_0 = 0.5$ пк, $z_0 = 0.25$ пк. Тогда

$$x_s = x_0 - vt; \quad y_s = y_0; \quad z_s = z_0. \quad (5)$$

Заканчивалось интегрирование при уходе звезды на расстояние около 19.5 пк.

Вариант 2 — звезда движется по гиперболе. В начальный момент она находится на расстоянии примерно 13.6 пк от Солнца, имеет скорость $v \approx 2.7$ км/с; ее координаты определяются уравнениями

$$x_s = a \cdot \text{ch}[(t/100) - 3]; \quad y_s = B \cdot \text{sh}[(t/100) - 3]; \quad z_s = 0, \quad (6)$$

где $a = 0.8$ пк — действительная полуось гиперболы; $B = a\sqrt{E^2 - 1}$ — мнимая полуось; $E = 1.7$ — эксцентриситет гиперболы, по которой движется звезда. Через 300 ед. вр. от начала интегрирования она достигает минимального расстояния от Солнца (0.8 пк), имеет скорость 0.01 км/с, соизмеримую со скоростями кометных тел в облаке Оорта. Здесь промежутки сближения гораздо больше, чем в варианте 1, и возмущения поэтому дольше и значительнее. Характер возмущений в обоих вариантах одинаков, но в варианте 2 они ярче выражены вследствие увеличения продолжительности взаимодействия. Уравнения движения кометных тел для обоих вариантов следующие:

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} + \frac{fMx_i}{r_i^3} = fM_s \frac{x_s - x_i}{r_{is}^3}; \quad \frac{d^2 y_i}{dt^2} + \frac{fMy_i}{r_i^3} = fM_s \frac{y_s - y_i}{r_{is}^3}; \quad (7)$$

$$\frac{d^2 z_i}{dt^2} + \frac{fMz_i}{r_i^3} = -2\lambda\Phi_c \exp(-\lambda z_i^2) \frac{z_i}{1 + \xi} + fM_s \frac{z_s - z_i}{r_{is}^3}.$$

Здесь x_s, y_s, z_s — координаты звезды, взятые из (5) или из (6) соответственно вариантам; r_{is} — расстояние от i -й кометы до звезды, остальные обозначения такие же, как в (1), (3), (4).

Численное интегрирование уравнений (7) убедительно показало: 1. Изменения элементов орбит кометных тел тем больше, чем меньше относительная скорость взаимодействующих тел. На a и e звезда и галактическое поле действуют по-разному, но с самого начала учета возмущений от звезды последние превалируют над полем довольно

значительно; 2. Все рассмотренные кометы начинали двигаться по вытягивающимся виткам спирали. Начально малые a и e уменьшались, орбиты как бы «стягивались» к центру, но внутрь Солнечной системы все же не входили. Начально средние и большие a и e увеличивались (в момент наибольшего сближения со звездой — скачком). После прохождения звезды 47 % комет ушли за ней, покинули Солнечную систему и за примерно 10^9 лет удалились приблизительно на 1.3 кпк; 3. В варианте 2 по сравнению с вариантом 1 на картину эволюции накладывались непериодические колебания a и e , т. е. оставшаяся более внутренняя часть облака Оорта с малыми a и e неритмично пульсировала.

Влияние облака молекулярного водорода. По современным представлениям в Галактике насчитывается около 2000 облаков молекулярного водорода, у которых диаметры более 10 пк, общие массы около $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Если Солнечная система пересечет или пройдет мимо такого образования, то облако Оорта, конечно, испытает сильное возмущение. Мы рассмотрели случай, когда Солнечная система пересекла облако водорода по прямой вдоль оси Oy со скоростью $v=5$ км/с (скорость бралась из наблюдений). Начальные координаты центра облака такие:

$$x_{\text{мо}} = -0.5 \text{ пк}; \quad y_{\text{мо}} = -23.5 \text{ пк}; \quad z_{\text{мо}} = 0.5 \text{ пк}. \quad (8)$$

Взаимодействие облака с Солнцем не учитывалось. Исходя из формулы притяжения однородного сфероида [1], возмущение от однородного облака диаметром 50 пк можем записать в виде

$$R_M = -2f\pi\delta r_{Mi}^2/3, \quad (9)$$

где δ — плотность водорода в облаке (из наблюдений $\delta \approx \approx 8.35 \cdot 10^{-22}$ г/см³); r_{Mi} — расстояние от i -й кометы до центра облака; f — постоянная тяготения. Тогда уравнения движения комет имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x_i}{dt^2} + \frac{fMx_i}{r_i^3} &= 4\pi\delta f(x_M - x_i)/3; & \frac{d^2y_i}{dt^2} + \frac{fMy_i}{r_i^3} &= 4\pi\delta f(y_M - y_i)/3; \\ \frac{d^2z_i}{dt^2} + \frac{fMz_i}{r_i^3} &= -2\lambda\Phi_c \exp(-\lambda z_i^2) \frac{z_i}{1 + \xi} + 4\pi\delta f(z_M - z_i)/3, \end{aligned} \quad (10)$$

где $y_M = y_{\text{мо}} + vt$, $x_M = x_{\text{мо}}$, $z_M = z_{\text{мо}}$ — координаты центра водородного облака ($x_{\text{мо}}$, $y_{\text{мо}}$, $z_{\text{мо}}$ — берутся из (8)); остальные обозначения такие же, как в (1), (3), (9).

Результаты численного интегрирования уравнений (10) свидетельствуют о следующем: 1) все орбиты рассмотренных комет становятся гиперболическими; 2) разброс больших полуосей сглаживается: сначала они резко сжимаются до 0.9—3 ед. дл., затем начинают медленно увеличиваться, при этом испытывают периодические колебания; эксцентриситеты резко (скачком) растут, достигая иногда больших значений (до $e \geq 20$), но в среднем также выравниваясь между собой; орбиты с малым наклоном быстро его увеличивают; 3) примерно за 10^9 лет кометы с увеличивающимися a , e и большими (около 90° к галактическому диску) начальными наклонами уходят дальше, чем на 360 пк от Солнца.

Таким образом, после прохождения водородного облака кометы внешней зоны облака Оорта почти полностью покидают Солнечную систему (лишь 18 % комет могут вернуться, и то с очень большого, примерно 2.8 пк, расстояния, на которое они уходят за промежуток интегрирования), образуя направленный кометный поток (приблизительно с одинаковыми a и e).

Совместное действие близкого прохождения звезды и облака молекулярного водорода. Исходные данные для звезды и центра молекулярного облака прежние (см. выражения (5) и (8)). Действие облака водорода превалирует над влиянием звезды, результаты в целом те же, что в предыдущем разделе. Но есть отличия: сильнее растут a и e ; примерно за 10^9 лет кометы уходят приблизительно на 390 пк; орбиты заметнее концентрируются к плоскости галактического диска, причем более половины комет получают обратное движение; образуется более четкий кометный поток с большими a и e , разброс в значениях e увеличивается, форма потока становится веерообразной.

Заключение. Интегрирование показало, что из внешней зоны модельного облака Оорта ни одна комета ни при каких возмущениях не вошла глубоко внутрь Солнечной системы (ближайшие к Солнцу кометы имели перигелийные расстояния $q > 18 \cdot 10^3$ а. е., нашлась одна с $q = 4 \cdot 10^3$ а. е.). Поэтому мы здесь не рассматривали влияние больших планет. Внешняя зона облака Оорта (и без того «расшатанная» галактическим полем [2, 10]) не может пережить более одного сближения Солнечной системы с проходящей мимо звездой, а тем более пересечения облака молекулярного водорода. Поэтому облако Оорта не может продолжительное время быть источником долгопериодических комет в Солнечной системе, как принято сейчас считать. С другой стороны, оно после таких встреч образует кометные потоки и облака в Галактике вдоль орбиты Солнца, как описано в [5, 6]. Конечно, эволюцию кометного ансамбля с огромным числом объектов (считается, что в облаке Оорта около 10^{11} кометных тел) на космогонических промежутках времени нашими средствами точно проследить невозможно, тем более что число модельных комет не соизмеримо с их общим количеством. Мы попытались представить только основные направления и тенденции эволюции кометных орбит в экстремальных ситуациях.

1. Дубошин Г. Н. Теория притяжения.— М.: Физматгиз, 1961.—288 с.
2. Кирюшенкова Н. В., Чепурова В. М., Шершукина С. Л. Эволюция облака Оорта под действием галактического поля // Анализ движения небесных тел и оценка точности их наблюдений.— Рига: Латв. ун-т, 1988.— С. 72—99.
3. Паренаго П. П. О гравитационном потенциале Галактики // Астрон. журн.— 1950.—27, вып. 6.— С. 329—340.
4. Паренаго П. П. О гравитационном потенциале Галактики // Там же.— 1952.—29, вып. 3.— С. 245—287.
5. Цицин Ф. А., Чепурова В. М., Расторгуев А. С. Кометы и Галактика // Астрон. циркуляр.— 1984.— № 1310.— С. 5—6.
6. Цицин Ф. А., Чепурова В. М., Расторгуев А. С. Динамическая эволюция космогонически исходного ансамбля кометных тел Солнечной системы // Там же.— 1985.— № 1408.— С. 5—8.
7. Чеботарев Г. А. О границах Солнечной системы // Астрон. журн.— 1964.—41, вып. 5.— С. 983—989.
8. Чеботарев Г. А. Аналитические и численные методы небесной механики.— М.; Л.: Наука, 1965.—367 с.
9. Чеботарев Г. А. О движении комет во внешней зоне Солнечной системы // Астрон. журн.— 1966.—43, вып. 2.— С. 435—440.
10. Чепурова В. М., Шершукина С. Л. Изучение эволюции внешней зоны кометного облака Оорта путем численного моделирования // Астрон. циркуляр.— 1987.— № 1478.— С. 5—8.
11. Ahmad A., Cohen L. A numerical integration scheme for N-body gravitational problem // J. Comput. Phys.— 1973.—12.— P. 389.

Гос. астрон. ин-т им. П. К. Штернберга,
Москва

Поступила в редакцию 07.04.88,
после доработки 02.01.89