

ВЛИЯНИЕ НЕСФЕРИЧНОСТИ ФИГУРЫ ЮПИТЕРА НА НИЗКОСКОРОСТНЫЕ СБЛИЖЕНИЯ КОМЕТЫ

Н.Ю. Емельяненко, К.С. Заварухин

Рассматривается вопрос о влиянии несферичности гравитационного потенциала Юпитера на эволюцию короткопериодических комет с тесными сближениями с планетой. Анализируется влияние учета несферичности фигуры Юпитера на общую картину сближения и последующую эволюцию орбиты кометы. Приводятся примеры наблюдаемых комет и возможные ошибки в исследовании их сближений и эволюций орбит.

Учет возмущений от второй зональной гармоники потенциала Юпитера впервые был применен более ста лет назад в окрестности перийовия кометы Брукса 2 в 1886 г. Первыми исследователями были К. Дейчланд [1] и Пур [2]. Во второй половине XX века при изучении этого уникального сближения возмущения от сжатия Юпитера учитывали А.Д. Дубяго [3], Г.Р. Кастель [4], Н.Ю. Емельяненко [5, 6]. В работе Н.Ю. Емельяненко [7] было установлено критическое расстояние для низкоскоростных сближений: $\rho_k=0,08$ а.е. Пребывание кометы внутри сферы критического радиуса без учета сжатия Юпитера при интегрировании уравнений движения приводит к существенным ошибкам в элементах орбиты после сближения.

В настоящее время имеются работы, например, М.Д. Замарашкиной, Ю.Д. Медведева [8], в которых проводится учет несферичности фигуры Юпитера в окрестности перийовиев кометы Шумейкерова–Леви [9]. Но подавляющее большинство исследований эволюций орбит комет, проникающих в сферу критического радиуса ρ_k , проводится без учета влияния несферичности фигуры Юпитера.

Основная задача исследования – показать, что численное интегрирование уравнений движения кометы с учетом и без учета несферичности гравитационного потенциала Юпитера может привести к несопоставимости эволюций кометной орбиты после сближения с планетой, в котором она проходит через сферу критического радиуса ρ_k .

Пусть орбита Юпитера и эллиптическая орбита кометы расположены в одной плоскости. Такое предположение вполне допустимо для исследованных комет (в работе Н.Ю. Емельяненко [9] было показано, что их орбиты имеют стабильно низкий наклон на 800-летнем промежутке времени). Пусть a, b, e, q, Q – большая и малая полуоси, эксцентриситет, перигелийное и афелийное расстояния оскулирующей гелиоцентрической орбиты кометы; R – ее радиус-вектор, E, v – эксцентрическая и истинная аномалии; p – параметр орбиты; r_j^* – расстояние кометы от орбиты Юпитера по радиусу-вектору; r_j – йовицентрическое расстояние; α – угол между направлениями на комету и Юпитер в произвольный момент времени; ρ и T_ρ – основные параметры сближения (минимальное значение величины r_j и время его достижения (если имеют место кратные минимумы (КМ), эти величины нумеруются верхним индексом по направлению возрастания величины t (время в юлианских днях JD))). Соответствующие элементы и параметры орбиты Юпитера обозначаются теми же буквами и символами со штрихами. Если в области сближения имеет место временный спутниковый захват в смысле Эверхарта (оскулирующие йовицентрические элементы орбиты кометы становятся эллиптическими), он обозначается буквами ВСЗ. Если происходит временный гравитационный захват кометы Юпитером, он обозначается буквами ВГЗ.

Для решения поставленной задачи уравнения движения комет, проходящих через сферу критического радиуса, интегрировались численно с использованием метода и программы Эверхарта [10] с учетом и без учета несферичности Юпитера.

Рассмотрим несколько наблюдаемых комет, у которых учет несферичности фигуры Юпитера привел к наибольшим изменениям эволюции кометной орбиты. Кометы расположены по возрастанию величины ρ в области сближения.

ΔT_1 и ΔT_2 – общее время сближения; N_1 и N_2 – число минимумов функции йовицентрического расстояния в области сближения; Δt_1 и Δt_2 – время ВСЗ ($i = 1$ – интегрирование с учетом сжа-

тия Юпитера, $i = 2$ – без учета сжатия); ΔP – изменение периода обращения кометы вокруг Солнца (из-за учета сжатия).

Комета Брукса 2

Исследуется сближение 1886 года.

Общая картина сближения изменилась незначительно: сохранился один минимум и его величина: $\rho = 0,00094$ а.е.; $N_1 = N_2 = 1$; момент прохождения перигелия наступил позже на 10 минут. Длительность сближения увеличилась в 1,2 раза (рис. 1). Комета прошла на расстоянии радиуса Юпитера от его поверхности.

Учет несферичности фигуры Юпитера привел к несопоставимости вторых сближений по времени их наступления и общей картине сближения (рис. 2).

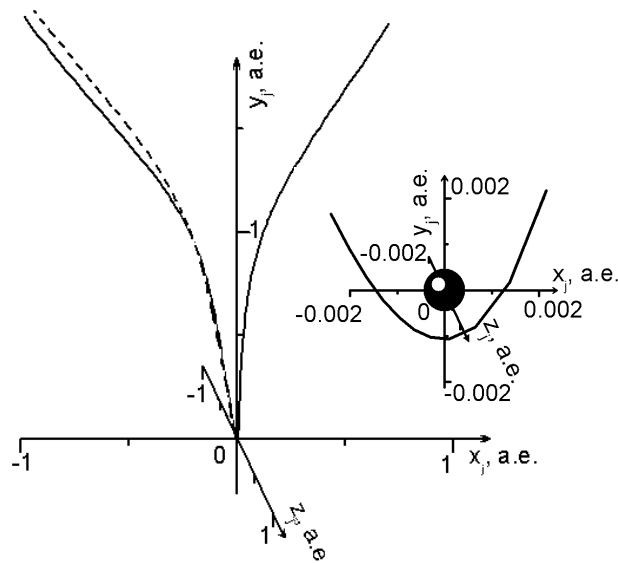


Рис. 1. Йовицентрическая траектория кометы Брукса 2 в 1886 г.

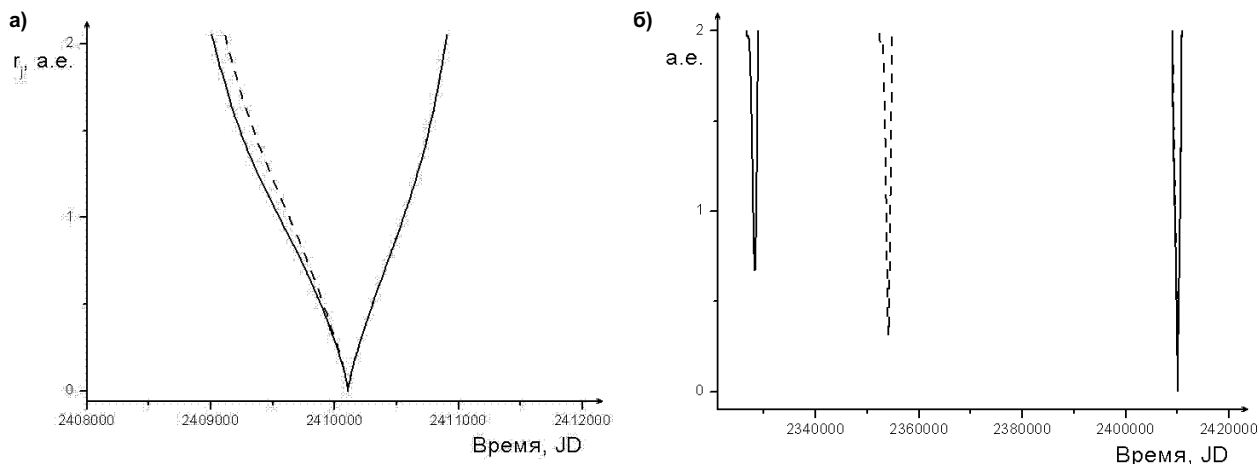


Рис. 2. Эволюция орбиты (йовицентрического расстояния кометы Брукса 2 в сближении 1886г. (а) и первом сближении после него(б)). - - - - без сжатия; — — со сжатием

Комета Лекселя

Исследуется сближение 1779 г. Общая картина сближения изменилась незначительно. Сохранился один минимум и его величина: $\rho = 0,00149$ а.е.; $N_1 = N_2 = 1$; $\Delta P = 32,1$ г (рис. 3).

Но комета Лекселя пройдет очередной перигелий на 32 года раньше, т.е. без учета сжатия во время сближения 1779 г. ее будет невозможно переоткрыть в XXI веке по поисковой эфемериде. Отметим, что такое большое изменение момента прохождения перигелия произошло при отсутствии сближений кометы Лекселя с большими планетами после 1779 г. (рис. 4).

Комета Лекселя испытала послеафелийное сближение с очень тесным минимумом в точке пересечения ее орбиты и орбиты Юпитера. В окрестности минимума происходит реверсия касания орбит с выходом кометы на крайне неста-

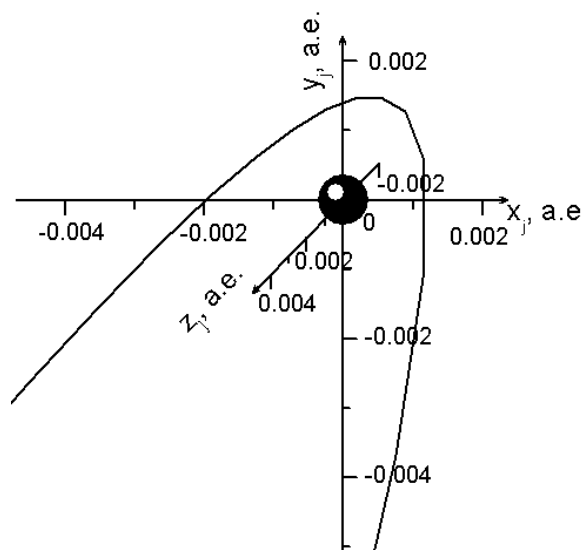


Рис. 3. Йовицентрическая траектория кометы Лекселя в 1779 г.

бильную оскулирующую гелиогиперболу. В целом гелиоцентрическая орбита кометы в области сближения непрерывно и быстро изменяется, в то время как элементы йовицентрической орбиты

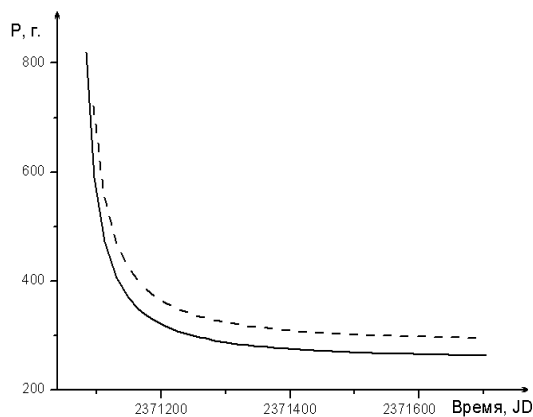


Рис. 4. Изменение периода обращения кометы Лекселя во время сближения 1779 г. --- без сжатия, — со сжатием

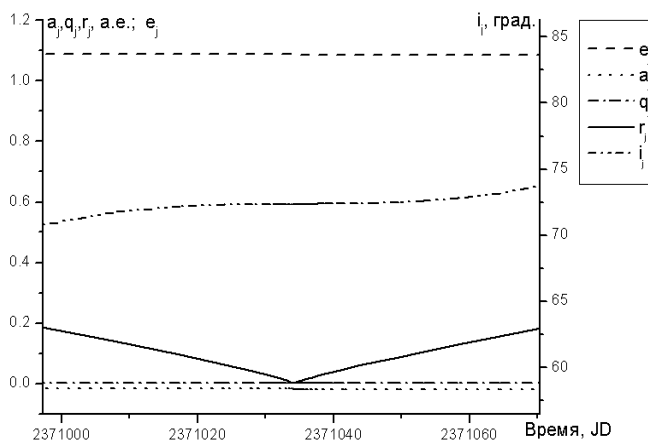


Рис. 5. Стабилизация йовицентрических элементов орбиты кометы Лекселя в сфере действия Юпитера в 1779 г.

в сфере действия Юпитера изменяются незначительно: орбита кометы близка к параболической ($e=1,08$). Это позволяет говорить о гравитационном захвате кометы Лекселя на слабогиперболическую орбиту (рис. 5).

Комета Герельса 3

Исследуется сближение 1963–1973 гг., $\rho = 0,00145$ а.е.; $N_1 = 4$; $N_2 = 2$.

Комета Герельса 3 – исторически первый кометный объект с кратными минимумами функции йовицентрического расстояния и временным спутниковым захватом в смысле Эверхарта в области сближения.

Учет возмущений от второй и четвертой зональных гармоник потенциала Юпитера привел к несопоставимости общих картин сближения 1965–1973 гг. Число минимумов функции йовицентрического расстояния удвоилось, также как и длительность сближения. ВСЗ приводит к ВГЗ, комета два раза обходит Юпитер по орбите, напоминающей спутниковую (рис. 6). Йовицентрические участки ВСЗ – это большая часть траектории кометы в сфере единичного радиуса, включая все перийовии и апойовии: $\Delta\tau = 12967$ сут (35,5 лет). На протяжении ВГЗ гелиоцентрическая орбита кометы крайне нестабильна: имеет место шесть реверсий линии апсид и непродолжитель-

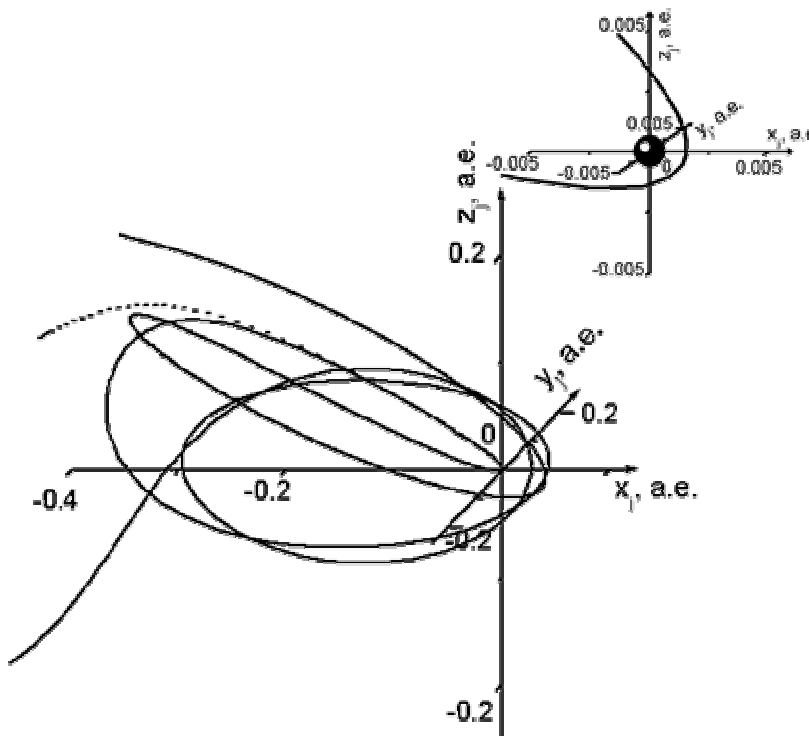


Рис. 6. Йовицентрическая траектория кометы Герельса 3 в 1963–1973 гг. --- без сжатия, — со сжатием

ный(6 сут) выход кометы на гелиогиперболу. В то же время элементы йовицентрической орбиты изменяются меньше. Во всех четырех минимумах $\rho_j < \rho_k$. Учет несферичности фигуры Юпитера привел к несопоставимости вторых сближений по времени наступления и общей картине сближения (рис. 7, 8).

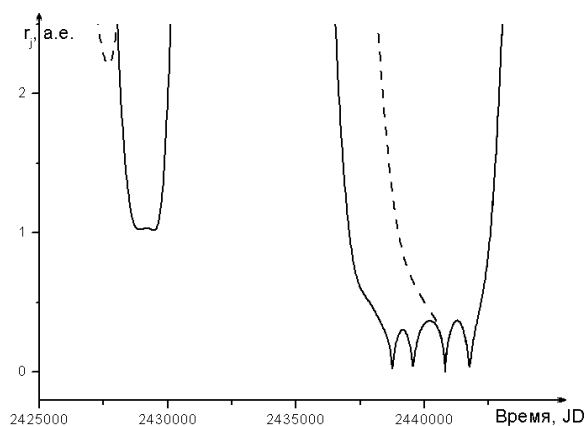


Рис. 7. Эволюция орбиты (йовицентрического расстояния) кометы Герельса 3 в сближении 1973 г. и в первом сближении после него. - - - без сжатия, — со сжатием

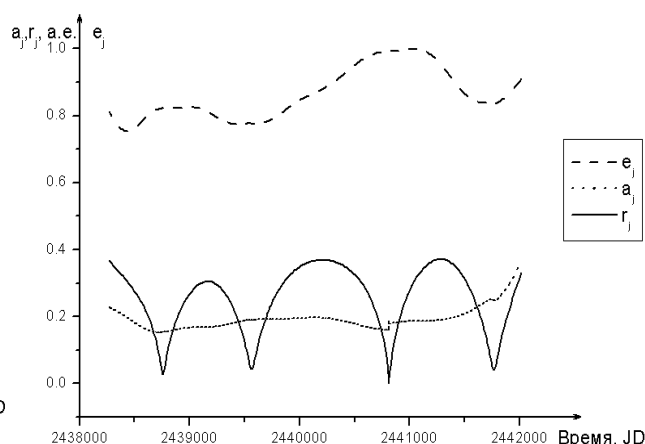


Рис. 8. Изменение йовицентрических элементов кометы Герельса 3 в сближении 1973 г. на ВС3

Комета Хелин–Роман–Крокет

Исследуется сближение 1969–1997 гг., $\rho = 0,01189$ а.е., $N_1=N_2=6$.

Общая картина сближения изменилась незначительно. Сохранилось число минимумов функции йовицентрического расстояния и величина главного минимума (рис. 9). Только в трех минимумах $\rho_j < \rho_k$. Наблюдается ВСЗ и ВГЗ, но йовицентрическая орбита более нестабильна по сравнению с орбитой кометы Герельса 3. Йовицентрические участки ВСЗ – это большая часть траектории кометы в сфере единичного радиуса, включая все перийовии и апойовии: $\Delta t = 6645$ суток (18,2 года). Гелиоцентрическая орбита нестабильна. Имеет место 8 реверсий, нет выхода кометы на гелиогиперболу. Обращает на себя внимание симметрия элемента r_j в области сближения относительно положения ρ_3 .

Вторые сближения – достоверные события по времени наступления, но общая картина сближений меняется, что приводит к несопоставимости последующих эволюций (рис. 10, 11).

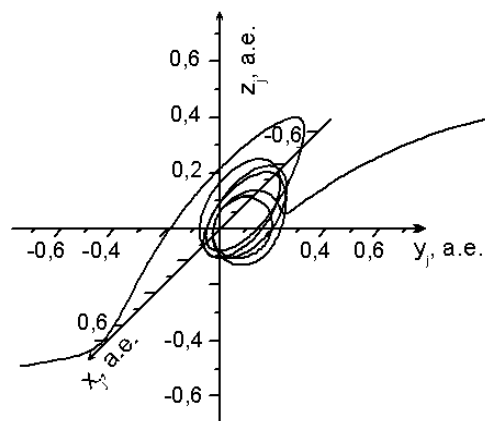


Рис. 9. Йовицентрическая траектория кометы Хелин–Роман–Крокет

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Эффективность влияния несферичности фигуры юпитера увеличивается с уменьшением йовицентрической скорости кометы как внутри сферы критического радиуса, так и во всей области сближения.

Возмущения от второй и четвертой зональных гармоник потенциала Юпитера приводят ко все более значительному изменению основных параметров сближения, сопровождающихся одним минимумом функции йовицентрического расстояния (кометы Брукса 2, Лекселя): минимальные расстояния уменьшаются, соответственно позднее наступает момент прохождения перийовия, возрастает длительность сближения, уменьшается эксцентриситет оскулирующей гиперболической йовицентрической орбиты кометы. Все эти изменения пропорциональны глубине проникновения кометы в сферу критического радиуса.

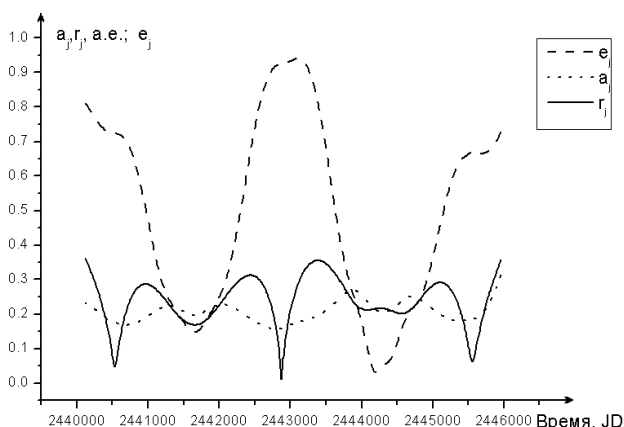


Рис. 10. Изменение йовицентрических элементов кометы Хелин–Роман–Крокет в сближении 1973 г. на ВСЗ

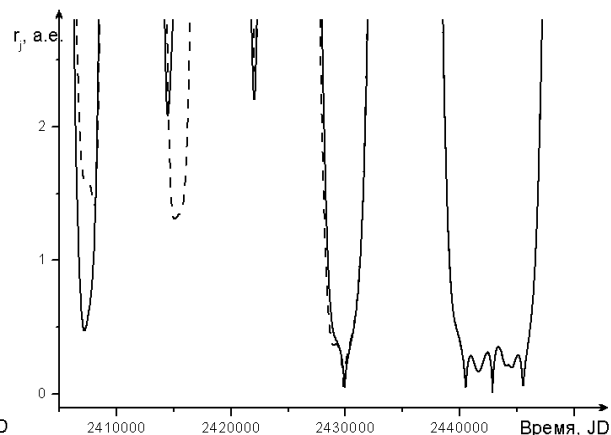


Рис. 11. Эволюция орбиты йовицентрического расстояния кометы Хелин–Роман–Крокет в сближении 1973 г. и в трех сближениях после него. --- без сжатия, — со сжатием

Для сближений с кратными минимумами и явлением ВСЗ влияние учета сжатия Юпитера дополнительно зависит от числа проходов кометы через сферу критического радиуса. Время ВСЗ увеличивается, возможна существенная трансформация йовицентрической траектории с увеличением общего числа минимумов (комета Герельса 3). Несферический Юпитер увеличивает время ВГЗ и, по-видимому, содействует переходу кометы на орбиту временного спутника Юпитера.

Учет несферичности фигуры Юпитера для четырех исследованных комет привел к несовместимости эволюций их орбит, полученных двумя способами.

Работа поддержана грантом РФФИ № 04-02-96042.

Литература

1. Deutschland C. Die Störungen des Booksschen Kometen 1889 V durch die Abplattung des Jupiter bei seiner Jupiternahe im Jahre 1886// *Astronomische Nachrichten*. – 1909.
2. Poof Ch.L. Researches upon comet 1889 V// *Astron. J.* – 1894. – V. 13. – P. 123–179.
3. Дубяго А.Д. Движение периодической кометы Брукса с 1883 по 1946 гг.// *Уч. зап. Казанск. ун-та.* – 1950. – Т. 110. – № 8. – С. 5–44.
4. Кастель Г.Р. Исследование тесного сближения кометы Брукса с Юпитером в 1886 г.// *Бюл. Ин-та теорет. астрон.* – 1965. – Т. 10. – № 2. – С. 118–142.
5. Емельяненко Н.Ю. Движение кометы Брукс-2 в сфере действия Юпитера в 1886 году// *Астрон. вестн.* – 1986. – Т. 20. – № 4. – С. 334–342.
6. Емельяненко Н.Ю. Движение кометы Брукс-2 в зоне спутников Юпитера в 1886 г.// *Кинематика и физика небесн. тел.* – 1986. – Т. 2. – № 4. – С. 87–90.
7. Емельяненко Н.Ю. Эволюция орбит комет, имеющих тесные сближения с Юпитером. II. Анализ влияния несферичности Фигуры Юпитера// *Астрон. вестн.* – 1992. – Т. 26. – № 5. – С. 30–34.
8. Заарашкина М.Д., Медведев Ю.Д. Динамика кометы Шумейкеров–Леви 9// *Тезисы докладов Всерос. астр. конф.* – СПб., 2001. – С. 69.
9. Емельяненко Н.Ю. Короткопериодические кометы с высоким значением постоянной Тиссерана. I. Орбитальная Эволюция// *Астрон. вестн.* – 1997. – Т. 31. – № 3. – С. 257–267.
10. Everhart E. Implicit single-sequence methods for integrating orbits// *Celest. Mech.* – 1974. – V. 10. – № 1. – P. 35–55.

Поступила в редакцию 16 июня 2005 г.