ISSN 0233-7665. Кинематика и физика небес. тел. 2005. Т. 21. № 4

УДК 523.24, 523.68

А. М. Казанцев

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
04053 Киев-53, ул. Обсерваторная 3

Учет эффекта Пойнтинга — Робертсона на коротких интервалах эволюции метеорных орбит

Проанализировано уравнение Робертсона, описывающее влияние солнечного излучения на эволюцию гелиоцентрической орбиты частицы. Качественный анализ и численное интегрирование эволюции метеорных орбит показали, что, кроме хорошо исследованных вековых изменений больших полуосей и эксцентриситетов орбит, происходят заметные короткопериодические изменения этих элементов. Эти колебания необходимо учитывать при точных расчетах эволюции орбит метеоров.

ВРАХУВАННЯ ЕФЕКТУ ПОЙТНТІНГА — РОБЕРТСОНА НА КОРОТКИХ ІНТЕРВАЛАХ ЕВОЛЮЦІЇ МЕТЕОРНИХ ОРБІТ, Казанцев А. М. — проаналізовано рівняння Робертсона, що описує вплив сонячного випромінювання на еволюцію геліоцентричної орбіти частинки. Якісний аналіз та чисельне інтегрування еволюції метеорних орбіт показали, що, крім добре відомих та досліджених вікових змін великих півосей та ексцентриситетів орбіт, відбуваються помітні короткоперіодичні зміни цих елементів. Ці коливання необхідно враховувати при точних розрахунках еволюції орбіт метеорів.

THE ACCOUNT OF POYNTING — ROBERTSON'S EFFECT ON SHORT INTERVALS OF METEOR ORBIT EVOLUTIONS, by Kazantsev A. M. — We analysed Robertson's equation describing influence of solar radiation on heliocentric orbit evolution of a particle. A qualitative analysis and numerical integration of meteor orbit evolutions showed that, besides well-known and investigated secular changes of semi-major axis and eccentricities of orbits, appreciable short-periodic changes of these elements occurred. These changes should be taken into account for exact calculations of meteor body orbits on short time intervals (some orbital periods).

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Прошло более ста лет с того времени, как Пойнтинг впервые проанализировал влияние поглощения и переизлучения солнечной радиации малым телом на изменение элементов его орбиты. Он сделал вывод, что этот процесс должен приводить к уменьшению углового момента тела и его выпадению на Солнце за длительные интервалы времени. Этот эффект, играющий важную роль в эволюции метеорных орбит, был признан, но его верное объяснение было дано Робертсоном лишь в 1937 г.

Робертсон вывел уравнение движения частицы, обусловленное солнечным излучением с учетом релятивистских эффектов, которое при сохранении членов лишь первого порядка относительно V/c имеет вид [2]

$$m\frac{d\mathbf{V}}{dt} = f\left(1 - \frac{V_п}{c}\right)\mathbf{n} - f\frac{\mathbf{V}}{c}, \tag{1}$$

где m — масса частицы, $V_п$ — проекция вектора скорости $\mathbf{V}$ в направлении падающего луча, $\mathbf{n}$ — единичный вектор в том же направлении, c — скорость света. Лучевое давление f определяется выражением

$$f = \frac{mKc}{r^2},$$

$$K = 2.51\cdot 10^{11}\rho^{-1}\delta^{-1},$$

где r — расстояние частицы от Солнца, ρ (см) — радиус частицы, δ (г/см^3) — ее плотность.

Если в правой части уравнения (1) добавить силу тяготения на частицу со стороны Солнца ($\gamma Mm/r^2$), то получим уравнение движения частицы в гравитационном и радиационном поле Солнца одновременно:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\gamma\frac{M}{r^2} + \frac{Kc}{r^2}\left(1 - \frac{V_п}{c}\right)\mathbf{n} - \frac{K\mathbf{V}}{r^2}. \tag{2}$$

Слагаемые правой части уравнения (2), обусловленные солнечным излучением, играют роль возмущений. Робертсон нашел вековые возмущения для большой полуоси орбиты, эксцентриситета и долготы перигелия, из которых следует, что эти элементы постоянно уменьшаются. Следовательно, любая частица приближается к Солнцу по спирали и должна в конце-концов упасть на него. Характерное время такого падения пропорционально первой степени произведения $\rho\delta$, а для частиц с радиусом 1 см и плотностью 1 г/см^3, принадлежащих наблюдаемым метеорным потокам, по расчетам Уайта и Уиппла [2], составляет несколько десятков миллионов лет. Однако падение на Солнце не для всех частиц является неизбежным. Дело в том, что уравнение (1) выведено в предположении сферичной формы частицы. В работе [4] показано, что для мелких (до 20 мкм) несферичных частиц влияние солнечного излучения не будет приводить к уменьшению перигелийного расстояния орбиты.

Эффект Пойнтинга — Робертсона очень важен при решении задач метеорной астрономии. За относительно небольшие интервалы времени этот эффект приводит к пространственному разделению частиц с разными массами (размерами) в метеорных роях.

НЕОБХОДИМОСТЬ ПОЛНОГО УЧЕТА УРАВНЕНИЯ РОБЕРТСОНА

Исторически сложилось так, что при исследовании эволюции метеорных орбит учет действия эффекта Пойнтинга — Робертсона ограничивался лишь вековыми членами. Полученные Робертсоном вековые изменения элементов орбиты в явном виде очень удобны для использования. Поскольку такие изменения происходят очень медленно, то их учет на короткие временные интервалы не вызывал интереса. Тем более, что подобные оценки необходимо проводить при полном решении уравнения (1), что возможно лишь численным методом.

Все же в метеорной астрономии есть задачи, которые нуждаются как в полном учете уравнения (1), так и в исследовании влияния солнечного излучения на эволюцию метеорных орбит в течение относительно коротких интервалов времени, порядка нескольких орбитальных оборотов частицы. Для более конкретного обоснования затронутого вопроса целесообразно рассмотреть изменение элементов орбиты частицы за счет эффекта Пойтинга — Робертсона в течение одного сидерического периода. В уравнении (2) члены в правой части, обусловленные солнечным излучением, представляют собой возмущающее ускорение. Из теории возмущенного движения известно, что скорость изменения большой полуоси возмущаемой орбиты (da/dt) можно выразить зависимостью лишь от одной составляющей возмущающего ускорения (например [3]):

$$\frac{da}{dt} = \frac{2a(2a - r)}{rV}\xi. \tag{3}$$

Здесь ξ — возмущающее ускорение вдоль вектора скорости частицы. Поскольку множитель при ξ всегда положителен, то знак правой части (3) определяется знаком возмущающего ускорения. В нашем случае явное выражение для ξ можно получить из (2):

$$\xi = \frac{Kc}{r^2}\left(1 - \frac{V_{\text{n}}}{c}\right)\mathbf{n} - \frac{K\mathbf{V}}{r^2}. \tag{4}$$

Если через α обозначить угол между векторами $\mathbf{V}$ и $\mathbf{r}$, то $V_{\text{n}} = V\cos\alpha$, проекция вектора $\mathbf{n}$ на направление движения частицы равна $\cos\alpha$, а V — модуль вектора $\mathbf{V}$. Следовательно,

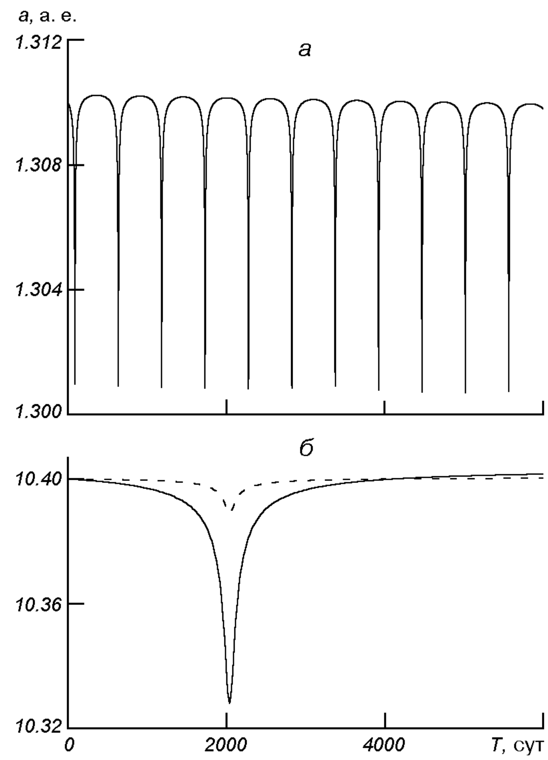
$$\xi = \frac{Kc}{r^2}\left(1 - \frac{V\cos\alpha}{c}\right)\cos\alpha - \frac{KV}{r^2}. \tag{5}$$

Видно, что второе слагаемое правой части выражения (5) всегда меньше нуля. Именно этот член обуславливает вековое уменьшение большой полуоси орбиты. Поскольку выражение в скобках первого слагаемого практически равно единице, то знак этого слагаемого определяется знаком $\cos\alpha$. Если эксцентриситет орбиты тела отличен от нуля, то при движении от перигелия к афелию угол α остается меньше 90°, поэтому первое слагаемое положительно. На другом участке орбиты (от афелия к перигелию) — отрицательно. По абсолютной величине первое слагаемое намного (порядка c/V) превосходит второе. Таким образом, при движении частицы от перигелия к афелию большая полуось ее орбиты будет увеличиваться, а при движении от афелия к перигелию — уменьшаться. Такие короткопериодические изменения большой полуоси определяются величиной первого слагаемого выражения (5). Поскольку первое слагаемое намного превосходит второе, то амплитуды таких изменений a будут гораздо больше векового уменьшения большой полуоси в течение одного периода обращения частицы по орбите.

Конкретные значения как для большой полуоси, так и для других элементов орбиты проще получить путем численного интегрирования, которое удобно выполнять в прямоугольных координатах. Скалярное произведение векторов $\mathbf{V}\cdot\mathbf{r} = V_{\text{x}}x + V_{\text{y}}y + V_{\text{z}}z = V\cdot r\cos\alpha$, откуда $V_{\text{n}} = (V_{\text{x}}x + V_{\text{y}}y + V_{\text{z}}z)/r$. Компоненты вектора $\mathbf{n}$ равны соответственно x/r, y/r и z/r. С учетом сделанных замечаний соответствующие уравнения для вторых производных будут иметь вид

$$\ddot{x} = G_{\text{x}} + K\left(c - \frac{V_{\text{x}}x + V_{\text{y}}y + V_{\text{z}}z}{r}\right)\frac{x}{r^3} - \frac{KV_{\text{x}}}{r^2}, \tag{6}$$

где через G_{x} выражены компоненты ускорения, обусловленного гравитаци-



Изменение большой полуоси орбит метеоров Геминид (*а*) и Леонид (*б*). Сплошная линия — для частиц δ = = 3 г/см^2, ρ = 0.05 см, штриховая — δ = 1 г/см^2, ρ = 1 см

онным влиянием Солнца. Аналогично записываются уравнения по другим координатам. Система уравнений (6) удобна тем, что здесь в выражение для негравитационного ускорения входят константы и те переменные, которые в явном виде уже используются для численных расчетов с учетом обычных гравитационных возмущений.

На основании метода, описанного в работе [1], была составлена программа численного интегрирования системы уравнений (6), и для нескольких орбит метеорных потоков Леонид и Геминид были выполнены расчеты на различные интервалы времени. Полученные изменения больших полуосей орбит приведены на рисунке.

Для роя Геминид видны как медленное вековое уменьшение *a*, так и относительно резкие скачки, минимумы которых соответствуют моментам прохождения частиц перигелиев орбит. Таким образом, описанный выше ход изменений большой полуоси, полученный на основании анализа формулы Робертсона, подтверждается численными расчетами. Для обеспечения нужной точности шаг интегрирования следует выбирать достаточно малым: для Леонид — не больше 2 сут, для Геминид — не больше 0.5 сут. Подобно большим полуосям изменяются и эксцентриситеты орбит. За такой же период времени частицы роя Леонид совершают меньше одного оборота, поэтому изменения *a* от перигелия к афелию видны более детально. Сплошной линией на рисунке обозначена эволюция орбит частиц с плотностями 3 г/см^3 и радиусами 0.05 см, что соответствует массам 0.0015 г. При наблюдениях метеорного потока Леонид в 2002 г. в Киеве телевизионным методом диапазон масс зарегистрированных частиц составлял 0.0005—0.004 г. Понятно, что с увеличением размеров частиц амплитуды отмеченных короткопериодических изменений *a* будут уменьшаться. Для примера штриховой линией показано изменение большой полуоси орбиты частицы размером 1 см и плотностью 1 г/см^3.

Для реальных метеорных частиц амплитуды отмеченных колебаний больших полуосей орбит относительно невелики — порядка 0.01—0.1 а. е. Тем не менее, при точных расчетах эволюции орбит метеоров на короткие временные интервалы эффект Пойнтинга — Робертсона нужно учитывать полностью. Примером таких расчетов могут служить вычисления моментов вылета метеороидов из ядра кометы. Соответствующие расчеты были нами выполнены для сгустка частиц метеорного роя Леонид, наблюдавшегося в Киеве 19 ноября 2002 г. в момент 4^h UT. Полученные из наблюдений орбиты были проинтегрированы в прошлое вместе с орбитой кометы Темпеля — Туттля, являющейся родительской кометой данного метеорного потока. С учетом планетных возмущений и вековых членов уравнения (1) наиболее вероятным моментом вылета частиц может быть 1767 г. Если уравнение (1) учитывать полностью, то более вероятным моментов вылета становится 1866 г. Необходимо более детальное исследование этого вопроса.

Известно, что выбросы частиц из ядер комет обычно происходят вблизи перигелиев орбит. Поэтому увеличение большой полуоси после перигелия приводит к тому, что частицы новорожденного потока (или сгустка) через пол-оборота уже будут иметь немного увеличенные значения больших полуосей орбит по сравнению с кометой-родоначальницей. Следовательно, даже не сближаясь с планетами после момента выброса, комета будет опережать молодой метеорный рой. Именно такая ситуация имеет место для кометы Темпеля — Тутля и наблюдавшегося в 2002 г. сгустка роя Леонид.

Из приведенного рисунка также видно, что вековые изменения больших полуосей орбит на коротких временных интервалах слабо зависят от размеров (или масс) частиц. В то же время короткопериодические изменения a сильно изменяются с изменением размеров. Этот эффект должен приводить к небольшому пространственному разделению частиц в молодых метеорных потоках.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Эффект Пойнтинга — Робертсона кроме векового уменьшения больших полуосей и эксцентриситетов приводит к заметным короткопериодическим колебаниям этих элементов орбит. Эти колебания следует учитывать при точных расчетах эволюции метеорных орбит на короткие интервалы времени.

Данный эффект приводит к отставанию от кометы сгустков частиц, выброшенных из ее ядра, а также к небольшому пространственному разделению частиц разных размеров уже в первые несколько оборотов после выброса.

1. *Казанцев А. М.* Простой метод численных расчетов эволюции орбит околоземных астероидов // Астрон. вестник.—2002.—**36**, № 1.—С. 48—54.
2. *Ловелл Б.* Метеорная астрономия. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958.—488 с.
3. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. — М.: Наука, 1968.—800 с.
4. *Klacka J., Kocifaj M.* On applicability of Poynting—Robertson effect // Asteroids, Comets, Meteors 2002 / Ed. B. Warmbein. — Noordwijk: European Space Agency, 2002.—P. 169—172.—(ESA Special publ. ser.).

Поступила в редакцию 24.06.05