

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Ю. С. Бондаренко, Ю. Д. Медведев

Институт прикладной астрономии Российской академии наук
Российская Федерация, 191187, г. Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10
E-mail: bondarenko@ipa.nw.ru

Разработана методика, позволяющая определять траекторию движения небесного тела в атмосфере Земли, параметры гелиоцентрической орбиты тела до его вхождения в атмосферу, а также оценивать основные факторы поражения ударной волной. Методика предусматривает исследование нескольких вариантов развития событий вследствие прохождения объекта в атмосфере Земли. В случае если объект прошел через атмосферу, не столкнувшись с Землей, определяются моменты входа и выхода тела из атмосферы Земли. Объект может столкнуться с Землей, не разрушившись. При этом дифференциальные уравнения интегрируются до достижения небесным телом поверхности Земли. Считалось, что объект сгорает в атмосфере, если его радиус становится менее 1 см. Отдельно рассматривался случай, когда во время движения объект разрушается, а до поверхности Земли долетают только фрагменты. Разработанная методика была реализована в программно-вычислительном комплексе. Одним из преимуществ комплекса является возможность сохранения результатов вычислений в файле формата .kml, позволяющем отображать трёхмерные геопространственные данные в программе «Google Планета Земля», а также на двухмерных картах Google. В нашем случае это траектория полета и ее проекция на поверхность Земли, места разрушения, взрыва и падения метеорита, области падения фрагментов и поражения ударной волной, а также другая полезная информация. Эффективность программно-вычислительного комплекса была проверена на движении астероида 2008 TC3 и метеорита «Челябинск». Было показано, что орбиты метеоритов 2008 TC3 и «Челябинск» до входа в атмосферу оказались близки к орбитам, полученным другими авторами, а параметры воздушных взрывов совпадают с исходными данными в пределах их точности. Полученные области падения фрагментов этих метеоритов находятся всего лишь в нескольких километрах от обнаруженных осколков. Зоны разрушений в результате действия воздушной ударной волны в случае метеорита «Челябинск» совпадают с реальными данными.

Ключевые слова: небесное тело, астероид, метеорит, гелиоцентрическая орбита, траектория движения, атмосфера Земли, воздушный взрыв, ударная волна, район падения.

Vestnik SibGAU
2014, No. 4(56), P. 16–24**DETERMINATION OF THE TRAJECTORY OF MOTION OF CELESTIAL BODIES
IN THE EARTH'S ATMOSPHERE**

Yu. S. Bondarenko, Yu. D. Medvedev

Institute of Applied Astronomy of Russian Academy of Sciences
10, Kutuzova nab., St. Petersburg, 191187, Russian Federation
E-mail: bondarenko@ipa.nw.ru

The authors have developed and realized the method, allowing to determine the trajectory of motion of celestial bodies in the Earth's atmosphere, to determine the parameters of heliocentric orbit of celestial bodies prior to its entry into the atmosphere, as well as to estimate major factors of damage due the blast wave. The method researches several scenarios due to the passage of the object in the Earth's atmosphere. In case the object passed through the atmosphere, without colliding with the Earth, the moments of an entrance and exit of a body from the Earth's atmosphere are determined. The object can collide with the Earth without breakup. In this case, the differential equations are integrated until the celestial body reaches the Earth's surface. It was assumed that the object burns in the atmosphere, if its radius becomes less than 1 cm. The case when object breaks up during the motion and only the fragments reach the Earth's surface was considered separately. The developed method has been implemented in the software package. One of the advantages of the package is the ability to save the results of calculations in the .kml format, allowing to display three-dimensional geospatial data in the "Google Earth" as well as two-dimensional data in "Google" maps. In our case these data are the flight trajectory and its projection to the Earth's surface, the places of meteorite break up and air burst, the impact areas of the fragments, the overpressure areas due the blast wave, as well as other useful information.

Using this method the motion of Chelyabinsk and 2008 TC3 meteorites were simulated. It was shown that heliocentric orbital elements of the Chelyabinsk and 2008 TC3 meteorites before entering the Earth's atmosphere calculated using the developed software are close to the parameters obtained by other authors, the trajectory parameters are in good agreement with the initial data within their accuracy. Estimated impact areas of meteorites fragments are only in few kilometers from the recovered one. The overpressure areas due the blast wave in case of "Chelyabinsk" meteorite coincide with the real data.

Keywords: celestial body, asteroid, meteorite, heliocentric orbit, trajectory of motion, Earth's atmosphere, air blast, blast wave, impact area.

Введение. Основными возмущающими факторами в движении малых тел в Солнечной системе являются притяжения больших планет, которые в большинстве случаев рассматриваются как материальные точки. Однако в случае тесного сближения или столкновения исследуемого объекта с Землей необходимо учитывать такие факторы, как влияние несферичности, возмущение, оказываемое атмосферой Земли, масса, состав и форма самого тела, что представляет определенную сложность для исследователей. В связи с этим возникает необходимость в разработке методики, позволяющей производить достаточно точную оценку траектории тела при его движении как вблизи, так и в атмосфере Земли.

Динамическая модель. В разработанной динамической модели, в случае если изучаемый объект движется вне земной атмосферы, уравнения движения задаются в прямоугольной гелиоцентрической системе координат и имеют вид

$$\ddot{\vec{r}} = \vec{W}_1' + \vec{W}_2' + \vec{W}_3',$$

где \vec{W}_1' – гравитационное ускорение от Солнца; \vec{W}_2' – возмущающие ускорения, определяемые притяжением изучаемого объекта планетами; \vec{W}_3' – релятивистские поправки.

Если же тело вошло в атмосферу Земли, то происходит переход к геоцентрической системе координат, а уравнения движения изменяются. В них добавляются слагаемые, учитывающие сжатие Земли и сопротивление атмосферы. Также добавляется дифференциальное уравнение, описывающее изменение размера объекта вследствие его торможения в атмосфере:

$$\begin{cases} \ddot{\vec{r}} = \vec{W}_1 + \vec{W}_2 + \vec{W}_3; \\ \dot{R} = V_1, \end{cases}$$

где \vec{W}_1 – гравитационное ускорение от Земли с учетом сжатия; \vec{W}_2 – гравитационные возмущения от Солнца и планет Солнечной системы; \vec{W}_3 – сопротивление атмосферы; V_1 – скорость изменения размера объекта.

Возмущающее ускорение \vec{W}_3 , учитывающее сопротивление атмосферы, задается в виде

$$\vec{W}_3 = - \underbrace{\frac{1}{2} C_D \rho_a v^2}_{A} \left(\frac{S_{mid}}{m} \right) \vec{v},$$

где C_D – коэффициент сопротивления воздуха; ρ_a – плотность воздуха; \vec{v} – вектор скорости объекта относительно атмосферы Земли; v – модуль вектора

скорости; отношение миделева сечения S_{mid} к массе объекта m характеризует парусность [1]. Для удобства буквой P обозначено давление, оказываемое воздухом на тело, а буквой A – сопротивление воздуха.

Считая, что часть энергии, возникающей из-за сопротивления атмосферы, идет на разогрев и испарение вещества с поверхности тела, а сам объект в результате испарения имеет и сохраняет сферическую форму, скорость изменения радиуса тела будет определяться следующим выражением:

$$V_1 = -\gamma \frac{RAv}{K},$$

где γ – количество энергии, идущей на сублимацию вещества; R – радиус объекта; K – тепло, необходимое для испарения 1 кг вещества.

Возможное развитие событий. Методика предусматривает исследование нескольких вариантов развития событий вследствие прохождения объекта в атмосфере Земли. В случае если объект прошел через атмосферу, не столкнувшись с Землей, определяются моменты входа и выхода тела из атмосферы Земли. Объект может столкнуться с Землей, не разрушившись. При этом дифференциальные уравнения интегрируются до достижения небесным телом поверхности Земли. Считалось, что объект сгорает в атмосфере, если его радиус R становится менее 1 см. Отдельно рассматривался случай, когда во время движения объект разрушается, а до поверхности Земли долетают только фрагменты.

Разрушение тела происходит при достижении давления воздуха на тело P величины критического значения P_{max} . Значения критического давления для различных материалов исследуемого объекта представлены в табл. 1 [2]. В зависимости от заданной плотности значения критического давления определяются по табл. 1 интерполяцией.

Таблица 1

Величины критического давления для различных материалов

| Материал | Плотность, кг/м ³ | P_{max} , Па |
|-----------------|------------------------------|----------------|
| Лед | 1000 | 10^4 |
| Пористая порода | 1500 | 10^5 |
| Плотная порода | 3600 | 10^7 |
| Железо | 8000 | 10^8 |

Достигнув критического давления, тело разрушается, однако некоторое время фрагменты тела движутся как единое целое, отдаляясь друг от друга со скоростью $V = \sqrt{\rho_a / \rho} v_T$, где v_T – модуль вектора скорости тела в момент разрушения; ρ – плотность тела [3]. После разрушения скорость изменения размера

объекта V_1 в системе берется равной V . Из-за разницы давлений на переднюю и заднюю поверхности раздробленное тело как-бы расширяется перпендикулярно траектории движения до тех пор, пока отношение текущего радиуса к радиусу тела в момент разрушения $R(t)/R$ не достигнет заданного предела. Оценки этой величины у разных авторов [4; 5] варьируются в пределах от 2 до 10. В разработанной динамической модели считается, что воздушный взрыв происходит в момент, когда значение $R(t) = 5R$ при условии, что тело к этому моменту не достигло поверхности Земли. С этого момента считается, что фрагменты начинают двигаться по независимым траекториям, а следствием их быстрого торможения является ударная волна.

Параметром ударной волны, определяющим ее воздействие на различные объекты, является максимальное избыточное давление на фронте Δp_m . На основе опытных данных для сферической ударной волны была получена эмпирическая зависимость [6]

$$\Delta p_m = 0,084 \frac{E^{\frac{1}{3}}}{l} + 0,27 \frac{E^{\frac{2}{3}}}{l^2} + 0,7 \frac{E}{l^3},$$

где E – энергия взрыва, измеряющаяся в кг тротилового эквивалента; l – расстояние от центра взрыва, м; избыточное давление на фронте ударной волны Δp_m измеряется в МПа. Эта формула справедлива для взрывов большой мощности: $E > 100$ кг ТНТ в диапазоне $0,01 < \Delta p_m < 1$ МПа.

Прямое воздействие избыточного давления на фронте ударной волны приводит к частичному или полному разрушению зданий, сооружений и других объектов. В зависимости от величины избыточного давления выделяют различные зоны разрушений [7], значения которых представлены в табл. 2. Очаг поражения на равнинной местности условно ограничивается радиусом с избыточным давлением 10 кПа (0,1 кгс/см).

Энергия воздушного взрыва определяется количеством энергии, выделившейся при торможении разрушающегося тела, по формуле

$$E = \eta \frac{1}{2} m v_T^2,$$

где m – масса тела в момент разрушения; η – доля энергии, выделившейся почти мгновенно при торможении мелких осколков. Таким образом, зная энергию и высоту взрыва, находят размеры зон разрушений.

Таблица 2

Разрушения при воздействии ударной волны

| Зоны разрушений | Δp_m , кПа |
|-------------------------------------|--------------------|
| Порог прочности стекла | 1 |
| Разбиты 10 % стекол | 2 |
| Незначительные повреждения построек | 5 |
| Частичное разрушение | 10 |
| Средние разрушения | 20 |
| Сильные разрушения | 30 |
| Полное разрушение | 50 |

Предположим, что во время движения тела в атмосфере Земли в какой-то момент времени T произошло

разрушение объекта на фрагменты. Для оценки области падения в разработанной методике совместно интегрируется движение 4 фрагментов, которые разлетаются в противоположных направлениях в плоскости, перпендикулярной вектору скорости тела в момент разрушения \bar{v}_T со скоростями $V = \sqrt{\rho_a / \rho v_T}$. Эти направления изображены на рис. 1. В таком случае векторы скорости каждого из четырех фрагментов $\bar{v}_W, \bar{v}_E, \bar{v}_N$ и \bar{v}_S задаются формулами

$$\bar{v}_W = \bar{v}_T + V \frac{\bar{\omega}}{|\bar{\omega}|}; \quad \bar{v}_N = \bar{v}_T + V \frac{\bar{\omega} \times \bar{r}_T}{|\bar{\omega} \times \bar{r}_T|};$$

$$\bar{v}_E = \bar{v}_T - V \bar{v}_W; \quad \bar{v}_S = \bar{v}_T - V \bar{v}_N,$$

где $\bar{\omega} = \bar{v}_T \times \bar{r}_T$; \bar{r}_T – вектор положения тела в момент разрушения. Радиус фрагментов берется равным $R_f = R_T / n$, где n – число фрагментов; R_T – радиус объекта в момент разрушения. Координаты мест падения фрагментов, обозначенные на рис. 1 точками W, E, N и S, вычисляются с учетом параметров прецессии и нутации оси Земли, а область падения аппроксимируется эллипсом, проходящим через эти точки.

Разработанная методика была реализована в программно-вычислительном комплексе. Одним из преимуществ комплекса является возможность сохранения результатов вычислений в файле формата .kml, позволяющем отображать трёхмерные геопространственные данные в программе «Google Планета Земля» [8], а также на двухмерных картах Google. В нашем случае это траектория полета и ее проекция на поверхность Земли, места разрушения, взрыва и падения метеорита, области падения фрагментов и поражения ударной волной, а также другая полезная информация. Эффективность программно-вычислительного комплекса была проверена на движении астероида 2008 TC3 и метеорита «Челябинск».

Астероид 2008 TC3. Астероид 2008 TC3 был открыт утром 6 октября 2008 г. в обсерватории Маунт-Леммон. Оперативные вычисления предварительной орбиты показали, что этот астероид должен столкнуться с Землей в ближайшие 24 часа. Это было первое небесное тело, обнаруженное до входа в атмосферу Земли. Его диаметр оценивался в пределах от 2 до 5 м. 7 октября метеорит разрушился при падении в атмосфере над пустынной территорией Судана на высоте 37 км с координатами 20.8° с. ш. и 32.2° в. д. [9]. Позднее были найдены более 600 фрагментов астероида общей массой 10,7 кг [10].

На первом этапе, используя метод определения орбит, основанный на переборе орбитальных плоскостей [11], были получены элементы гелиоцентрической орбиты (табл. 3), которые представляют 589 позиционных наблюдений астероида 2008 TC3 со среднеквадратической ошибкой $\sigma = 2.0''$ на эпоху 2454746.5 JD (7 октября 2008 г.). Эти элементы задают так называемую номинальную орбиту, т. е. удовлетворяющую условиям метода наименьших квадратов. Для сравнения в табл. 3 также приведены элементы орбит, полученные Лабораторией реактивного движения (JPL).

Далее, используя полученные элементы орбиты, было произведено моделирование движения астероида 2008 TC3 до момента его столкновения с Землей. В принятой модели в уравнениях движения учитывались гравитационные возмущения от всех больших планет, Луны и Плутона. Координаты возмущающих планет вычислялись по численной эфемериде EPM [13]. Численное интегрирование уравнений движения выполнялось методом Рунге–Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага по величине скорости. Плотность воздуха вычислялась по таблицам стандартной атмосферы США 1976 [14], в которой атмосфера разделена на семь последовательно расположенных слоев с линейной зависимостью температуры от высоты. Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом вращения [15]. Полагая, что объект имел сферическую форму, коэффициент сопротивления

воздуха C_D принимался равным 2 [2]. Количество энергии, идущей на сублимацию вещества γ , для основного тела бралось равным 10^{-3} , а для фрагментов – 10^{-2} . Также считалось, что для испарения 1 кг вещества астероида 2008 TC3 необходимо 600 кал/г.

Результаты моделирования движения астероида 2008 TC3 в атмосфере Земли представлены на рис. 2, где изображен снимок местности со спутника, на котором черной линией показана траектория движения метеорита, полученная по элементам номинальной орбиты, а белой линией – ее проекция на поверхность Земли. Места начала разрушения и взрыва метеорита обозначены буквами А и В соответственно, а их параметры в сравнении со спутниковыми данными [9] приведены в табл. 4. Цифрами отмечены места обнаруженных фрагментов метеорита, а их массы и координаты [10] приведены в табл. 5.

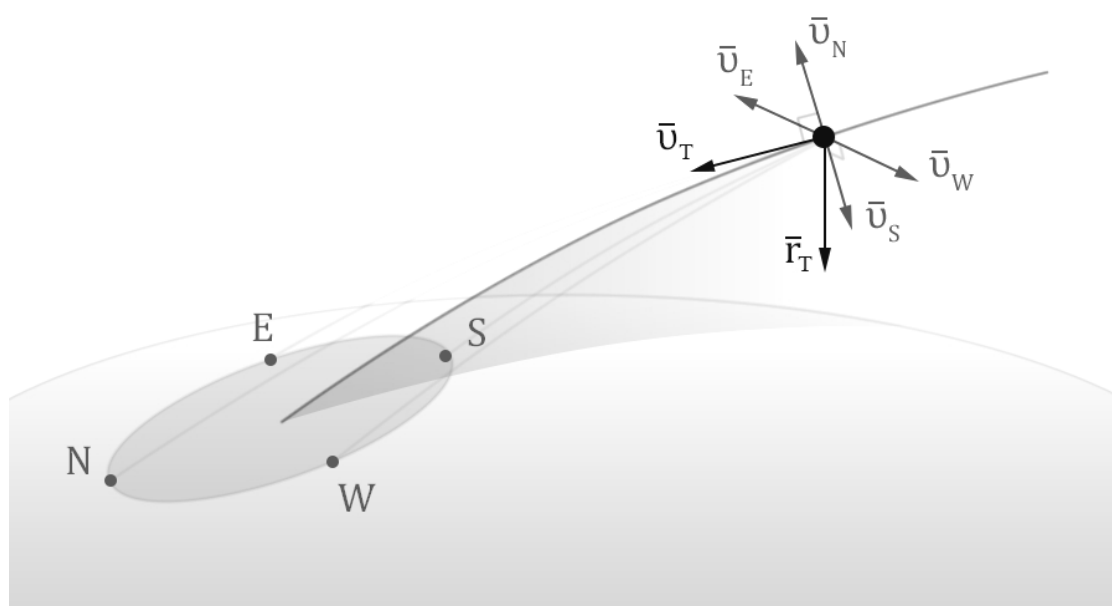


Рис. 1. Определение области падения фрагментов

Таблица 3

Элементы орбиты астероида 2008 TC3 на эпоху 7 октября 2008 г.

| Автор | M (°) | ω (°) | Ω (°) | i (°) | e | n (°/сут) |
|----------|----------|--------------|--------------|--------|----------|-----------|
| ИПА | 330.7502 | 234.4474 | 194.1011 | 2.5416 | 0.311995 | 0.658783 |
| JPL [12] | 330.7541 | 234.4490 | 194.1011 | 2.5422 | 0.312065 | 0.658707 |

Таблица 4

Параметры мест начала разрушения и взрыва астероида 2008 TC3

| Параметр | ИПА | | Спутниковые данные (NASA/JPL, 2008) |
|------------------|------------|----------|-------------------------------------|
| | Разрушение | Взрыв | |
| Высота, км | 36,9 | 35,2 | 37 |
| Время, УТ | 02:45:51 | 02:45:51 | 02:45:45 |
| Широта, ° с. ш. | 20.72 | 20.71 | 20.8 |
| Долгота, ° в. д. | 32.15 | 32.19 | 32.2 |

Таблица 5

Параметры найденных фрагментов астероида 2008 TC3

| Параметр | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Масса, г | 4,412 | 78,201 | 65,733 | 141,842 | 378,710 | 259,860 | 303,690 |
| Широта, ° с. ш. | 20.77 | 20.74 | 20.74 | 20.70 | 20.68 | 20.70 | 20.70 |
| Долгота, ° в. д. | 32.29 | 32.33 | 32.36 | 32.49 | 32.50 | 32.50 | 32.52 |



Рис. 2. Результаты моделирования движения метеорита 2008 TC3 в атмосфере Земли

Из табл. 5 видно, что массы обнаруженных фрагментов не превышают килограмма, поэтому после взрыва метеорита производилось моделирование движения фрагментов с массами в диапазоне от 100 до 700 г. Программно-вычислительный комплекс позволяет одновременно проводить оценку области падения для заданного количества фрагментов разных размеров, сохраняя все полученные данные в файлы. На рисунке отмечены вероятные области падения фрагментов различных масс, полученные по номинальной орбите и двум ее вариациям. Буквами *A* и *B* обозначены области выпадения фрагментов с наименьшей и наибольшей массами соответственно. На рис. 2 видно хорошее соответствие полученных результатов оценки областей падения с найденными фрагментами, а небольшие отклонения можно объяснить, например, воздействием ветра [10]. Данные табл. 4 также говорят о хорошем соответствии результатов моделирования и данных, полученных со спутника.

Метеорит «Челябинск». Утром 15 февраля 2013 г. в небе над Челябинском наблюдалась яркая вспышка, которая была вызвана относительно небольшим астероидом приблизительно 17–20 м в диаметре, вошедшим в атмосферу Земли на высокой скорости и под небольшим углом. В этот момент высвободилось огромное количество энергии, а само тело разрушилось на множество частей разных размеров, которые упали на землю. Так как это событие произошло над крупнонаселенным городом, оно отличается от подобных ему числом показаний очевидцев. Оно было зафиксировано большим количеством видеорегистраторов и видеокамер. Кроме того, метеорологические спутники

Meteosat 9 и Meteosat 10 смогли сфотографировать конденсационный след от пролёта метеорита в атмосфере Земли [16], а со дна озера Чебаркуль был поднят осколок метеорита размером около метра и весом приблизительно 600 кг.

Для моделирования движения метеорита в качестве начальных параметров были использованы наиболее точные на сегодняшний день данные, которые были получены аппаратурой, установленной на геостационарных спутниках, работающих в интересах Министерства обороны США и Министерства энергетики США. Эта аппаратура позволяет отслеживать воздушные ядерные взрывы, а также измерять кривые светимости сгорающих в атмосфере болидов. По этим данным момент максимальной яркости произошел 15 февраля 2013 г. в 03:20:33 по Гринвичу на высоте 23,3 км с координатами 54.8° с. ш. и 61.1° в. д. Скорость объекта в момент максимальной яркости составляла 18,6 км/с, а выделившаяся энергия – 440 Кт в тротиловом эквиваленте [17].

Азимут траектории и наклон, полученные колумбийскими астрономами [18] по многочисленным записям с видеорегистраторов и камер видеонаблюдения, брались соответственно $285 \pm 2^\circ$ и $15,8 \pm 0,3^\circ$. Найденные остатки метеорита говорят о том, что это был обычный хондрит [19] плотностью примерно $3,6 \text{ г/см}^3$. Диаметр объекта до входа в атмосферу брался равным 18 м.

По этим параметрам были вычислены элементы гелиоцентрической орбиты объекта до его входа в атмосферу на эпоху 2456336.5 JD (13 февраля 2013 г.). Эти элементы, в сравнении с результатами других авторов, представлены в табл. 6 в первой строке.

Сравнение параметров полученной гелиоцентрической орбиты

| Автор | q (а. е.) | e | ω (°) | Ω (°) | i (°) | a (а. е.) |
|---------------|-----------|------|--------------|--------------|-------|-----------|
| ИПА | 0.70 | 0.56 | 100.90 | 326.46 | 4.27 | 1.60 |
| Zuluaga [18] | 0.71 | 0.48 | 97.98 | 326.47 | 4.31 | 1.37 |
| IAU 3423 [20] | 0.77 | 0.5 | 109.7 | 326.41 | 3.6 | 1.55 |
| ИНАСАН [21] | 0.74 | 0.58 | 108.3 | 326.44 | 4.93 | 1.76 |
| ХНУ [22] | 0.65 | 0.65 | 97.2 | 326.42 | 12.06 | 1.83 |

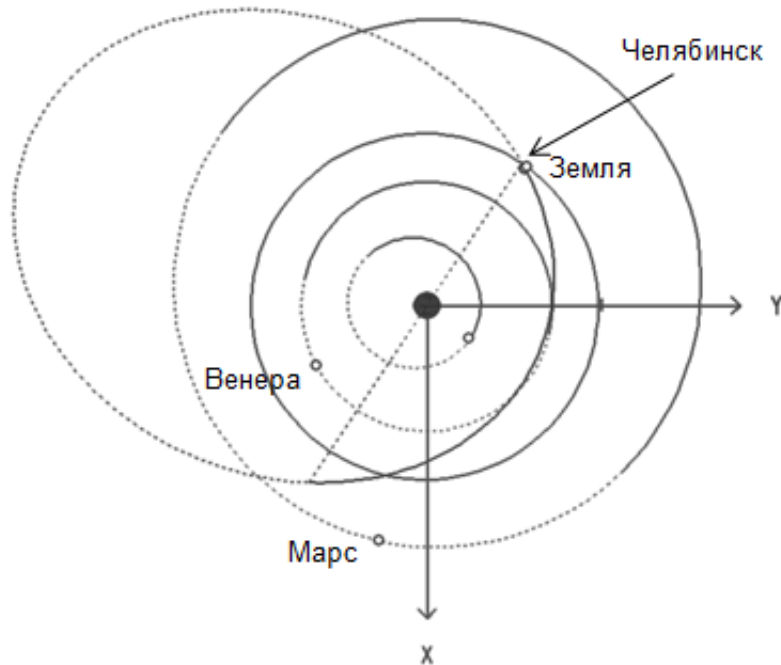


Рис. 3. Гелиоцентрическая орбита метеорита «Челябинск»



Рис. 4. Результаты моделирования движения метеорита «Челябинск» в атмосфере Земли



Рис. 5. Области падения фрагментов метеорита «Челябинск»

На рис. 3 изображена гелиоцентрическая орбита метеорита «Челябинск» в плоскости эклиптики по вычисленным элементам, полученная с помощью программно-вычислительного комплекса HALLEY [23]. Как видно из рис. 3, орбита астероида достигает орбиты Венеры в перигелии и пояса астероидов в афелии. Численный расчет эволюции показывает, что астероид мог двигаться по этой орбите в течение тысяч лет, многократно пересекая орбиту Земли. Вероятно, что этот астероид образовался в результате столкновительных процессов в главном поясе. Находясь в перигелии своей орбиты приблизительно за два с половиной месяца до столкновения, он приближался к Земле со стороны Солнца, что помешало его заблаговременному обнаружению обсерваториями, ведущими постоянный мониторинг за малыми телами Солнечной системы.

Далее, как и в случае астероида 2008 TC3, по вычисленным элементам гелиоцентрической орбиты были получены параметры разрушения и взрыва метеорита в атмосфере Земли, представленные в табл. 7.

Таблица 7

Параметры мест начала разрушения и взрыва метеорита «Челябинск»

| Параметр | Разрушение | Взрыв |
|------------------|------------|----------|
| Высота, км | 27,7 | 24,5 |
| Время, УТ | 03:20:32 | 03:20:33 |
| Широта, ° с. ш. | 54.78 | 54.81 |
| Долгота, ° в. д. | 61.20 | 61.04 |

Черной линией на рис. 4 показана траектория падения, белой – проекция траектории, места разрушения

и взрыва в точках А и В соответственно, области падения фрагментов, а также отмечены ближайшие населенные пункты, наложенные на спутниковый снимок местности.

По расчетам, в момент взрыва произошло выделение 474 кт ТНТ энергии. При этом радиус зоны разрушения с избыточным давлением на фронте ударной волны в 1 кПа оказывается равным 127 км и 51 км – для 2 кПа. Такие значения давления соответствуют порогу прочности стекла (см. табл. 2). Зоны разрушения изображены на рис. 4 белыми окружностями.

После взрыва метеорита производилось моделирование движения 20 групп фрагментов с размерами в диапазоне от 1,8 до 0,4 м. На рис. 5 звездочкой отмечено место падения самого крупного фрагмента метеорита размером около метра и массой 654 кг, найденного в озере Чебаркуль [24]. Цифрами 1, 2 и 3 обозначены полученные вероятные области падения фрагментов, находящиеся в непосредственной близости от найденного осколка, а их параметры представлены в табл. 8.

Таблица 8

Параметры областей падения фрагментов

| Параметр | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------------|----------|----------|----------|
| Размер фрагмента, м | 0,7 | 0,6 | 0,6 |
| Масса фрагмента, кг | 646 | 517 | 420 |
| Широта центра области, ° с. ш. | 54.94 | 54.93 | 54.93 |
| Долгота центра области, ° в. д. | 60.31 | 60.33 | 60.35 |
| Размер области, м | 1270×354 | 1216×346 | 1166×336 |

Заключение. Полученные в работе результаты показывают, что разработанная методика позволяет рассчитывать траекторию небесного тела в атмосфере Земли, параметры гелиоцентрической орбиты тела до его вхождения в атмосферу оценивать район падения осколков и основные факторы поражения. Было показано, что орбиты метеоритов 2008 TC3 и «Челябинск» до входа в атмосферу оказались близки к орбитам, полученным другими авторами, а параметры воздушных взрывов совпадают с исходными данными в пределах их точности. Полученные области падения фрагментов этих метеоритов находятся всего лишь в нескольких километрах от обнаруженных осколков. Зоны разрушений в результате действия воздушной ударной волны в случае метеорита «Челябинск» совпадают с реальными данными [25], по которым около 7320 зданий получили повреждения. В одних зданиях были разбиты стекла, в других из окон полностью выбило рамы. В Еткульском районе, ставшим эпицентром взрыва, были повреждены 865 окон в жилых домах и 1,1 тыс. окон в остальных зданиях.

Библиографические ссылки

1. Аксенов Е. П. Теория движения искусственных спутников Земли. М. : Наука, 1977. 360 с.
2. Svetsov V. V., Nemtchinov I. V. Disintegration of Large Meteoroids in Earth's Atmosphere: Theoretical Models // *Icarus*. 1995. Vol. 116. P. 131–153.
3. Passey Q. R., Melosh H. J. Effects of atmospheric breakup on crater field formation // *Icarus*. 1989. 42. P. 211–233.
4. Ivanov B. A., Deniem D., Neukum G. Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering // *International Journal of Impact Engineering*. 1997. P. 411–430.
5. Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J. The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid // *Nature*. 1993. P. 40–44.
6. Физика взрыва / С. Г. Андреев [и др.] ; под ред. Л. П. Орленко. В 2 т. Т. 1. 3-е изд., перераб. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 с.
7. Атаманюк В. Г., Ширшев Л. Г., Акимов Н. И. Гражданская оборона : учебник для вузов / под ред. Д. И. Михайлика. М. : Высш. шк., 1986. 207 с.
8. Google [Электронный ресурс]. URL: <http://www.google.com/earth/> (дата обращения: 15.07.2014).
9. NASA/JPL [Электронный ресурс]. URL: <http://neo.jpl.nasa.gov/news/2008tc3.html/> (дата обращения: 15.07.2014).
10. The recovery of asteroid 2008 TC3 / M. H. Shaddad [et. al.] // *Meteoritics & Planetary Science*. 2010. P. 1–33.
11. Бондаренко Ю. С., Вавилов Д. Е., Медведев Ю. Д. Метод определения орбит малых тел Солнечной системы, основанный на переборе орбитальных плоскостей // *Астрономический вестник*. 2014. Т. 48, № 3. С. 229–233.
12. JPL Solar System Dynamics, 2014, SPK-ID: 3430291 [Электронный ресурс]. URL: <http://ssd.jpl.nasa.gov/> (дата обращения: 15.07.2014).
13. Питьева Е. В. Фундаментальные национальные эфемериды планет и Луны (ЕРМ) Института прикладной астрономии РАН: динамическая модель, параметры, точность // *Труды ИПА РАН*. СПб. : Наука, 2012. Вып. 23. С. 364–367.
14. U. S. Standard Atmosphere / U. S. Government Printing Office. Washington, D.C., 1976.
15. Groten E. Report of the IAG. Special Commission SC3, Fundamental Constants. XXII. 1999. IAG General Assembly.
16. NOAA [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nvpl.noaa.gov/MediaDetail2.php?MediaID=1290&MediaTypeID=1/> (дата обращения: 15.07.2014).
17. NASA/JPL [Электронный ресурс]. URL: http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html/ (дата обращения: 15.07.2014).
18. Zuluaga J. I., Ferrin I., Geens S. The orbit of the Chelyabinsk event impactor as reconstructed from amateur and public footage. 2013. arXiv:1303.1796.
19. Mineralogy, reflectance spectra, and physical properties of the Chelyabinsk LL5 chondrite – Insight into shock induced changes in asteroid regoliths / T. Kohout [et al.] // *Icarus*. 2014. V. 228. P. 78–85.
20. Central Bureau for Astronomical Telegrams, IAU. Electronic Telegram No. 3423: Trajectory and Orbit of the Chelyabinsk Superbolide, 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.icq.eps.harvard.edu/CBET3423.html/> (дата обращения: 15.07.2014).
21. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 г. / В. В. Емельяненко [и др.] // *Астр. вестн.*, 2013. Т. 47, № 4. С. 262–277.
22. Голубев А. В. Основные характеристики движения метеороида при выпадении челябинского метеоритного дождя 15 февраля 2013 г. // *Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль* : материалы конф. 2013. С. 70.
23. Бондаренко Ю. С. Halley – электронные эфемериды // *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. Пулково-2012* : Тр. Всерос. астрометрической конференции. 2013. № 220 С.169–172.
24. URA.RU, Метеорит «Челябинск» доставили в краеведческий музей [Электронный ресурс]. URL: <http://ura.ru/content/chel/17-10-2013/news/1052167381.html> (дата обращения: 15.07.2014).
25. Газета.Ру, Метеорит не чрезвычайный [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gazeta.ru/social/2013/03/05/5000389.shtml/> (дата обращения: 15.07.2014).

References

1. Aksenov E. P. *Teorija dvizhenija iskusstvennykh sputnikov Zemli*. [Theory of the motion of the Earth's artificial satellites]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 360 p.
2. Svetsov V. V., Nemtchinov I. V., Disintegration of Large Meteoroids in Earth's Atmosphere: Theoretical Models. *Icarus*, 1995, vol. 116, p. 131–153.
3. Passey Q. R., Melosh H. J. Effects of atmospheric breakup on crater field formation. *Icarus* 1989, vol. 42, p. 211–233.

4. Ivanov B. A., Deniem D., Neukum G. Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, p. 411–430.
5. Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J. The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature*, 1993, p. 40–44.
6. Andreev S. G., Babkin A.V. *Fizika vzryva*. [The physics of the explosion]. Vol. 1. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, 832 p.
7. Atamanjuk V. G., Shirshov L. G., Akimov N. I. *Grazhdanskaja oborona: Uchebnik dlja vuzov*. [Civil defense: Textbook for Universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986, 207 p.
8. Google. Available at: <http://www.google.com/earth/> (accessed: 15.07.2014).
9. NASA/JPL. Available at: <http://neo.jpl.nasa.gov/news/2008tc3.html/> (accessed: 15.07.2014).
10. Muawia H. Shaddad, Peter Jenniskens et. al. The recovery of asteroid 2008 TC3. *Meteoritics & Planetary Science*, 2010, P. 1–33.
11. Bondarenko Yu. S., Vavilov D. E., Medvedev Yu. D. [Method for the determination of the orbits of small bodies of the solar system, based on the enumeration of orbital planes]. *Astronomicheskij Vestnik*. 2014, vol. 48, no 3, p. 229–233. (In Russ.)
12. JPL Solar System Dynamics, 2014, SPK-ID: 3430291. Available at: <http://ssd.jpl.nasa.gov/> (accessed: 15.07.2014).
13. Pit'eva E. V. *Fundamental'nye natsional'nye jefemeridy planet i Luny (EPM) Instituta prikladnoj astronomii RAN: dinamicheskaja model', parametry, tochnost'* [Fundamental national ephemeris of planets and the moon (EPM) of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences: a dynamic model parameters, accuracy] St. Petersburg, Nauka Publ., Proc. of IAA RAS., 2012, vol. 23, p. 364–367. (In Russ.)
14. U. S. Standard Atmosphere, 1976, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976.
15. Groten, E. Report of the IAG. Special Commission SC3, Fundamental Constants, XXII, 1999, IAG General Assembly.
16. NOAA. Available at: <http://www.nvvl.noaa.gov/MediaDetail2.php?MediaID=1290&MediaTypeID=1/> (accessed: 15.07.2014).
17. NASA/JPL. Available at: http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html/ (accessed: 15.07.2014).
18. Zuluaga J. I., Ferrin I., Geens S., The orbit of the Chelyabinsk event impactor as reconstructed from amateur and public footage, 2013, arXiv:1303.1796.
19. Kohout T. et al. Mineralogy, reflectance spectra, and physical properties of the Chelyabinsk LL5 chondrite – Insight into shock induced changes in asteroid regoliths. *Icarus*, 2014, vol. 228, p. 78–85.
20. Central Bureau for Astronomical Telegrams, IAU. Electronic Telegram No. 3423: Trajectory and Orbit of the Chelyabinsk Superbolide, 2013 Available at: <http://www.icq.eps.harvard.edu/CBET3423.html/> (accessed: 15.07.2014).
21. Emel'janenko V. V., Popova O. P., Chugaj N. N. i dr. [Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event February 15, 2013] *Astronomicheskij Vestnik*. 2013, vol. 47, no 4, p. 262–277 (In Russ.)
22. Golubev A. V. [The main characteristics of the motion of the meteoroid at loss Chelyabinsk meteor shower 15 February 2013] *Materialy konferentsii "Asteroidy i komety. Cheljabinskoe sobytie i izuchenie padenija meteorita v ozero Chebarkul"* [Proceedings of the conference “Asteroids and comets. Chelyabinsk event and the study of meteorite falling into the lake Chebarkul”]. 2013, p. 70 (In Russ.)
23. Bondarenko Ju. S. [Halley – electronic ephemeris] *Izvestija Glavnoj astronomicheskoy observatorii v Pulkove. Trudy vserossijskoj astrometricheskoy konferencii "Pulkovo-2012"*. [Proceedings of the Main Astronomical Observatory at Pulkovo. Proceedings of the All-Russian Conference astrometric “Pulkovo-2012”]. St. Petersburg, 2013, vol. 220, p. 169–172 (In Russ.)
24. *URA.RU, Meteorit "Cheljabinsk" dostavili v Kraevedcheskij muzej*. [Meteorite “Chelyabinsk” was taken to the Museum of Local History]. (In Russ.). Available at: <http://ura.ru/content/chel/17-10-2013/news/1052167381.html> (accessed: 15.07.2014).
25. *Gazeta.Ru, Meteorit ne chrezvychajnyj* [Meteorite is not an emergency]. (In Russ.). Available at: <http://www.gazeta.ru/social/2013/03/05/5000389.shtml/> (accessed: 15.07.2014).