

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra23.02.104>УДК 551.558, 551.596,
534.221

Л. Ф. ЧЕРНОГОР, Ю. Б. МИЛОВАНОВ

PACS numbers: 93, 96.30.Ys

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

ДИНАМИКА ПАДЕНИЯ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА: ВЫСОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Предмет и цель работы: Получение высотных и временных зависимостей скорости, ускорения, массы и миделя фрагментов метеороида на основе измеренных траекторных данных.

Методы и методология: Проведены численные расчеты изменения скорости, ускорения, массы и миделя Челябинского космического тела с высотой и со временем. Показано, что подходящей аппроксимацией этих зависимостей является аппроксимация сплайнами третьего порядка. Результаты моделирования сравнены с результатами измерения интенсивности свечения.

Результаты: С использованием уравнений метеорной физики с учетом силы торможения, силы тяжести и силы Кориолиса были получены регрессионные временные зависимости для высоты и географических координат метеороида; зависимости его скорости, ускорения, массы, интенсивности излучения от времени и высоты. Во всех случаях проведена аппроксимация кубическими сплайнами. Показано, что в интервале времени 03:20:32–03:20:36 UT при уменьшении высоты от 40 до 15 км скорость уменьшилась примерно в 3 раза. Среднее торможение составило около -4 км/с^2 . В этом же диапазоне высот отмечалось максимальное торможение -6 км/с^2 . По зависимостям скорости и интенсивности свечения от времени построены зависимости массы метеороида от времени и высоты. Определено, что наиболее существенное изменение массы отмечалось в 03:20:32–03:20:33 UT, по расчетам оно составляло 5 кг. По установленным зависимостям скорости, торможения, скорости уноса массы и миделя метеороида от времени и высоты оценен коэффициент динамического сопротивления воздуха.

Заключение: С использованием сплайнов третьего порядка получены регрессии, описывающие временные зависимости высоты и географических координат Челябинского метеороида. По измеренным траекторным данным рассчитаны временные зависимости скорости и ускорения Челябинского космического тела. С привлечением уравнений метеорной физики рассчитаны временные и высотные зависимости массы, миделя и интенсивности излучения метеороида. Приведена оценка коэффициента динамического сопротивления воздуха.

Ключевые слова: Челябинский метеороид, высотно-временные зависимости, скорость метеороида, ускорение метеороида, масса метеороида, кубические сплайны, аппроксимация

1. Введение

15 февраля 2013 г. в 03:20:26 UT (здесь и далее UT – всемирное время) произошло редкое и хорошо задокументированное набором различных средств событие – полет и взрыв Челябинского метеороида.

Гиперзвуковое движение метеороида сопровождалось генерацией ударной волны, разрушением тела, свечением следа, возмущениями в ионосфере, атмосфере и геомагнитном поле, а также целым рядом вторичных эффектов. Эти эффекты описаны во многих работах [1–22].

Моделирование движения и разрушения метеороида представлено в работах [7–12, 19, 20]. В работе [6] описано квазинепрерывное дробление метеороида, в работах [7–9, 19] – мгновенное его разрушение. Авторами [10–12, 20] проведено аналитико-

численное моделирование как квазинепрерывного дробления метеороида, так и большого количества других физических эффектов во всех геосферах, включая динамику падения метеороида.

В перечисленных выше работах решалась прямая задача, сводящаяся к расчету параметров траектории метеороида по известным входным параметрам (его начальной скорости, ее направлению, начальной массе, начальному радиусу). Представляет интерес решение обратной задачи, заключающейся в нахождении высотных и временных зависимостей основных параметров метеороида по оцененным из наблюдений траекторным данным. Именно эта задача рассматривается в настоящей статье. Поскольку обратная задача относится к некорректным задачам математической физики, в работе используются регуляризирующие алгоритмы.

Целью настоящей работы является получение высотных и временных зависимостей ско-

рости, ускорения, массы и миделя фрагментов метеороида на основе измеренных траекторных данных.

2. Исходные данные и соотношения

Исходные данные. В качестве исходных данных использованы результаты многочисленных наблюдений траекторных данных, выполненных при помощи видеорегистраторов [7–9, 19]. К ним относятся временные зависимости высоты h , географической широты φ и географической долготы λ .

Исходные соотношения. Для описания метеорных явлений традиционно используются уравнения метеорной физики [23, 24]. К ним относятся уравнения движения (торможения), изменения массы m и мощности свечения I космического тела. Эти уравнения имеют вид:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_\Sigma, \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{C_h}{2Q} \rho v^3 S, \quad (2)$$

$$I = -\frac{\tau_I}{2} \frac{d}{dt} m v^2, \quad (3)$$

где \mathbf{v} – скорость, t – время, \mathbf{F}_Σ – равнодействующая сила, C_h – коэффициент теплообмена, Q – удельная теплота сублимации, ρ – плотность воздуха на данной высоте z , $S(z)$ – мидель, τ_I – коэффициент светимости.

Кроме уравнений (1)–(3), привлекаются уравнения, описывающие изменения во времени высоты и угла наклона траектории космического тела, а также уравнение для расчета ионизации в следе.

Равнодействующая сила в уравнении (1) представляет собой сумму силы сопротивления воздуха

$$\mathbf{F} = -\frac{C_d}{2} \rho v^2 S \frac{\mathbf{v}}{v},$$

силы тяжести $m\mathbf{g}$, центробежной силы, силы Кориолиса и силы Магнуса. Здесь C_d – коэффициент динамического сопротивления, \mathbf{g} – ускорение свободного падения.

Заметим, что сила Кориолиса обусловлена вращением Земли, сила Магнуса – вращением метеороида вокруг собственной оси.

Как и следовало ожидать, сила Магнуса и центробежная сила практически не дают вклада в равнодействующую силу. Силы тяжести и Кориолиса существенны на высотах более 65 км. При $z < 50$ км основной является сила сопротивления воздуха. С учетом трех основных сил уравнение (1) сводится к следующему:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \approx m\mathbf{g} - 2m[\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}] - \frac{C_d}{2} \rho v^2 S \frac{\mathbf{v}}{v}. \quad (4)$$

Здесь $\boldsymbol{\omega} = \omega \mathbf{e}_z$ – угловая скорость вращения Земли, \mathbf{e}_z – единичный вектор оси O_z , $\omega = 7.29 \cdot 10^{-5}$ рад/с – частота вращения Земли;

$$\mathbf{g} \approx -g_0 \left(1 - 2 \frac{h}{R_\oplus} \right) \frac{\mathbf{r}}{r},$$

$$g_0 = \frac{GM}{R_\oplus^2} \approx 9.81 \text{ м/с}^2,$$

где h – высота над уровнем моря, $R_\oplus = 6378160$ м – радиус Земли, $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ – гравитационная постоянная, $M = 5.97 \cdot 10^{24}$ кг – масса Земли, \mathbf{r} – радиус-вектор.

Уравнения метеорной физики хорошо описывают взаимодействие мелких (размер $d < 1 \div 10$ см) космических тел. Эти тела полностью сгорают на высотах более 80 км. Метеороиды с $d > 0.1 \div 1$ м, именуемые астероидами, глубже проникают в атмосферу. В процессе движения они генерируют ударную волну, вызывая целый ряд физико-химических процессов, а сами частично или полностью разрушаются. Строго говоря, для описания этих процессов требуются методы физико-химической газовой динамики [25]. На смену уравнениям метеорной физики пришли уравнения, базирующиеся на соотношениях физико-химической газовой динамики, описывающие гиперзвуковое обтекание космического тела излучающим перегретым газом (плазмой). При этом расчет траекторий должен производиться с учетом переменности аэродинамических и тепловых параметров сжатого воздуха с учетом уноса массы космического тела.

Уравнения газовой динамики – дифференциальные уравнения в частных производных, они намного сложнее уравнений метеорной физики. При численном решении трехмерной (в лучшем случае двухмерной) задачи требуется исполь-

зывать разностную схему с достаточно малым шагом. Объем вычислений при этом резко возрастает, что является серьезным препятствием даже для современных компьютеров.

По указанным причинам динамику метеороида по-прежнему стараются описывать в рамках метеорной физики. В этом случае из рассмотрения выпадает расчет параметров ударной волны и связанных с нею физико-химических превращений. Авторы настоящей статьи ограничились использованием уравнений метеорной физики.

Зависимость $I(t)$ в работах [7–9, 19] приведена в относительных единицах. Для перехода к абсолютным единицам необходимо связать интенсивность излучения I с магнитудой M абсолютной звездной величины [24]:

$$\lg I = 2.72 - 0.4M. \quad (5)$$

В свою очередь для M имеем следующее соотношение:

$$M = M_V - 5 \lg \frac{R}{R_0} - K, \quad (6)$$

где M_V – магнитуда видимой звездной величины, R – истинное расстояние до метеора, $R_0 = 100$ км – стандартное расстояние до метеора, K – поправка на экстинкцию (ослабление) света в атмосфере. При $R = R_0$ и $K = 0$ из (6) имеем $M = M_V$.

Интенсивность излучения (5) относят к видимому спектру. Для оценки интенсивности излучения во всем диапазоне волн введем поправку. Полагаем, что излучение метеороида близко к излучению абсолютно черного тела. Воспользуемся законом Стефана–Больцмана и функцией плотности излучения Планка.

Отношение интенсивностей оптического излучения к полному излучению $r_{opt}(T)$ будет иметь вид

$$r_{opt}(T) = \frac{I_{opt}}{I} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} u(T, \lambda) d\lambda / (\sigma T^4),$$

где I_{opt} – интенсивность энергии видимого излучения, Вт; I – интенсивность всей энергии излучения, Вт; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Больцмана; $u(T, \lambda)$ – функция Планка, Вт/м³; $\lambda_1 = 400$ нм, $\lambda_2 = 760$ нм – границы стандартного оптического диапазона; T – температура излу-

чающего тела, К. Воспользуемся оценкой температуры, расположив максимум температуры в максимум вспышки светимости.

Для построения данной модели распределения начальной температуры мы воспользовались известным значением интервала времени свечения метеороида и тем фактом, что при максимальной вспышке яркость превышала яркость Солнца в полдень на безоблачном небе. Как известно, температура на поверхности Солнца составляет 5778 К.

В работах [26, 27] приведена зависимость для коэффициента светимости τ_I от энергии свечения E_r , даваемая в килотоннах тринитротолуола:

$$\tau_I = (0.1212 \pm 0.0043) E_r^{0.115 \pm 0.075}. \quad (7)$$

Поскольку $\tau_I = E_r/E$, где E – кинетическая энергия космического тела, даваемая в килотоннах тринитротолуола, из соотношения (7) имеем

$$\tau_I \approx 0.092 E^{0.13}.$$

Зная τ_I , $I(t)$ и $v(t)$, можно из соотношения (3) вычислить $m(t)$, а затем пересчитать в зависимость $m(h)$.

При описании динамики космического тела требуется знание высотного профиля плотности невозмущенной атмосферы. В качестве такового использовался профиль из работы [28].

3. Результаты моделирования

В основу моделирования, направленного на решение обратной задачи, заключающейся в получении высотных профилей и временных зависимостей основных параметров метеороида, положены измеренные временные зависимости $h(t)$, $\varphi(t)$ и $\lambda(t)$, а также $I(t)$. Из-за конечной погрешности этих зависимостей обратная задача является некорректной. Поэтому производилась регуляризация решения. Ее суть состоит в следующем. Весь временной интервал разбивался на $n = 15$ односекундных интервалов для $h(t)$, $\varphi(t)$, $\lambda(t)$, а также $I(t)$. В итоге имеем $N = 15(n + 1)$ значений. Для нахождения временных зависимостей $m(t)$ и $C_d S(t)$ требуется $2n$ значений. Избыток значений использовался для регуляризации решений. Для этой цели привлекались также априорные сведения типа монотонного изменения во времени $m(t)$ и компонент $\mathbf{v}(t)$. Привлечение

уравнений (2), (4) и (5) позволяет добиться минимизации функционала и получить приемлемое решение обратной задачи.

3.1. Регрессии для высоты и географических координат метеороида

Для описания динамики падения метеороида необходимо знать не только его координаты в инерциальной системе координат, но и скорость v и ускорение a . Поскольку координаты известны с конечной погрешностью, нахождение высотно-временных зависимостей v и a является некорректной задачей. Для ее решения необходимо разработать регуляризирующий алгоритм [29].

Одним из методов регуляризации, обеспечивающих стабилизацию решений, является предварительное сглаживание экспериментальных зависимостей $h(t)$, $\varphi(t)$ и $\lambda(t)$. Аппроксимация этих зависимостей выполнена при помощи сплайнов третьей степени. Третий порядок полиномов достаточен для получения высотных и временных зависимостей v , a , S и m .

Радиус-вектор метеороида в геоцентрической системе координат задается следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= \mathbf{r}(x(t), y(t), z(t)), \\ x(t) &= R(t) \cos \varphi(t) \cos \lambda(t), \\ y(t) &= R(t) \cos \varphi(t) \sin \lambda(t), \\ z(t) &= R(t) \sin \varphi(t), \end{aligned}$$

где $R(t) = R_{\oplus} + h(t)$, $R_{\oplus} \approx 6378$ км – радиус Земли.

Аппроксимация $\mathbf{r}(t)$ производилась в интервале времени 03:20:21–03:20:36 с шагом в 1 с. Всего 15 отсчетов. Для кубических сплайнов аппроксимация имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= \\ &= \sum_{i=1}^{15} (\mathbf{a}_i + \mathbf{b}_i(t_i - t) + \mathbf{c}_i(t_i - t)^2 + \mathbf{d}_i(t_i - t)^3) \delta_i(t), \end{aligned}$$

где $\delta_i(t) = 1$ при $t_{i-1} < t < t_i$, иначе $\delta_i(t) = 0$.

Как обычно, на стыке звеньев в сплайнах требовалось равенство первых и вторых производных. Значения координат на стыках звеньев варьировались в пределах погрешности измерений.

Результаты построения регрессий для $h(t)$, $\varphi(t)$ и $\lambda(t)$ приведены на рис. 1. Сплошной ли-

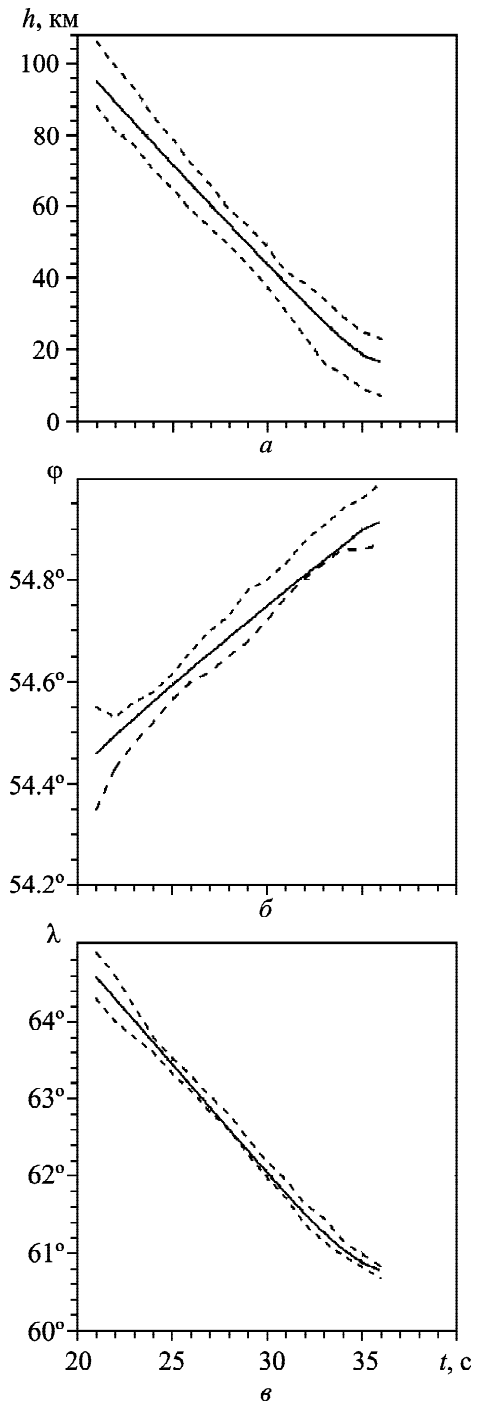


Рис. 1. Временная зависимость параметров траектории Челябинского метеороида: a – высоты над уровнем моря; b – широты; v – долготы. Сплошная линия – регрессия. Штриховыми линиями отмечены границы погрешности измерений

нией показана аппроксимация, а штриховыми линиями – границы аппроксимации, определяемые погрешностью измерений.

3.2. Зависимость скорости метеороида от времени и высоты

Вычисленные зависимости скорости от времени и высоты приведены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что первые 10 с изменения скорости были незначительными. Основное уменьшение скорости происходило в интервале времени 03:20:32–03:20:36, при этом скорость уменьшалась примерно от 18 до 6 км/с, а высота от 40 до 15 км. Среднее торможение составило около -4 км/с².

3.3. Зависимость ускорения метеороида от времени и высоты

Вычисленные по зависимости $v(t)$ зависимости ускорения, точнее модуля торможения $|a|$, от времени и высоты показаны на рис. 3. Из рисунка видно, что максимальное торможение имело место в 03:20:35, когда оно достигло -6 км/с². Это отмечалось на высоте около 18 км.

3.4. Зависимость массы метеороида от времени и высоты

По измеренной зависимости $I(t)$ и вычисленным значениям τ_I и $v(t)$ с использованием соотношения (3) построена зависимость $m(t)$, которая также пересчитана в зависимость $m(h)$ (рис. 4). Из рис. 4 видно, что масса метеороида наиболее существенно уменьшалась в интервале времени 03:20:32–03:20:33. Скорость ее изменения составляла около 5 кг/с. Это происходило в диапазоне высот $32 \div 24$ км.

3.5. Зависимость интенсивности излучения метеороида от времени и высоты

Сравнение расчетных зависимостей $I(t)$ и $I(h)$ с данными наблюдений проведено на рис. 5. Расчет осуществлялся с использованием соотношения (3). Из рис. 5 видно, что хорошее согласие расчетной и измеренной зависимостей имеет место в интервале времени 03:20:31–03:20:33, а также в диапазоне высот $36 \div 25$ км. Попытка улучшить согласование расчетной и измеренной зависимостей с использованием соотношения (5) не привела к положительному результату. Более того, различие между этими зависимостями только увеличилось.

3.6. Зависимость миделя метеороида от времени и высоты

Используя уравнение движения с учетом сил тяжести, торможения и Кориолиса и зная m , v и dv/dt , из соотношения (4) можно рассчитать произведение $C_d S$. Сомножители можно разделять, если считать, что до начала фрагментации $S \approx S_0 \approx 254$ м², где S_0 – начальное значение миделя при начальном диаметре d_0 метеороида, равном 18 м. По значению S_0 оценивается коэффициент C_d , который далее считается независимым от высоты. По значению $C_d = 0.8$ оцениваются $S(t)$ и $S(h)$ для высот, где фрагментация метеороида уже существенна. При этом максимальное значение $S(t)$ привязывается к моменту времени

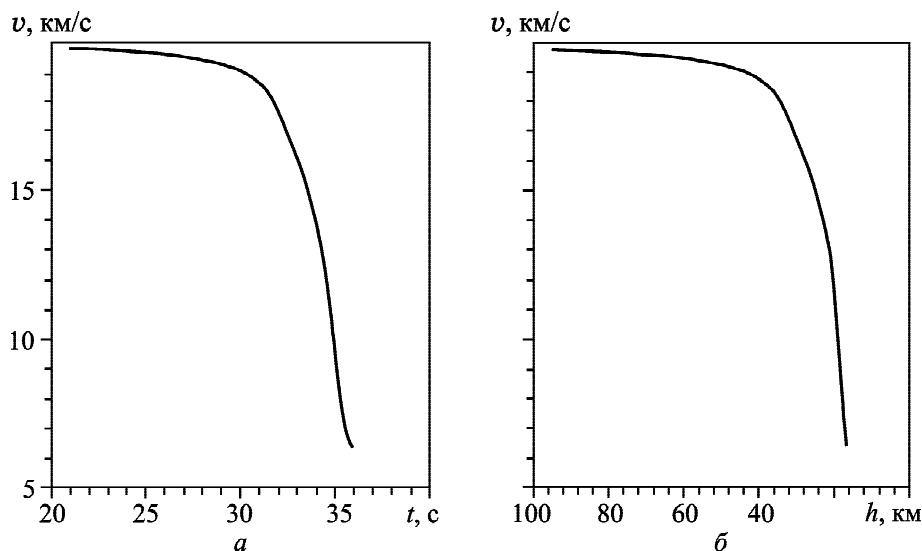


Рис. 2. Зависимости скорости Челябинского метеороида от времени (а) и высоты (б)

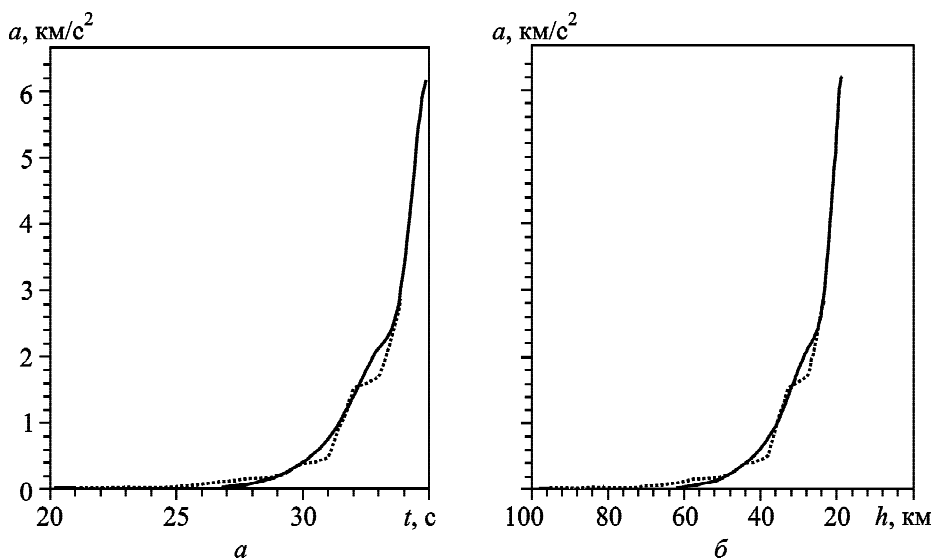


Рис. 3. Зависимость модуля торможения Челябинского метеороида от времени (а) и высоты (б). Штриховая линия – результат дифференцирования, непрерывная линия – результат аппроксимации гладкой функцией

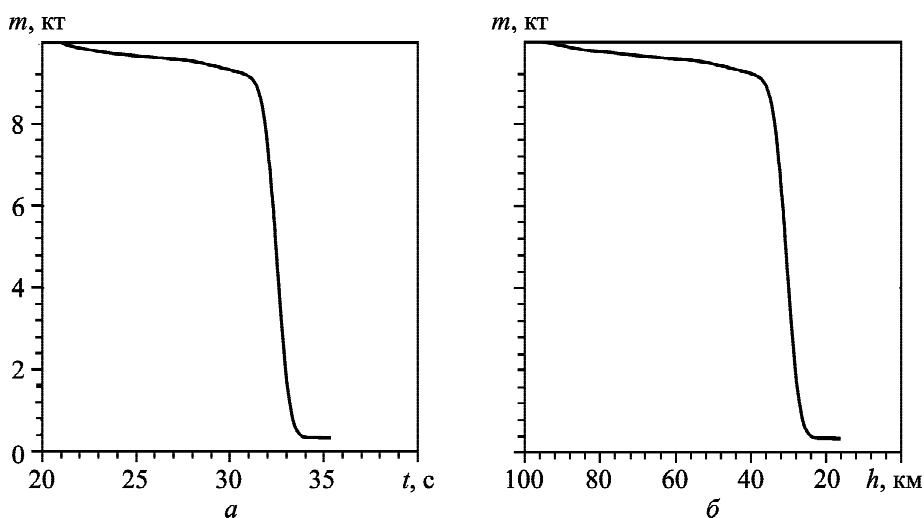


Рис. 4. Зависимость массы Челябинского метеороида от времени (а) и высоты (б)

максимальной интенсивности вспышки. Результаты расчета $S(t)$ и $S(h)$ показаны на рис. 6. Из рис. 6 видно, что максимальное значение миделя радиусом около 62 м превышает $12 \cdot 10^3 \text{ м}^2$. Далее в интервале времени 03:20:32–03:20:34 значение миделя быстро уменьшается. Причиной этого, по-видимому, служит фрагментация тела и распределение массы фрагментов вдоль траектории падения. Координаты метеороида в процессе дальнейшего полета отслеживались наземными средствами наблюдения уже относительно уцелевшего его ядра с меньшим миделем.

Результат минимизации невязки между высотными профилями скорости, определенной из траекторных данных, и скорости, вычисленной из уравнения движения, приведен на рис. 7. Видно их хорошее соответствие. Средняя относительная погрешность составляет 1.8 %, среднеквадратичная относительная погрешность – 3 %. Максимальная относительная погрешность равняется 14 %.

Зная $v(t)$, $S(t)$ и dm/dt , из соотношения (2) можно вычислить отношение C_h/Q . Оно оказалось равным $2.15 \cdot 10^{-8} \text{ кг/Дж}$.

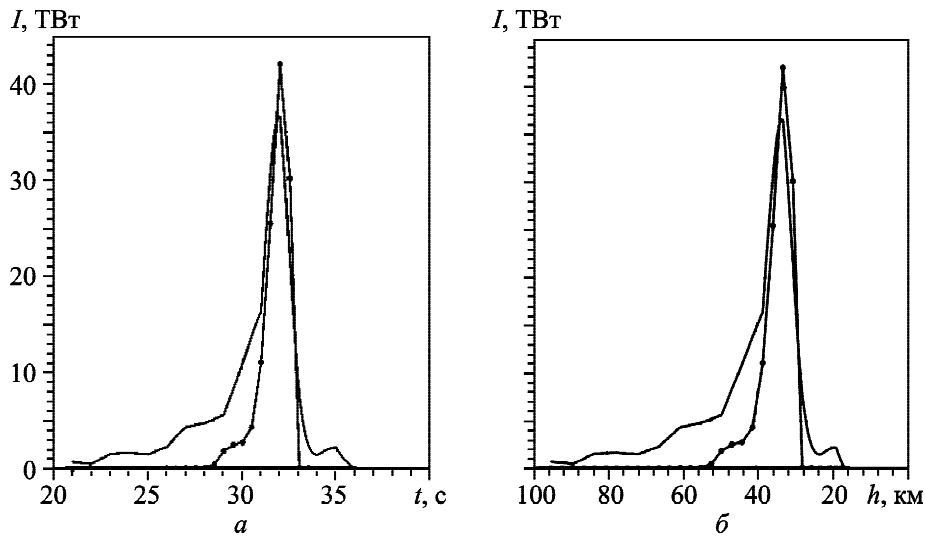


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения Челябинского метеороида от времени (а) и высоты (б). Кривая с точками – результат измерений, сплошная кривая – результат расчета

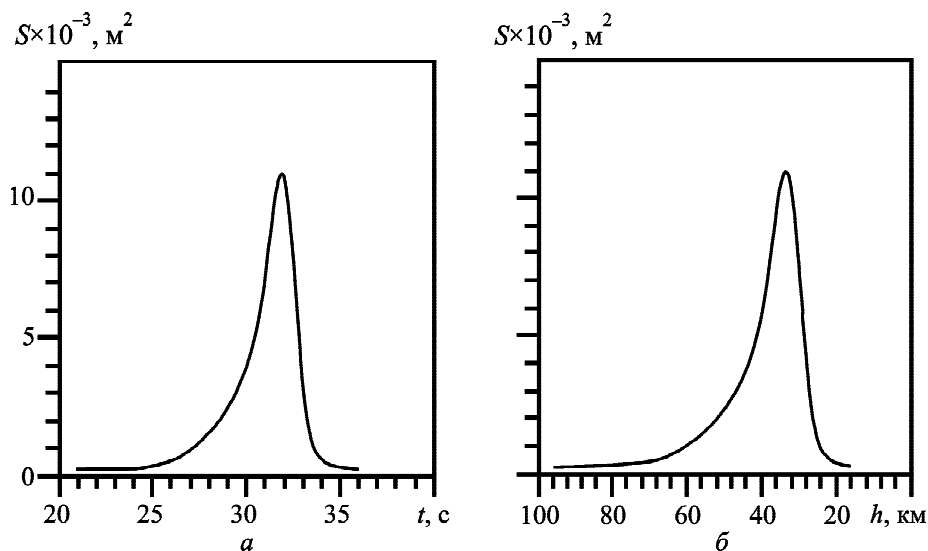


Рис. 6. Зависимость миделя Челябинского метеороида от времени (а) и высоты (б)

4. Обсуждение

Выше считалось, что уравнений метеорной физики достаточно для описания динамики падения крупного тела, каким был Челябинский метеороид ($d_0 \approx 18$ м). По измеренным зависимостям $h(t)$, $\varphi(t)$ и $\lambda(t)$ с использованием кубических сплайнов построены регрессии перечисленных параметров, по которым рассчитаны зависимости скорости, ускорения и массы метеороида как функции времени и высоты. Адекватность полученных зависимостей проверялась путем сопоставления расчетных и из-

меренных зависимостей интенсивности излучения $I(t)$.

При разумных предположениях удалось разделить вклад коэффициента C_d и миделя S в процесс торможения метеороида, оценить C_d и вычислить зависимости $S(t)$ и $S(h)$.

Полагая $C_d \approx 0.8$, вычислили зависимости $S(t)$ и $S(h)$.

Применение алгоритма регуляризации позволило минимизировать невязку между высотными профилями скорости, определенной из траекторных данных, и скорости, вычисленной из уравнения движения. Значение отно-

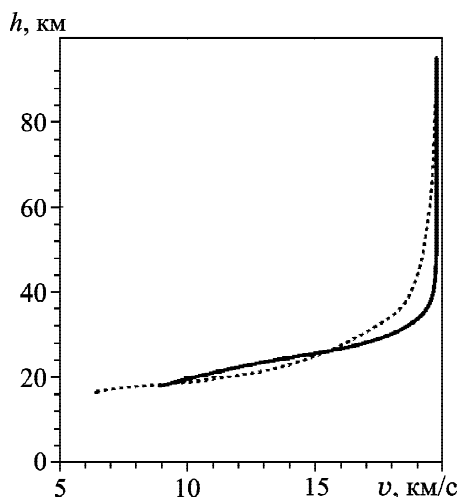


Рис. 7. Зависимость скорости Челябинского метеороида от высоты. Штриховая линия – результат траекторных данных, сплошная линия – результат расчета

сительной погрешности в среднем не превышало $2 \div 3 \%$.

Немонотонное поведение $S(t)$ и $S(h)$ свидетельствует о том, что модель квазинепрерывного дробления и движения фрагментов в поперечном направлении могла иметь место на высотах, больших высоты, где $S(h) = S_{\max}$.

Из уравнения для скорости изменения массы удалось вычислить отношение $C_h/Q = 2.15 \cdot 10^{-8}$ кг/Дж.

Найденные в рамках метеорной физики результаты представляются адекватными, поскольку данные, полученные из траекторных наблюдений, согласуются с данными, вычисленными из временной зависимости интенсивности излучения. Конечно, при таком подходе оказалось невозможным описать генерацию ударной волны, физико-химические процессы при обтекании космического тела излучающим перегретым газом (плазмой). Описание подобных эффектов возможно в рамках теории, которую по аналогии с метеорной физикой можно назвать астероидной физикой. Эта физика должна базироваться на уравнениях физико-химической и плазменной газовой динамики.

5. Основные результаты

1. С использованием сплайнов третьего порядка получены регрессии, описывающие временные зависимости траектории в географических координатах Челябинского метеороида.

2. По измеренным траекторным данным рассчитаны временные зависимости скорости и ускорения Челябинского космического тела.

3. С привлечением уравнений метеорной физики рассчитаны временные и высотные зависимости массы, миделя и интенсивности излучения метеороида.

4. Оценен коэффициент динамического сопротивления воздуха ($C_d \approx 0.8$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47, № 4. (Тематический выпуск).
2. *Материалы международной научно-практической конференции “Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль”*. Под ред. В. А. Алексеева. Челябинск: “Край Ра”, 2013. 168 с.
3. Алпатов В. В., Буров В. А., Вагин Ю. П., Галкин К. А., Гвишвили Г. В., Глухов Я. В., Давиденко Д. В., Зубачев Д. С., Иванов В. Н., Кархов А. Н., Коломин М. В., Коршунов В. А., Лапшин В. Б., Лещенко Л. Н., Лысенко Д. А., Минлигареев В. Т., Морозова М. А., Перминова Е. С., Портнягин Ю. И., Русаков Ю. С., Сталь Н. Л., Сыроешкин А. В., Тертышников А. В., Тулинов Г. Ф., Чичаева М. А., Чудновский В. С., Штырков А. Ю. *Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г.* Москва: ФГБУ “ИПГ”, 2013. 37 с.
4. *Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. Под ред. Н. А. Антипина. Челябинск: Из-во “Каменный пояс”, 2014. 694 с.
5. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н., Шеляков М. А., Пахомов Ю. В., Шустов Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Маров М. Я., Рыхлова Л. В., Нароенков С. А., Карташова А. П., Харламов В. А., Трубецкая И. А. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 года. *Астрономический вестник*. 2013. Т. 47, № 4. С. 262–277.
6. Grigoryan S. S., Ibadov F. S., and Ibadov S. I. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Sol. Syst. Res.* 2013. Vol. 47, No. 4. P. 268–274. DOI: 10.1134/S0038094613040151
7. Попова О. П., Шувалов В. В., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А., Глазачев Д. О., Емельяненко В. В., Карташова А. П., Дженнискенс П. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных. *Динамические процессы в геосферах: сб. науч. тр. ИДГ РАН*. Москва: Геос, 2013. Вып. 4. С. 10–21.
8. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovoyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y.,

- Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., and Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. Vol. 342, Is. 6162. P. 1069–1073. DOI: 10.1126/science.1242642
9. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., and Mikouchi T. Supplementary materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. vol. 342. URL: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1 (дата обращения 30.01.2017).
 10. Chernogor L. F. and Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atom. Sci. Technol.* 2013. Vol. 86, No 4. P. 136–139.
 11. Черногор Л. Ф. Основные физические явления при полете Челябинского космического тела. *Материалы международной научно-практической конференции "Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль"* (Чебаркуль, 21–22 июня 2013 г.) Челябинск: Край Ра, 2013. С. 148–152.
 12. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита "Челябинск". *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23–40.
 13. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита "Челябинск". *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. Т. 18, № 3. С. 231–243.
 14. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. 2013. Т. 4 (18), № 3. С. 47–54.
 15. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, следовавших за падением Челябинского метеорита. *Космічна наука і технологія*. 2013. Т. 19, № 6. С. 38–46.
 16. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет Челябинского тела. *Кинематика и физика небесных тел*. 2014. Т. 30, № 3. С. 27–42.
 17. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т. 54, № 5. С. 658–669.
 18. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. Т. 55, № 3. С. 370–385.
 19. Попова О. П., Шувалов В. В., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А., Глазачев Д. О., Емельяненко В. В., Карташова А. П., Дженнискенс П. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных. *Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. Под ред. Н. А. Антипина. Челябинск: Из-во "Каменный пояс", 2014. С. 364–76.
 20. Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования. *Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. Под ред. Н. А. Антипина. Челябинск: Из-во "Каменный пояс", 2014. С. 229–264.
 21. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, №1. С. 53–66. DOI: 1015407/грга22.01.053
 22. Черногор Л. Ф. Атмосферно-сейсмический эффект Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, № 2. С. 123–137. DOI: 1015407/грга22.02.123
 23. Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений*. Москва: Наука, 1981. 416 с.
 24. Кручиненко В. Г. *Математико-фізичний аналіз метеорного явища*. Київ: Наукова думка, 2012. 294 с.
 25. Стулов С. П., Мирский В. Н., Вислый А. Н. *Аэродинамика болидов*. Москва: Наука. Физматлит, 1995. 240 с.
 26. Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O., Tagliaferri E., and Worden S. P. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*. 2002. Vol. 420, No. 6913. P. 294–296. DOI: 10.1038/nature01238
 27. *Катастрофические воздействия космических тел*. Под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчикова. Москва: ИХЦ "Академкнига", 2005. 310 с.
 28. *Атмосфера. Справочник*. Под ред. Ю. С. Седунова, С. И. Авдошина, Е. П. Борисенкова и др. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 508 с.
 29. Милованов Ю. Б., Черногор Л. Ф. Регуляризация алгоритма расчета высотно-временных характеристик, описывающих динамику падения Челябинского метеороида. – *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Радиофізика та електроніка"*. 2017. Вип. 26. С. 75–79.

REFERENCES

1. SOLAR SYSTEM RESEARCH. 2013. vol. 47, no. 4. (Thematical issue).
2. *Proceedings of the international scientific-practical conference "Asteroids and comets. Chelyabinsk event and study of the meteorite falling into the lake Chebarkul"*. Chelyabinsk, Russia: Krai Ra Publ. (in Russian).
3. ALPATOV, V. V., BUROV, V. N., VAGIN, J. P., GALKIN, K. A., GIVISHVILI, G. V., GLUHOV, J. V., DAVIDENKO, D. V., ZUBACHEV, D. S., IVANOV, V. N., KARHOV, A. N., KOLOMIN, M. V., KORSHUNOV, V. A., LAPSHIN, V. B., LESHENKO, L. N., LYSENKO, D. A.,

- MINLIGAREEV, V. T., MOROZOVA, M. A., PERMINOVA, E. S., PORTNYAGIN, J. I., RUSAKOV, J. S., STAL, N. L., SYROESHKIN, A. V., TERTYSHNIKOV, A. V., TULINOV, G. F., CHICHAEVA, M. A., CHUDNOVSKY, V. S. and SHTYRKOV, A. Y., 2013. *Geophysical conditions at the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkulsky) meteoroid in February 15, 2013*. Moscow, Russia: FGBU "IPG" Publ. (in Russian).
4. ANTIPIN, N. A., ed. 2014. *The Chelyabinsk Meteorite – one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. Chelyabinsk, Russia: Kamennyi poyas Publ. (in Russian).
 5. EMEL'YANENKO, V. V., POPOVA, O. P., CHUGAI, N. N., SHELYAKOV, M. A., PAKHOMOV, YU. V., SHUSTOV, B. M., SHUVALOV, V. V., BIRYUKOV, E. E., RYBNOV, YU. S., MAROV, M. YA., RYKHLOVA, L. V., NAROENKOV, S. A., KARTASHOVA, A. P., KHARLAMOV, V. A. and TRUBETSKAYA, I. A., 2013. *Sol. Syst. Res.* vol. 47, is. 4, pp. 240–254. DOI: 10.1134/S0038094613040114
 6. GRIGORYAN, S. S., IBODOV, F. S. and IBADOV, S. I., 2013. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Sol. Syst. Res.* vol. 47, no. 4, pp. 268–274. DOI: 10.1134/S0038094613040151
 7. POPOVA, O. P., RYBNOV, Y. S., HARLAMOV, V. A., GLAZACHEV, D. O., EMELIANENKO, V. V., KARTASHOVA, A. P. and JENNISKENS, P., 2013. Chelyabinsk meteoroid parameters: Data analysis. In: *Dinamicheskie protsessy v geosferah: sb. nauch. tr. IDG RAN*. Moscow, Russia: Geos Publ. is. 4, pp. 10–21 (in Russian).
 8. POPOVA, O. P., JENNISKENS, P., EMELIANENKO, V., KARTASHOVA, A., BIRYUKOV, E., KHAIBRAKHMANOV, S., SHUVALOV, V., RYBNOV, Y., DUDOROV, A., GROKHOVSKY, V. I., BADYUKOV, D. D., YIN, Q.-Z., GURAL, P. S., ALBERS, J., GRANVIK, M., EVERS, L. G., KUIPER, J., HARLAMOV, V., SOLOVYOV, A., RUSAKOV, Y. S., KOROTKIY, S., SERDYUK, I., KOROCHANTSEV, A. V., LARIONOV, M. Y., GLAZACHEV, D., MAYER, A. E., GISLER, G., GLADKOVSKY, S. V., WIMPENNY, J., SANBORN, M. E., YAMAKAWA, A., VEROSUB, K. L., ROWLAND, D. J., ROESKE, S., BOTTO, N. W., FRIEDRICH, J. M., ZOLENSKY, M. E., LE, L., ROSS, D., ZIEGLER, K., NAKAMURA, T., AHN, I., LEE, J. I., ZHOU, Q., LI, X. H., LI, Q. L., LIU, Y., TANG, G.-Q., HIROI, T., SEARS, D., WEINSTEIN, I. A., VOKHMINTSEV, A. S., ISHCHEKOV, A. V., SCHMITT-KOPLIN, P., HERTKORN, N., NAGAO, K., HABA, M. K., KOMATSU, M. and MIKOUCHI, T., 2013. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. vol. 342, is. 6162, pp. 1069–1073. DOI: 10.1126/science.1242642
 9. POPOVA, O. P., JENNISKENS, P., EMELIANENKO, V., KARTASHOVA, A., BIRYUKOV, E., KHAIBRAKHMANOV, S., SHUVALOV, V., RYBNOV, Y., DUDOROV, A., GROKHOVSKY, V. I., BADYUKOV, D. D., YIN, Q.-Z., GURAL, P. S., ALBERS, J., GRANVIK, M., EVERS, L. G., KUIPER, J., HARLAMOV, V., SOLOVYOV, A., RUSAKOV, Y. S., KOROTKIY, S., SERDYUK, I., KOROCHANTSEV, A. V., LARIONOV, M. Y., GLAZACHEV, D., MAYER, A. E., GISLER, G., GLADKOVSKY, S. V., WIMPENNY, J., SANBORN, M. E., YAMAKAWA, A., VEROSUB, K. L., ROWLAND, D. J., ROESKE, S., BOTTO, N. W., FRIEDRICH, J. M., ZOLENSKY, M. E., LE, L., ROSS, D., ZIEGLER, K., NAKAMURA, T., AHN, I., LEE, J. I., ZHOU, Q., LI, X. H., LI, Q. L., LIU, Y., TANG, G.-Q., HIROI, T., SEARS, D., WEINSTEIN, I. A., VOKHMINTSEV, A. S., ISHCHEKOV, A. V., SCHMITT-KOPLIN, P., HERTKORN, N., NAGAO, K., HABA, M. K., KOMATSU, M. and MIKOUCHI, T., 2013. Supplementary materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science* [online]. vol. 342. [viewed 30 January 2017]. Available from: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1
 10. CHERNOGOR, L. F. and ROZUMENKO, V. T., 2013. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atom. Sci. Tech.* vol. 86, no 4, pp. 136–139.
 11. CHERNOGOR, L. F., 2013. The main physical effects associated with the Chelyabinsk bolide passage. In: *Asteroids and comets. Chelyabinsk event and study of the meteorite falling into the lake Chebarkul: Proceedings of the international scientific-practical conference*. Chelyabinsk, Russia: Krai Ra Publ., pp. 148–152 (in Russian)
 12. CHERNOGOR L. F., 2013. Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite Chelyabinsk. *Inzhenernaya fizika*. no. 8, pp. 23–40 (in Russian).
 13. CHERNOGOR, L. F. and GARMASH, K. P., 2013. Disturbances in Geospace Associated with the Chelyabinsk Meteorite Passage. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 3, pp. 231–243 (in Russian).
 14. CHERNOGOR, L. F., 2013. Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite. *Radiofizika i elektronika*. vol. 4 (18), no. 3, pp. 47–54 (in Russian).
 15. CHERNOGOR, L. F., MILOVANOV, YU. B., FEDORENKO, V. N. and TSYMBAL, A. M., 2013. Satellite observations of the ionospheric disturbances followed by the fall of Chelyabinsk meteorite. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*. vol. 19, no. 6, pp. 38–46 (in Russian).
 16. CHERNOGOR, L. F. and BARABASH, V. V., 2014. Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. vol. 30, no. 3, pp. 126–136. DOI: 10.3103/S0884591314030039
 17. CHERNOGOR, L. F., 2014. Geomagnetic field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagn. Aeron.* vol. 54, no. 5, pp. 613–624. DOI: 10.1134/S001679321405003X
 18. CHERNOGOR, L. F., 2015. Ionospheric effects of Chelyabinsk meteoroid. *Geomagn. Aeron.* vol. 55, no. 3, pp. 353–368. DOI: 10.1134/S0016793215030044
 19. POPOVA, O. P., SHUVALOV, V. V., RYBNOV, Y. S., KHARLAMOV, V. A., GLAZACHEV, D. O., EMELIANENKO, V. V., KARTASHOVA, A. P. and JENNISKENS, P., 2014. Chelyabinsk meteoroid: data analysis. In: ANTIPIN, N. A., ed. 2014. *The Chelyabinsk Meteorite – one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. Chelyabinsk, Russia: Kamennyi poyas Publ., pp. 364–376 (in Russian).

20. CHERNOGOR L. F., 2014. Main effects of Chelyabinsk meteorite fall: the results of physical and mathematical modelling. In: ANTIPIN, N. A., ed. *The Chelyabinsk Meteorite – one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. Chelyabinsk, Russia: Kamennyi poyas Publ., pp. 229–264 (in Russian).
21. CHERNOGOR, L. F., 2017. Chelyabinsk meteoroid acoustic effects. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 1, pp. 53–66 (in Russian). DOI: 1015407/rpra22.01.053
22. CHERNOGOR, L. F., 2017. Atmospheric-seismic effect of Chelyabinsk meteoroid. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 2, pp. 123–137 (in Russian). DOI: 1015407/rpra22.02.123
23. BRONSTEN, V. A., 1983. *Physics of Meteoric Phenomena*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publ. Co.
24. KRUCHINENKO, V. G., 2012. *Mathematical and physical analysis of the meteor phenomena*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka Publ. (in Ukrainian).
25. STULOV, V. P., MIRSKII, V. N. and VISLYI, A. I., 1995. *Aerodynamics of Bolides*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
26. BROWN, P., SPALDING, R. E., REVELLE, D. O., TAGLIAFERRI, E. and WORDEN, S. P., 2002. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*. vol. 420, no. 6913, pp. 294–296. DOI: 10.1038/nature01238
27. ADUSHKIN, V. V. and NEMCHINOV, I. V. (eds.), 2005. *Catastrophic Impacts of Cosmic Bodies*. Moscow, Russia: ECC, Akademkniga Publ. (in Russian).
28. SEDUNOV, YU. S., AVDIUSHIN, S. I., BORISENKOV, E. P., et al (eds.), 1991. *Atmosphere. Handbook*. Leningrad, Russia: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
29. MILOVANOV, YU. B. and CHERNOGOR, L. F., 2017. Regularization Algorithm for Calculating Height and Temporal Characteristics Describing the Dynamics of Chelyabinsk Meteoroid Passage Through the Atmosphere. *Visnyk Kharkivs'koho Natsional'noho Universytetu. Radiofizyka i elektronika*. vol. 26, pp. 75–79 (in Russian).

L. F. Chernogor and Yu. B. Mylovanov

V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

DYNAMICS OF THE CHELYABINSK METEOROID FALL: ALTITUDE AND TIME DEPENDENCES

Purpose: Taking the altitude and time dependences of the meteoroid fragment speed, acceleration, mass, and the midsection from the measured trajectory data.

Design/methodology/approach: Numerical calculations have been made of the Chelyabinsk celestial body speed, acceleration, mass, and midsection variations with time and altitude. The third order spline fits have been shown to be acceptable. The model results have been compared to the measured optical radiation intensity.

Findings: Using the equations of meteorite physics with accounting for the deceleration, gravity and Coriolis forces the regression analysis for fitting the meteoroid altitude and geographic coordinates was made and the dependences of the mete-

oroid speed, acceleration, mass, and optical radiation intensity on time and altitude found. In all cases, the approximation is performed with cubic splines. The speed has been shown to decrease approximately by a factor of 3 when the altitude decreases from 40 to 15 km over the 03:20:32–03:20:36 UT interval. The average deceleration is equal to -4 km/s^2 , while the maximum deceleration of -6 km/s^2 occurs within the same altitude range. Based on speed vs. time and optical radiation intensity vs. time dependences, the dependences of meteoroid mass vs. time and vs. altitude have been plotted. The most significant change in the mass occurs during the 03:20:32–03:20:33 UT interval and the calculations show a value of 5 kt/s. The air drag coefficient has been estimated from the determined dependences of speed, deceleration, mass loss rate, and meteoroid midsection on time and altitude.

Conclusions: The third order splines provide the best fit to the Chelyabinsk meteoroid altitude and geographic coordinate regression time dependences. The temporal dependences of the Chelyabinsk celestial body speed and deceleration have been calculated from the trajectory measurements. The equations of meteorite physics have been used to calculate mass, midsection, and meteoroid optical radiation intensity vs. time and vs. altitude dependences. The air drag coefficient have been presented.

Key words: Chelyabinsk meteoroid, time and altitude dependences, meteoroid speed, meteoroid acceleration, meteoroid mass, cubic splines, approximation

Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ДИНАМІКА ПАДІННЯ ЧЕЛЯБІНСЬКОГО МЕТЕОРОЇДА: ВИСОТНО-ЧАСОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ

Предмет і мета роботи: Отримання висотних і часових залежностей швидкості, прискорення, маси та міделю фрагментів метеороїда на основі вимірних траєкторних даних.

Методи і методологія: Виконано числові розрахунки зміни швидкості, прискорення, маси та міделю Челябінського космічного тіла з висотою і з часом. Показано, що прийнятною апроксимацією цих залежностей є апроксимація сплайнами третього порядку. Результати моделювання порівняно з результатами вимірювання інтенсивності свічення.

Результати: З використанням рівнянь метеорної фізики з урахуванням сили гальмування, сили тяжіння та сили Коріоліса були отримані регресійні часові залежності для висоти і географічних координат метеороїда; залежності його швидкості, прискорення, маси, інтенсивності випромінювання від часу і висоти. У всіх випадках виконано апроксимацію кубічними сплайнами. Показано, що в інтервалі часу 3:20:32–3:20:36 UT при зменшенні висоти від 40 до 15 км швидкість зменшилася приблизно в 3 рази. Середнє гальмування склало близько -4 км/с^2 . У цьому ж діапазоні висот зазначалося максимальне гальмування -6 км/с^2 . За залежностями швидкості та інтенсивності свічення від часу побудовані залежності маси метеороїду за ча-

сом та висотою. Визначено, що найсуттєвіша зміна маси зазначалася о 3:20:32–3:20:33 UT, за розрахунками вона становила 5 кг/с. За встановленими залежностями швидкості, гальмування, швидкості виносу маси та міделю метеороїду від часу та висоти оцінено коефіцієнт динамічного опору повітря.

Висновок: З використанням сплайнів третього порядку отримано регресії, що описують часові залежності висоти та географічних координат Челябинського метеороїду. За вимірними траєкторними даними розраховано часові

залежності швидкості та прискорення Челябинського космічного тіла. Із залученням рівнянь метеорної фізики розраховано часові та висотні залежності маси, міделю й інтенсивності випромінювання метеороїду. Наведено оцінку коефіцієнту динамічного опору повітря.

Ключові слова: Челябинський метеороїд, висотно-часові залежності, швидкість метеороїду, прискорення метеороїду, маса метеороїду, кубічні сплайни, апроксимація

Статья поступила в редакцию 26.03.2018