

**РАДІОФІЗИКА ГЕОКОСМОСУ**DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra23.03.176>

УДК 551.558, 551.596, 534.221 Ю. Б. МИЛОВАНОВ, Л. Ф. ЧЕРНОГОР

PACS numbers: 93, 96.30.Ys Харьковський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
пл. Свободи, 4, г. Харків, 61022, Україна  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua**ДИНАМИКА ПАДЕНИЯ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА:  
МАТЕРИАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС**

*Предмет и цель работы: Получение высотных и временных зависимостей температуры поверхности, интенсивности излучения и потерь энергии Челябинского метеороида. Расчет параметров его абляции, коэффициента динамического сопротивления, уточнение высотно-временной зависимости миделя.*

*Методы и методология: Проведены численные расчеты температуры метеороида с учетом предварительной оценки миделя, интенсивности полного излучения с учетом оптической поправки, определены условия для оценки коэффициента динамического сопротивления. Рассчитана уточненная высотно-временная зависимость миделя по известному расходу массы. Для реализации регуляризирующего алгоритма использован энергетический баланс.*

*Результаты: С использованием уравнений метеорной физики с учетом силы торможения, процессов абляции, излучения и отделения фрагментов вещества метеороида составлен баланс энергетических потерь. Получены высотно-временные зависимости температуры, интенсивности излучения и миделя. В результате последовательных итераций регуляризирующего алгоритма уточнены значения коэффициента динамического сопротивления, удельной энергии абляции и коэффициента теплообмена. Показано, что расход полной кинетической энергии на сопротивление воздуха составляет 16.8 %, на излучение – 8 %, на абляцию и разрушение – 8.2 %, на потерю отделившихся фрагментов – 67 %.*

*Заключение: В результате численного моделирования рассчитаны временные и высотные зависимости массы, миделя, интенсивности излучения и температуры метеороида. Оценены параметры абляции и коэффициент динамического сопротивления. Составлен баланс потерь энергии на процессы, сопровождавшие падение Челябинского метеороида.*

*Ключевые слова: Челябинский метеороид, высотно-временные зависимости, скорость метеороида, температура метеороида, мидель, абляция, полное излучение, энергетический баланс, коэффициент динамического сопротивления, регуляризация*

**1. Введение**

15 февраля 2013 г. в интервале времени 03:20:20–03:20:36 UT наблюдались падение и взрыв Челябинского метеороида. Движение метеороида сопровождалось ударной волной, разрушением тела, свечением, возмущениями в ионосфере, атмосфере и иными эффектами. Эти эффекты описаны в работах [1–24].

Моделирование движения и разрушения метеороида представлено в работах [7–12, 19, 20, 25]. В работе [6] описано квазинепрерывное дробление метеороида, в работах [7–9, 19] – мгновенное его разрушение. Авторам работ [10–12, 20] проведено аналитико-численное моделирование как

квазинепрерывного дробления метеороида, так и большого количества иных сопутствующих физических эффектов.

В работе [26] на основе наблюдений [8] были построены регрессии для траектории падения и высотно-временной зависимости светимости Челябинского метеороида. С учетом уравнений метеорной физики и построенного регуляризирующего алгоритма были оценены высотно-временные зависимости его скорости, ускорения, массы, интенсивности излучения и миделя [27]. Оценка миделя была рассчитана без учета потерь энергии на абляцию и излучение (рис. 1).

Отклонение расчетной скорости от наблюдаемой в диапазоне высот 60 ÷ 30 км (рис. 1) объясняется тем, что в расчете скорости [26] потерями энергий на разрушение и излучение пре-

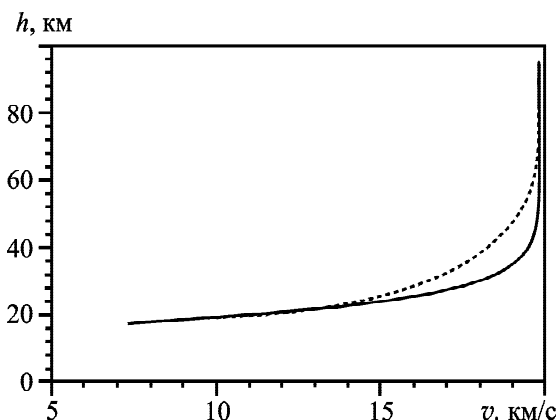


Рис. 1. Высотная зависимость скорости Челябинского метеороида: пунктирная линия – наблюдаемой; сплошная линия – расчетной с учетом только упругих столкновений с частицами воздуха

небрегли. Учет только упругих столкновений с частицами воздуха завышает абсолютное значение скорости, что видно на рис. 1. При сведении расчетной скорости к наблюдаемой происходит завышение реального значения площади мишени.

Целью настоящей работы является продолжение исследования [26]. Учет энергетических потерь, использование предварительной оценки мишени позволят рассчитать и уточнить высотно-временные зависимости температуры, полной интенсивности излучения и мишени Челябинского метеороида.

## 2. Исходные данные и соотношения

**Исходные данные.** В качестве исходных использованы траекторные данные Челябинского метеороида, полученные при помощи видеорегистраторов [7–9, 20]. Это временные зависимости светимости  $M_V$ , высоты  $h$ , географической широты  $\varphi$  и географической долготы  $\lambda$ . Привлечены также предварительные оценки скорости, расхода массы и мишени из работы [26].

**Исходные соотношения.** Для описания метеорных явлений традиционно используются уравнения метеорной физики [25, 28]. К ним относятся уравнения движения, потери массы  $m$  и уравнение, описывающее интенсивность свечения  $I$  космического тела.

Пренебрегаем, как и в [26], силами тяжести и Кориолиса, центробежной силой и силой Магнуса. В результате уравнения метеорной физики приобретут вид:

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{C_d}{2} \rho v^2 S \frac{\mathbf{v}}{v}, \quad (1)$$

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

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

где  $\mathbf{v}$  и  $v$  – вектор и модуль скорости,  $t$  – время,  $C_d$  – коэффициент динамического сопротивления,  $\rho$  – плотность воздуха на данной высоте  $z$  [29],  $m$  – масса,  $S$  – площадь мишени,  $C_h$  – коэффициент теплообмена,  $Q$  – удельная энергия абляции,  $\tau_I$  – коэффициент светимости [30]. Интенсивность излучения  $I$  рассчитывается и корректируется с помощью оптической поправки  $r_{opt}(T)$  [26, 28] по следующим формулам:

$$\lg I_{opt} = 2.72 - 0.4M, \quad (4)$$

$$I = \frac{I_{opt}}{r_{opt}(T)}, \quad (5)$$

где  $I_{opt}$  – интенсивность видимого излучения, Вт;  $M$  – абсолютная звездная величина (полагаем  $M = M_V$ ,  $M_V$  – видимая звездная величина из кривой светимости, приведенной [8]);  $T$  – абсолютная температура излучения поверхности, К. График температурной зависимости оптической поправки  $r_{opt}(T)$  представлен на рис. 2.

Рассмотрим потери энергии на сопротивление воздуха, разрушение верхнего слоя вещества метеороида, излучение и отделение фрагментов разрушения (см. табл. 1). Предположим,

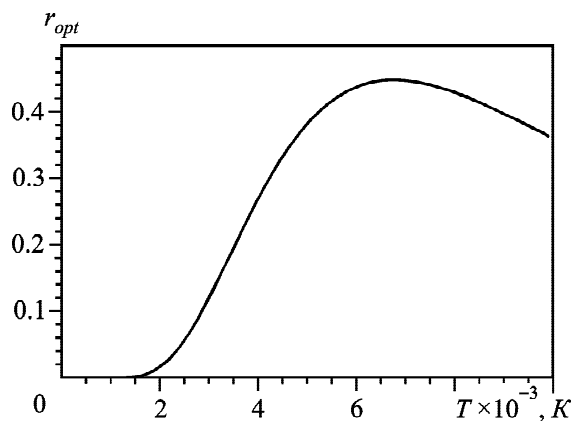


Рис. 2. Температурная зависимость оптической поправки

Таблица 1. Список энергетических потерь

| Наименование                       | Масса | Скорость | Обозначение      |
|------------------------------------|-------|----------|------------------|
| Начальное состояние                | $m_1$ | $v_1$    |                  |
| 1. Потери на сопротивление воздуха | $m_1$ | $v_2$    | $\delta E_d$     |
| 2. Потери на разрушение, абляцию   | $m_1$ | $v_3$    | $\delta E_{abl}$ |
| 3. Потери на излучение             | $m_1$ | $v_4$    | $\delta E_r$     |
| 4. Потери на отделение фрагментов  | $m_2$ | $v_4$    | $\delta E_{ex}$  |
| Сумма потерь                       | –     | –        | $\delta E$       |
| Наблюдаемая кинетическая энергия   | –     | –        | $\delta E_{obs}$ |

Примечание:  $v_1 \geq v_2 \geq v_3 \geq v_4$ ,  $m_1 \geq m_2$ .

что существует достаточно малый интервал времени  $\delta t$ , в течении которого данные процессы независимы друг от друга. Пусть  $m_1 = m(t)$ ,  $m_2 = m(t + \delta t)$  – масса и  $v_1 = v(t)$ ,  $v_4 = v(t + \delta t)$  – скорость метеороида в моменты времени  $t$  и  $t + \delta t$ . Полагаем, что после преодоления сопротивления воздуха скорость метеороида уменьшится до значения  $v_2$ , после разрушения вещества – до  $v_3$ , после излучения – до  $v_4$ . Соответственно уменьшение массы метеороида происходит на конечном этапе отделения фрагментов до значения  $m_2$ .

После взаимодействия метеороида с воздухом часть энергии передается на нагрев, скол и разрушение верхнего слоя вещества. Избыток энергии излучается в окружающее пространство. Далее фрагменты вещества отделяются от основного ядра метеороида и продолжают движение со скоростью метеороида в момент отделения. До момента потери энергии на излучение и потери массы создаются условия для действия закона сохранения импульса и закона сохранения энергии. В этот период времени уравнение движения (1) как дифференциальная форма закона сохранения импульса справедливо.

Потери энергии за период времени  $[t, t + \delta t]$  согласно (1)–(5) и табл. 1 имеют вид [26]:

$$\delta E_d = C_d \frac{\rho v^3}{2} S \delta t,$$

$$\delta E_{abl} = \frac{C_h}{Q} \frac{\rho v^3}{2} S \delta t = -Q \frac{dm}{dt} \delta t,$$

$$\delta E_r = \frac{I_{opt}}{r_{opt}(T)} \delta t,$$

$$\delta E_{ex} = \frac{(m_1 - m_2)v_4^2}{2} \approx -\frac{dm}{dt} \frac{v^2}{2} \delta t,$$

$$\delta E = \delta E_d + \delta E_{abl} + \delta E_r + \delta E_{ex}, \tag{6}$$

$$\delta E_{obs} = -\frac{d}{dt} \frac{mv^2}{2} \delta t. \tag{7}$$

Общий энергетический баланс приобретет вид

$$\delta E \approx \delta E_{obs},$$

или для интенсивностей потерь

$$C_d \frac{\rho v^3}{2} S - Q \frac{dm}{dt} + \frac{I_{opt}}{r_{opt}(T)} - \frac{dm}{dt} \frac{v^2}{2} \approx -\frac{d}{dt} \frac{mv^2}{2}. \tag{8}$$

### 3. Результаты моделирования

#### 3.1. Температура метеороида

Оценка интенсивности излучения [26] была получена с использованием принятой упрощенной модели температуры поверхности. С учетом дополнительных данных, таких как значения массы и площади миделя, получим более точную оценку температуры и, соответственно, интенсивности излучения. Для расчета температуры воспользуемся уравнением Стефана–Больцмана видимого излучения [26]. Определим площадь поверхности излучения.

Для нахождения искомой поверхности обратим внимание на хвост метеороида. Хвост (газопылевое облако) состоит из фрагментов метеороида и формируется за основным телом метеороида (ядром). Хвост образован в результате абляции – лущения и скола небольших частиц

вещества с передней и боковой поверхностями метеороида. Между частицами со временем образуется достаточно свободного пространства для более полного обтекания частиц потоком набегающего воздуха. В результате частицы газопылевого облака испытывают большее сопротивление воздуха, чем сплошное ядро, притормаживают, нагреваются, плавятся, испаряются и излучают.

На рис. 3 приведена высотная зависимость светимости метеороида в видимых звездных величинах [8, 26]. Увеличение светимости в интервале высот от 100 до 30 км объясняется проникновением метеороида в плотные слои атмосферы и возрастающим сопротивлением воздуха. Энергия на излучение должна непрерывно увеличиваться, и по закону Стефана–Больцмана должна непрерывно увеличиваться и температура излучающей поверхности. В то же время на пологих участках 1 и 2 кривой на рис. 3 ни интенсивность излучения, ни температура не увеличиваются.

Для заметного разрушения вещества метеороида на этих высотах давления  $P$  набегающего потока воздуха еще недостаточно. На рис. 4 представлена высотная зависимость давления  $P$  набегающего потока воздуха на метеороид. Здесь  $P = \rho v^2$ ,  $\rho$  – плотность воздуха на расчетной высоте. Как видно из графика, давление на пологом участке 2 не превышает 0.9 МПа.

Разумно предположить, что поступающая энергия в участках 1 и 2 затрачивается на преобразо-

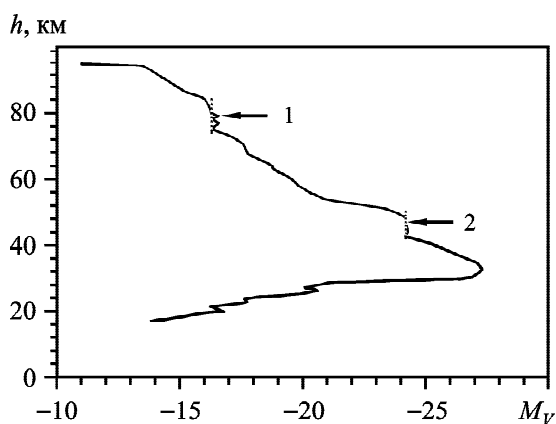


Рис. 3. Высотная зависимость светимости метеороида  $M_V$  в видимых звездных величинах. Цифрами 1 и 2 отмечены пологие участки

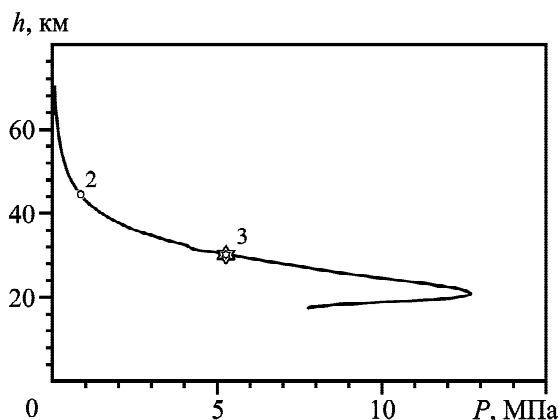


Рис. 4. Расчетная высотная зависимость давления набегающего потока воздуха: 2 – второй пологий участок, 3 – положение максимальной вспышки

вание вещества со сменой агрегатного состояния в поверхностном слое метеороида. Полагаем, что на участке 1 кривой светимости на рис. 3, в интервале высот  $84 \div 74$  км, в поверхностном слое происходит преобразование вещества из твердого в жидкое состояние – плавление. На участке 2, в интервале высот  $50 \div 42$  км, полагаем переход вещества из жидкого состояния в газообразное – испарение. На ниспадающей части кривой светимости на рис. 3 наблюдаются небольшие всплески светимости. Возможно, здесь происходят обратные процессы: конденсация и кристаллизация вещества метеороида с освобождением энергии.

Для определения температуры плавления и кипения вещества поверхностного слоя воспользуемся физико-химическим анализом данного метеороида [8, 31, 32]. Челябинский метеороид относят к семейству обычных хондритов класса LL5, т. е. это каменный метеороид с небольшим содержанием железа [8]. Химический состав хондрита близок к составу семейства земных минералов типа оливин. Оливин состоит в основном из форстерита –  $Mg_2SiO_4$  и фаялита –  $Fe_2SiO_4$ . Основные твердые химические элементы хондрита и их характеристики приведены в табл. 2.

Остальными химическими элементами – газообразным кислородом, освобожденным после термической диссоциации, и незначительными примесями (следами) иных химических элементов – пренебрегаем.

Таблица 2. Основные химические элементы хондрита, кроме кислорода, [8, 31, 32]

| Элемент | $T_{melt}$ , К | $T_{boil}$ , К | % по массе | $H_1$ , МДж/кг | $H_2$ , МДж/кг |
|---------|----------------|----------------|------------|----------------|----------------|
| Si      | 1683           | 3523           | 17.5       | 1.77           | 12.6           |
| Fe      | 1812           | 3473           | 20.3       | 0.25           | 6.27           |
| Mg      | 923            | 1368           | 21         | 0.35           | 5.26           |

В табл. 2 приведены температуры плавления  $T_{melt}$  и кипения  $T_{boil}$ , а также скрытая теплота плавления  $H_1$  и скрытая теплота парообразования  $H_2$ . Скрытые теплота плавления и теплота парообразования максимальны для кремния, и, следовательно, в основном он ответственен за поглощение энергии при смене агрегатного состояния. Далее в расчетах для отмеченных участков будем брать температуру плавления и кипения кремния. В этих участках, зная температуру и интенсивность излучения, по закону Стефана–Больцмана оценим площадь излучающей поверхности.

По температуре кипения кремния  $T_{boilSi} = 3523$  К рассчитаем площадь излучающей поверхности на участке 2 (см. рис. 3) в момент времени  $t_2 = 29$  с (соответствует 03:20:29 UT). Как видно из рис. 3,  $M_V(t_2) = -23.9$ . Согласно соотношению (4) интенсивность видимого излучения  $I_{opt}(t_2) \approx 1.87 \cdot 10^{12}$  Вт, а оптическая поправка  $r_{opt}(T_{boilSi}) \approx 0.2$  (рис. 2). Тогда из (5) следует, что полная интенсивность излучения  $I = I_{opt}/r_{opt} \approx 9.4 \cdot 10^{12}$  Вт, а площадь излучающей поверхности  $S_R$  равна [28]

$$S_R = \frac{I}{\sigma T_{boilSi}^4} = \frac{9.4 \cdot 10^{12}}{5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 3523^4} \approx 1.1 \cdot 10^6 \text{ м}^2.$$

Массу газопылевого облака фрагментов  $\Delta m$  в хвосте определим как массу фрагментов, которые отделились от метеороида не более чем  $\Delta t = 6$  с назад,

$$\Delta m = m(t - \Delta t) - m(t).$$

Облако фрагментов под действием набегающего потока воздуха начинает отставать от ядра, вытягивается и образует хвост. Поверхность хвоста нагревается и излучает. Визуально хвост можно представить как цилиндр с площадью поперечного сечения, равной площади миделя. Тогда полная площадь поверхности составит

$$S_R = 2\pi rL + 4\pi r^2,$$

где  $r = \sqrt{S/\pi}$  – радиус миделя, м;  $L$  – длина хвоста, м;  $S$  – площадь миделя, м<sup>2</sup>. Отсюда длина  $L$  и объем  $V$  хвоста с ядром запишутся в виде:

$$L = \frac{S_R - 4\pi r^2}{2\pi r} = \frac{S_R - 4S}{2\pi r},$$

$$V = SL = \pi r^2 \frac{S_R - 4S}{2\pi r} = \frac{r}{2}(S_R - 4S).$$

Усредненная плотность вещества хвоста  $\rho_1$  составит

$$\rho_1(t) = \frac{\Delta m(t)}{V}.$$

Излучающая поверхность формируется взаимодействием двух сред: газопылевого облака хвоста и окружающего воздуха. Допустим, что отношение плотностей хвоста и окружающего воздуха близко к постоянному значению с момента образования хвоста:

$$\xi = \frac{\rho_1}{\rho} \approx \text{const.}$$

Тогда это отношение может быть использовано для расчета площади излучающей поверхности вне участка 2. В табл. 3 приведены формулы и значения величин для вычисления отношения  $\xi$  на участке 2, где происходит изменение агрегатного состояния от жидкого к газообразному.

Соответствующие формулы для восстановления площади излучающей поверхности вне участка 2 приобретут следующий вид:

$$\rho_1 = \xi \rho,$$

$$V = \frac{\Delta m}{\rho_1} = \frac{m(t - \Delta t) - m(t)}{\rho_1},$$

Таблица 3. Расчет отношения плотностей сред

| Параметр             | Значение   |
|----------------------|--|
| Масса хвоста         | $\Delta m = m(t_2 - 6) - m(t_2) \approx 0.34$ кт           |
| Площадь мишеля       | $S(t_2) \approx 3730$ м <sup>2</sup>                       |
| Радиус мишеля        | $r(t_2) \approx 34.5$ м                                    |
| Объем хвоста         | $V = r(S_R - 4S)/2 \approx 18.3 \cdot 10^6$ м <sup>3</sup> |
| Высота               | $h \approx 49.5$ км  |
| Плотность хвоста     | $\rho_1 = \Delta m/V \approx 0.0185$ кг/м <sup>3</sup>     |
| Плотность воздуха    | $\rho \approx 0.00114$ кг/м <sup>3</sup>                   |
| Отношение плотностей | $\xi = \rho_1/\rho \approx 16.2$                           |

$$S_R = \frac{2V}{r} + 4S.$$

Температуру излучающей поверхности находим из уравнения

$$\sigma T^4 r_{opt}(T) = \frac{I_{opt}}{S_R}.$$

Результат расчета по этой формуле представлен на рис. 5. Температура излучающей поверхности в интервале времени 03:20:20–03:20:23 UT аппроксимирована сплайном с учетом температуры плавления кремния на участке 1.

### 3.2. Интенсивность излучения метеороида

Интенсивность полного излучения метеороида

$$I = \sigma T^4 S_R.$$

Результат расчета интенсивности излучения с учетом оптической поправки представлен на рис. 6.

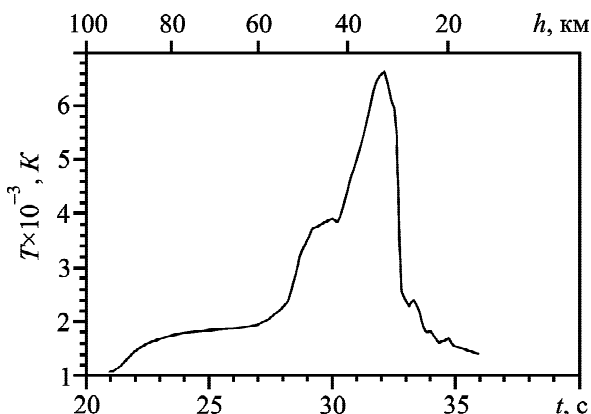


Рис. 5. Высотно-временная зависимость температуры излучающей поверхности метеороида

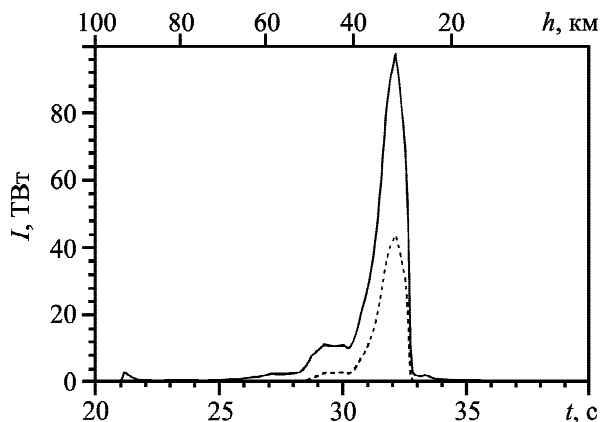


Рис. 6. Высотно-временная зависимость интенсивности излучения метеороида, видимого (пунктирная линия) и полного (сплошная линия)

Там же представлена интенсивность видимого излучения (пунктирная линия).

По известной температуре излучающей поверхности получаем распределение энергии излучения в трех стандартных диапазонах (рис. 7). Энергетический вклад излучений в трех диапазонах в полную энергию излучения приведен в табл. 4.

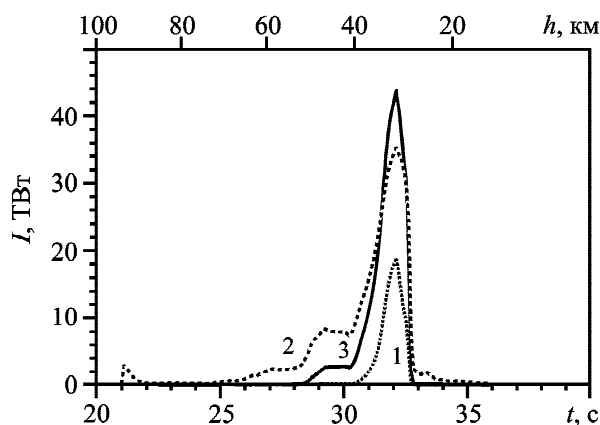


Рис. 7. Высотно-временная зависимость интенсивности излучения метеороида в диапазонах: 1 – ультрафиолетовом, 2 – видимом, 3 – инфракрасном

Таблица 4. Энергетические вклады излучений в стандартных диапазонах

| Излучение        | Диапазон, мкм | Вклад, % |
|------------------|---------------|----------|
| Ультрафиолетовое | 0.05 ÷ 0.40   | 10       |
| Видимое          | 0.40 ÷ 0.76   | 36       |
| Инфракрасное     | 0.76 ÷ 4.00   | 54       |

### 3.3. Оценка коэффициента динамического сопротивления и параметров абляции

Рассмотрим участок 1 на рис. 3 (падение метеороида на высотах 74 ÷ 84 км). Согласно сделанным допущениям температура излучающей поверхности метеороида на участке 1 постоянна и приблизительно равна температуре плавления кремния  $T_{meltSi} = 1683$  К.

На выбранных высотах сопротивление воздуха незначительно, и с большой долей уверенности предполагаем, что разрушение поверхностного слоя и отделение фрагментов отсутствует. Следовательно, значения массы и площади миделя метеороида постоянны на участке 1 и равны начальным. В частности, значение площади миделя равно  $S_0 = \pi r_0^2 \approx 3.14 \cdot 9^2 \approx 254$  м<sup>2</sup>. Здесь  $r_0 \approx 9$  м – начальный радиус космического тела. Воспользуемся также оптической поправкой для оценки полного излучения для температуры поверхности метеороида на участке 1 (рис. 3). Уравнение баланса в этом случае, согласно (8), приобретает вид

$$C_d \frac{\rho v^3}{2} S_0 \approx -m \frac{d v^2}{dt} - \frac{I_{opt}}{r_{opt}(T_{meltSi})}. \quad (9)$$

Воспользуемся приближением (9) для расчета коэффициента динамического сопротивления  $C_d$ . Для этого построим регрессию временной зависимости интенсивности излучения (рис. 8) и регрессию для мощности кинетической энергии на

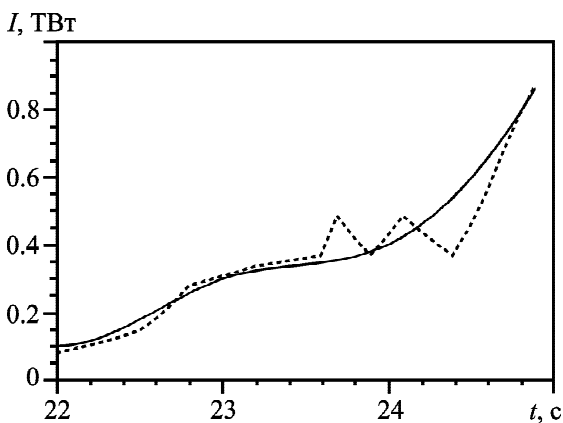


Рис. 8. Временная зависимость интенсивности полного излучения метеороида: пунктирная кривая – наблюдения с оптической поправкой, сплошная кривая – соответствующая регрессия

выбранном интервале. Обе функции представлены в правой части уравнения (9).

Для определения коэффициента  $C_d$  рассчитаем левую и правую части уравнения (9) для разных значений коэффициента динамического сопротивления. Левая часть соотношения (9) представляет мощность сил упругих столкновений метеороида с воздухом  $I_d(t, C_d)$  (рис. 9, а).

Погрешность выбора  $C_d$  рассчитаем как относительное среднее квадратичное отклонение

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \left( \frac{I(t_k) - I_d(t_k, C_d)}{I(t_k)} \right)^2},$$

$$t_k = 22 + k\Delta t; \quad k = 0, \dots, n-1; \quad \Delta t = 0.1 \text{ с}; \quad n = 30;$$

где  $I(t)$  – правая часть уравнения (9).

Кривая погрешности приведена на рис. 9, б. Выбираем приемлемое значение  $C_d = 0.76$ .

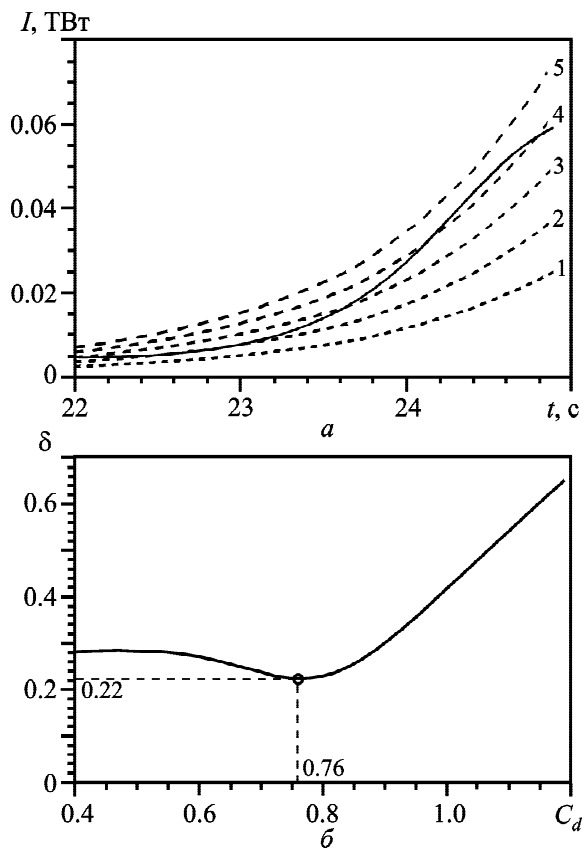


Рис. 9. Временные зависимости мощности сопротивления воздуха: наблюдаемая (сплошная линия) и расчетные (пунктирные линии 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно для значений коэффициента  $C_d = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$  и  $1.2$ ) (а) и относительное среднее квадратичное отклонение (б)

### 3.4. Расчет отношения $C_h/Q$ и высотной зависимости площади миделя $S$

С учетом расхода массы и с учетом наблюдаемой скорости из работы [26] используем уравнение абляции (2) для оценки площади миделя  $S$  и отношения  $C_h/Q$

$$\frac{dm}{dt} \approx -\frac{C_h}{2Q} \rho v^3 S. \quad (10)$$

Результат приближения (10) показан на рис. 10. Временная зависимость площади миделя приведена на рис. 11. Достигнуто значение отношения  $C_h/Q \approx 2.5 \cdot 10^{-8}$  кг/Дж. Заметим, что мидель, в отличие от отношения  $C_h/Q$ , имеет высотную зависимость, что позволило оценивать их раздельно.

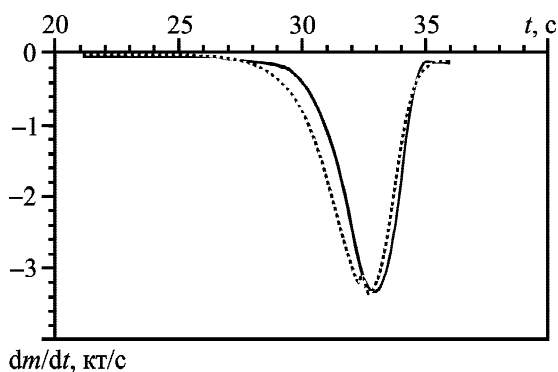


Рис. 10. Временная зависимость расхода массы метеороида: сплошная линия – расход массы согласно кривой светимости, пунктирная линия – согласно модели абляции

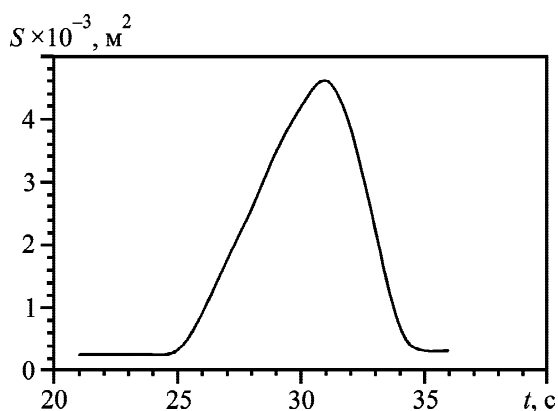


Рис. 11. Временная зависимость площади миделя метеороида

В уравнении энергетического баланса (8) рассчитаем значение удельной энергии абляции  $Q$  и одновременно уточним значение площади миделя  $S$ . Погрешность выбора  $Q$  рассчитаем как

$$\delta_Q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \left( \frac{I(t_k) - I_{obs}(t_k)}{I_{obs}(t_k)} \right)^2} + \frac{|E - E_{obs}|}{E_{obs}},$$

$$t_k = 20 + k\Delta t; \quad k = 0, \dots, n-1; \quad \Delta t = 0.1 \text{ с}; \quad n = 160;$$

где  $E$  и  $E_{obs}$  – интегральные оценки (6) и (7) на всем интервале времени падения метеороида. Результат приближения приведен на рис. 12, удельная энергии абляции составила  $Q \approx 16.2 \cdot 10^6$  Дж/кг. Следовательно, значение коэффициента теплообмена примет значение  $C_h = (C_h/Q)Q = 2.5 \cdot 10^{-8} \cdot 16.2 \cdot 10^6 \approx 0.4$ .

Энергия, затраченная на абляцию и излучение, берется из кинетической энергии метеороида. Из рис. 1 видно, что наблюдаемая скорость стро-

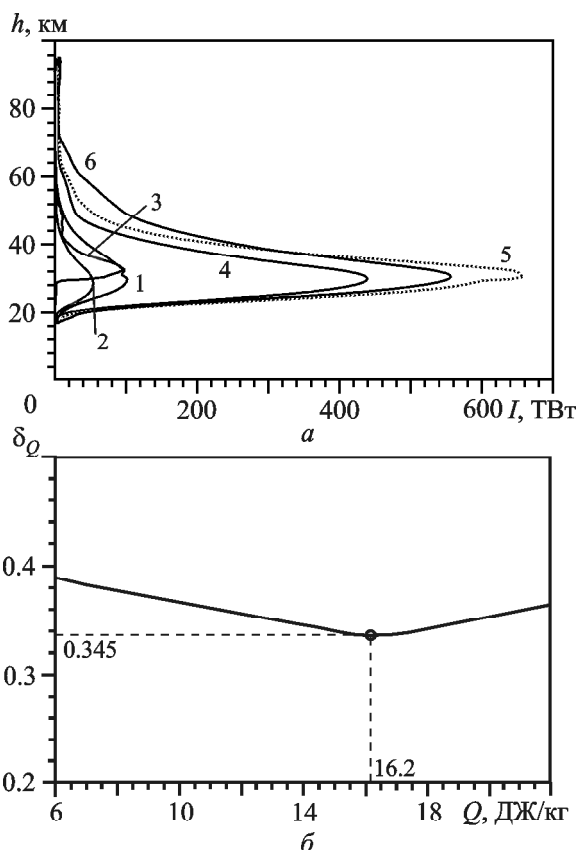


Рис. 12. Высотная зависимость энергетических потерь метеороида (1 – при столкновении с воздухом, 2 – при разрушении, 3 – излучение, 4 – в процессе удаления фрагментов, 5 – суммарные потери, 6 – наблюдаемая мощность потерь) (а) и погрешность выбора удельной энергии абляции  $\delta_Q$  (б)



го меньше расчетной (с учетом только упругих столкновений с частицами воздуха). Различие этих скоростей наиболее велико в области высот  $60 \div 35$  км, где потери на абляцию и излучение максимальны. Расчет площади миделя, удельной энергии абляции и коэффициента динамического сопротивления  $C_d$  по соотношениям (1)–(5) учитывал энергетический баланс потерь (8) и (9). Результаты расчета скорости и площади миделя приведены на рис. 11 и рис. 13.

Разница между скоростями, наблюдаемой и расчетной (с учетом только упругих столкновений с частицами воздуха), соответствует энергетическим потерям на абляцию, излучение и отделение фрагментов. Общие энергетические потери приведены на рис. 14.

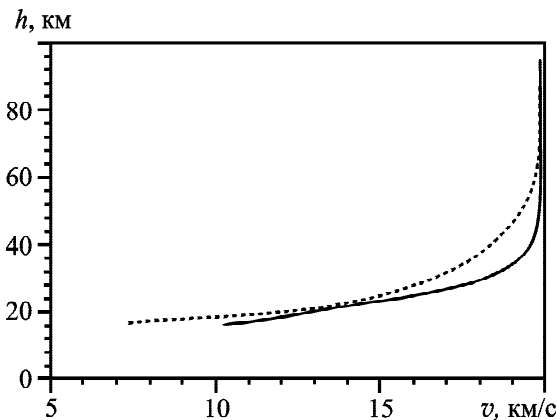


Рис. 13. Высотная зависимость скорости метеороида для предварительно рассчитанной площади миделя: пунктирная линия — наблюдаемая скорость; сплошная линия — расчетная с учетом упругих столкновений с частицами воздуха

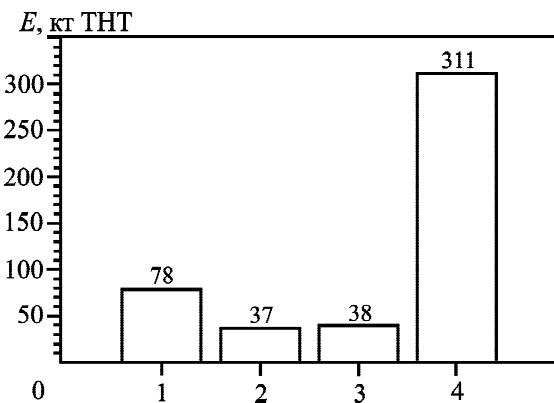


Рис. 14. Энергетические потери: 1 — передача воздуху (78 кт ТНТ); 2 — на излучение (37 кт ТНТ); 3 — на абляцию, разрушение (38 кт ТНТ); 4 — на потерю массы (311 кт ТНТ)

Относительная погрешность общего энергетического баланса не превышает 2 %. Соответствующие потери энергии: на сопротивление воздуха — 16.8 %, на излучение — 8 %, на абляцию и разрушение — 8.2 %, на отделение фрагментов — 67 %.

#### 4. Обсуждение

Для составления энергетического баланса взаимодействия метеороида с воздухом потребовалось разделять “внешнее” взаимодействие — упругие столкновения и отделение фрагментов, и “внутреннее взаимодействие” — разрушение, нагрев и излучение.

Термин “абляция” традиционно относят к процессу потери массы. В нашем случае удобно разделить абляцию на два процесса: абляция как разрушение, т. е. как часть “внутреннего” взаимодействия и абляция как удаление, т. е. как часть “внешнего” взаимодействия. Из уравнения (8) можно выделить полную интенсивность энергии абляции

$$-Q \frac{dm}{dt} - \frac{dm}{dt} \frac{v^2}{2} = -\frac{dm}{dt} \left( Q + \frac{v^2}{2} \right),$$

где удельная энергия абляции  $Q$  отвечает за нагрев, разрушение, плавление и испарение, а член уравнения  $v^2/2$  указывает на потерю кинетической энергии с отделением фрагментов. Вместе эти два процесса составляют понятие “абляция” как потеря массы.

Эффективное разделение коэффициента динамического сопротивления  $C_d$  и миделя произошло после составления энергетического и материального баланса в обусловленном интервале высот. В уравнении (1) площадь миделя в модели торможения играет роль инерции. Поэтому в наибольшей степени высотная зависимость площади миделя соответствовала высотной зависимости расхода массы. Коэффициент  $C_d$  определялся независимо из энергии упругих столкновений при известном миделе. Погрешность определения  $C_d$  ограничивается погрешностью составления энергетического баланса.

Использование энергетического баланса в расчетах не только дополнило картину падения метеороида, но и позволило добиться лучших оценок расчетных параметров с использованием алгоритма регуляризации.

Найденные в рамках метеорной физики результаты представляются адекватными, поскольку результаты, полученные из траекторных наблюдений, согласуются с результатами, вычисленными из сопутствующей интенсивности излучения. Более подробное изучение процессов, сопровождающих падение метеороида, как отмечено в [26], должно базироваться на уравнениях физико-химической и плазменной газовой динамики.

## 5. Основные результаты

1. Составлен и рассчитан высотно-временной баланс потерь энергии для процессов, сопровождающих падение Челябинского метеороида.

2. По расходу массы рассчитана временная зависимость площади миделя Челябинского космического тела и получена оценка отношения  $C_h/Q \approx 2.5 \cdot 10^{-8}$  кг/Дж.

3. С помощью энергетического баланса оценены коэффициенты динамического сопротивления воздуха ( $C_d \approx 0.76$ ) и теплообмена ( $C_h \approx 0.4$ ), а также удельная энергия абляции ( $Q \approx 16.2$  МДж/кг).

4. Суммарные энергетические потери составили: передача воздуху – 78 кт ТНТ (16.8 %); на излучение – 37 кт ТНТ (8 %); на абляцию, разрушение – 38 кт ТНТ (8.2 %); на потерю массы с отделением фрагментов – 311 кт ТНТ (67 %).

## 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., Гивишвили Г. В., Глухов Я. В., Давиденко Д. В., Зубачев Д. С., Иванов В. Н., Кархов А. Н., 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., Бiryukov E. E., 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., Ibodov 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. 1–10.
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., Hertkom N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., and Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, 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., 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., Hertkom N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., and Mikouchi T. Supplementary materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. 2013. vol. 342. URL: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1) (дата обращения: 27.07.2018)
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. DOI: 10.15407/knit2013.06.038
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. DOI: 10.7868/S0016794014050034
18. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. Т. 55, № 3. С. 370–385. DOI: 10.7868/S0016794015030049
19. Попова О. П., Шувалов В. В., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А., Глазачев Д. О., Емельяненко В. В., Каргашова 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. 364–376.
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. 3–66. DOI: 10.15407/rpra22.01.053
22. Черногор Л. Ф. Атмосферно-сейсмический эффект Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22. № 2. С. 123–137. DOI: 10.15407/rpra22.02.123
23. Стулов С. П., Мирский В. Н., Вислый А. Н. *Аэродинамика болидов*. Москва: Наука. Физматлит, 1995. 240 с.
24. *Катастрофические воздействия космических тел*. Под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчикова. Москва: ИХЦ “Академкнига”, 2005. 310 с.
25. Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений*. Москва: Наука, 1981. 416 с.
26. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Динамика падения Челябинского метеороида: высотно-временные зависимости. *Радиофизика і радиоастрономія*. 2018. Т. 23, № 2. С. 104–115. DOI: 10.15407/rpra23.02.104
27. 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 “Радіофізика та електроніка”*. 2017. Вип. 26. С. 75–79.
28. Кручиненко В. Г. *Математико-фізичний аналіз метеорного явища*. Київ: Наукова думка, 2012. 294 с.
29. *Атмосфера. Справочник*. Под ред. Ю. С. Седунова, С. И. Авдюшина, Е. П. Борисенкова и др. Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. 508 с.
30. 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
31. *Химический энциклопедический словарь*. Под ред. И. Л. Кнунянц. Москва: Сов. энциклопедия, 1983. 792 с.
32. *Справочник физических констант горных пород*. Под ред. С. П. Кларка. Москва: Мир, 1969. 544 с.

## REFERENCES

1. SOLAR SYSTEM RESEARCH. 2013. vol. 47, no. 4. (Thematical issue).
2. ALEKSEEV, V. A. (ed.), 2013. *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. EMELYANENKO, V. V., POPOVA, O. P., CHUGAI, N. N., SHEL'YAKOV, 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., SHUVALOV, V. V., 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., 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., ISHCHEENKO, A. V., SCHMITT-KOPLIN, P., HERTKORN, N., NAGAO, K., HABA, M. K., KOMATSU, M. and MIKOUCHI, T., 2013. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. vol. 342, is. 6162, pp. 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., ISHCHEENKO, 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 recovery, and characterization. *Science* [online]. vol. 342. [viewed 27 July 2018]. Available from: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://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). DOI: 10.15407/knit2013.06.038
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: ANTIPIIN, N. A., ed. *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: ANTIPIIN, 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: 10.15407/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: 10.15407/rpra22.02.123
23. STULOV, V. P., MIRSKII, V. N. and VISLYI, A. I., 1995. *Aerodynamics of Bolides*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
24. ADUSHKIN, V. V. and NEMCHINOV, I. V. (eds.), 2005. *Catastrophic Impacts of Cosmic Bodies*. Moscow, Russia: ECC, Akademkniga Publ. (in Russian).
25. BRONSTEN, V. A., 1983. *Physics of Meteoric Phenomena*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publ. Co.
26. CHERNOGOR, L. F. and MILOVANOV, YU. B., 2018. Dynamics of the Chelyabinsk Meteoroid Fall: Altitude and Time Dependences. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 23, no. 2, pp. 104–115 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra23.02.104
27. 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).

28. KRUCHINENKO, V. G., 2012. *Mathematical and physical analysis of the meteor phenomena*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka Publ. (in Ukrainian).
29. SEDUNOV, YU. S., AVDIUSHIN, S. I., BORISENKOV, E. P., et al. (eds.), 1991. *Atmosphere. Handbook*. Leningrad, Russia: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
30. 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
31. KNUNYANTS, I. L. (ed.), 1983. *Chemical encyclopedic dictionary*. Moscow, Russia: Soviet encyclopedia Publ. (in Russian).
32. CLARKE, S. P. (ed.), 1969. *Handbook of physical constants of rocks*. Moscow, Russia: Mir Publ. (in Russian).

Yu. B. Mylovanov and L. F. Chernogor

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

#### DYNAMICS OF THE CHELYABINSK METEOROID ENTERING THE ATMOSPHERE: MASS-ENERGY BALANCE

*Purpose:* The study is concerned with determining the height and temporal dependences of the Chelyabinsk meteoroid surface temperature, its emission rate and energy losses, as well as calculations of its ablation parameters, the coefficient of dynamical resistance, and the correction to the height-time dependence of the midsection.

*Design/methodology/approach:* Numerical calculations have been made of the meteoroid temperature with accounting for the preliminary estimates of the midsection and of the total optical emission intensity, with the optical corrections taken into account. The conditions for estimating the dynamical resistance have been determined. The corrected height-time dependence of the midsection has been calculated with the known mass loss rate. The implementation of the regularization algorithm utilizes the energy balance.

*Findings:* The balance of energy losses includes the equations of meteor physics taking into account the deceleration force, the ablation processes, emissions, and the detachment of the meteoroid fragments. The height-time dependences of temperature, emission rates, and the midsection have been obtained. The successive iterations in the regularization algorithm resulted in the corrections to the magnitude of the coefficient of dynamical resistance, the specific ablation energy, and the heat transfer coefficient. The branching ratio for the total kinetic energy is as follows: 16.8 % for air resistance, 8 % for emissions, 8.2 % for ablation and defragmentation, and 67 % for the kinetic energy of the detached fragments.

*Conclusions:* Numerical simulations have provided the height and temporal dependences of mass, midsection, emission rates, and meteoroid temperature. The ablation parameters and the

dynamical resistance coefficient have been estimated. A balance among energy loss processes associated with the Chelyabinsk meteoroid entering the atmosphere has been constructed.

*Key words:* Chelyabinsk meteoroid, height and temporal dependences, meteoroid speed, meteoroid temperature, midsection, ablation, total emission, energy balance, coefficient of dynamical resistance, regularization

Ю. Б. Милованов, Л. Ф. Черногор

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

#### ДИНАМІКА ПАДІННЯ ЧЕЛЯБІНСЬКОГО МЕТЕОРОЇДА: МАТЕРІАЛЬНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС

*Предмет і мета роботи:* Отримання висотних і часових залежностей температури поверхні, інтенсивності випромінювання та втрат енергії Челябінського метеороїда. Розраховано параметрів його абляції, коефіцієнта динамічного опору, уточнення висотно-часової залежності міделя.

*Методи та методологія:* Виконано числові розрахунки температури метеороїда з урахуванням попередньої оцінки міделя, інтенсивності повного випромінювання з урахуванням оптичної поправки, визначено умови для оцінки коефіцієнта динамічного опору. Розраховано уточнену висотно-часову залежність міделя за відомою витратою маси. Для реалізації регуляризуючого алгоритму використано енергетичний баланс.

*Результати:* З використанням рівнянь метеорної фізики з урахуванням сили гальмування, процесів абляції, випромінювання та відділення фрагментів речовини метеороїда складено баланс енергетичних втрат. Отримано висотно-часові залежності температури, інтенсивності випромінювання та міделя. В результаті послідовних ітерацій регуляризуючого алгоритму уточнено значення коефіцієнта динамічного опору, питомої енергії абляції та коефіцієнта теплообміну. Показано, що витрата повної кінетичної енергії на опір повітря складає 16.8 %, на випромінювання – 8 %, на абляцію та руйнування – 8.2 %, на втрату відокремлених фрагментів – 67 %.

*Висновок:* В результаті числового моделювання розраховано часові та висотні залежності маси, міделя, інтенсивності випромінювання та температури метеороїда. Оцінено параметри абляції та коефіцієнт динамічного опору. Складено баланс втрат енергії на процеси, що супроводжували падіння Челябінського метеороїда.

*Ключові слова:* Челябінський метеороїд, висотно-часові залежності, швидкість метеороїда, температура метеороїда, мідель, абляція, повне випромінювання, енергетичний баланс, коефіцієнт динамічного опору, регуляризація

Статья поступила в редакцию 24.07.2018