

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ (о некоторых работах последних лет)



Леонид Александрович Домбровский
Объединенный ин-т высоких температур РАН



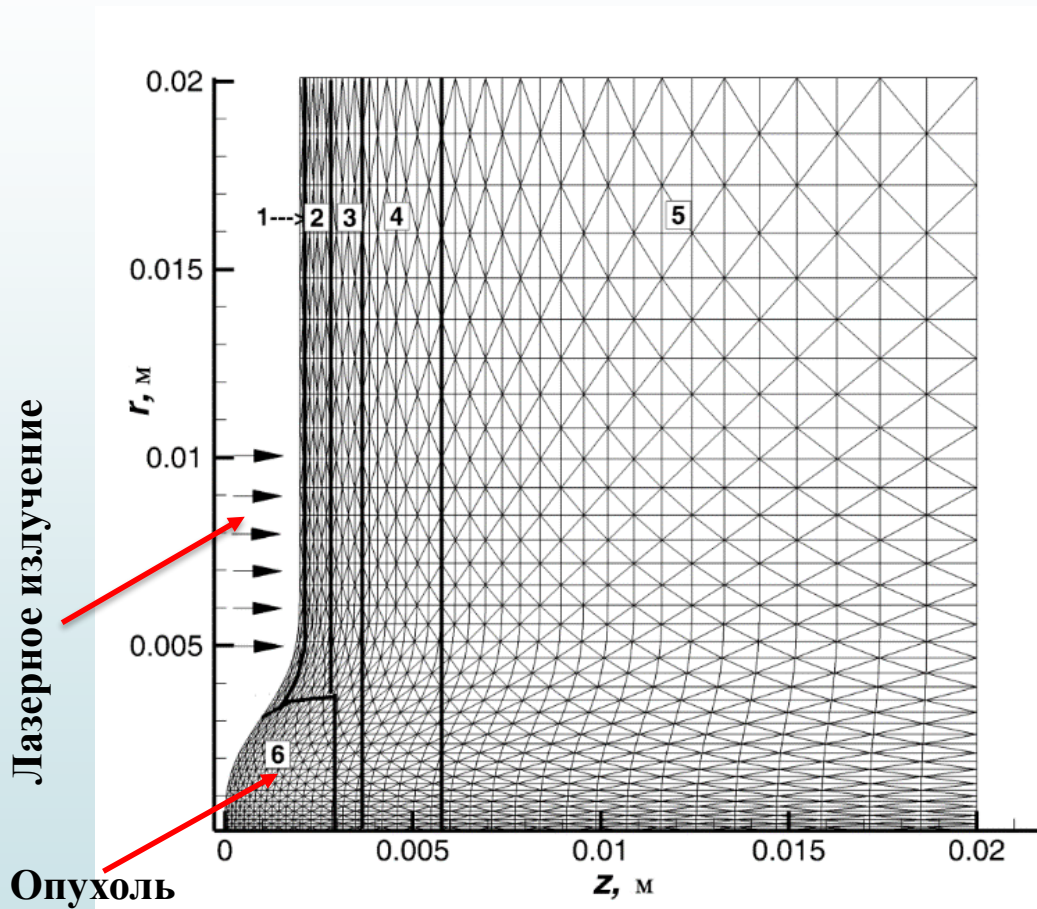
Рассматриваются:

- ❖ **Обоснование предложенного метода лазерной гипертермии раковых опухолей;**
- ❖ **Оценка новой концепции тепловой защиты солнечного зонда.**

Названные задачи объединяет общий методический подход:

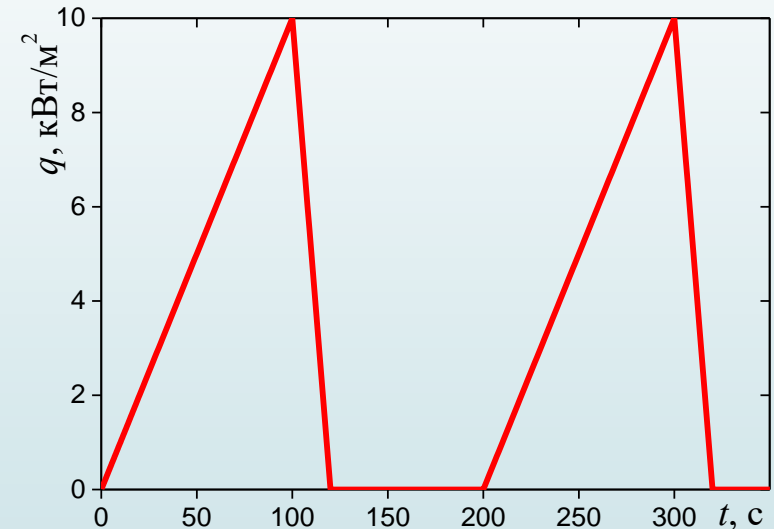
- **Расчет переноса излучения в дисперсных системах с многократным рассеянием на основе транспортной модели и дифференциальных приближений;**
- **Решение уравнения энергии с учетом кинетики теплового разрушения клеток опухоли или кинетики сублимации частиц, экранирующих тепловое излучение Солнца.**

СТРАТЕГИЯ «УДУШЕНИЯ» И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОПУХОЛЕЙ (теоретическая модель)



- 1 – эпидермис
- 2, 3 – дермис
- 4 – жировой слой
- 5 – мышечная ткань

Терапевтическое
окно прозрачности:
 $0.6 < \lambda < 1.4 \text{ мкм}$



Фрагмент циклограммы нагрева

Продолжительность сеанса – 30–40 мин.

Расчетная область осесимметричной модельной задачи

Периодически нагревается только кольцевая область тела вокруг опухоли.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Транспортное уравнение переноса излучения

(для многократного рассеяния в слабо поглощающих средах [1]):

$$\vec{\Omega} \nabla I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \beta_{\lambda}^{\text{tr}} I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{\sigma_{\lambda}^{\text{tr}}}{4\pi} \int_{(4\pi)} I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega}$$

В. Аддитивность направленной и диффузной компонент поля излучения

(метод академика В.В. Соболева).

С. Дифференциальное приближение для диффузной компоненты [1–3]

(математические выкладки и формулировки спектральных краевых задач для краткости опускаются).

1. L.A. Dombrovsky, D. Baillis, *Thermal Radiation in Disperse Systems: An Engineering Approach*, BH, NY, 2010.
2. L. Dombrovsky, J. Randrianalisoa, D. Baillis, *J. Optical Soc. Amer. A* 23 (1) (2006) 91–8.
3. L.A. Dombrovsky, J.H. Randrianalisoa, W. Lipiński, V. Timchenko, *Comput. Thermal Sci.* 5 (6) (2013) 521–30.

УРАВНЕНИЯ ЭНЕРГИИ И КИНЕТИКИ ДЕГРАДАЦИИ ТКАНЕЙ

Система уравнений энергии (1) для биологической ткани (включая венозную кровь) и (2) для артериальной крови:

теплообмен артериальной крови
с окружающими тканями

$$(1 - \varepsilon_a)(\rho c)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = \nabla[(1 - \varepsilon_a)k_t \nabla T_t] + h_{b,t}(T_b - T_t) + (1 - \varepsilon_a)W_m + \left(1 - \varepsilon_a \frac{\alpha_b}{\alpha}\right)W + W_{ch} \quad (1)$$

$$\varepsilon_a (\rho c)_b \left(\frac{\partial T_b}{\partial t} + \vec{u}_b \nabla T_b \right) = \nabla[\varepsilon_a k_b \nabla T_b] - h_{b,t}(T_b - T_t) + \varepsilon_a \frac{\alpha_b}{\alpha} W \quad (2)$$

ε_a – объемная доля артериальной крови, W_m – тепловой эффект клеточного метаболизма

W – мощность поглощенного излучения, W_{ch} – тепловой эффект эндотермических повреждений ткани

Кинетические уравнения для повреждения (а) артериальной крови и (б) окружающих тканей:

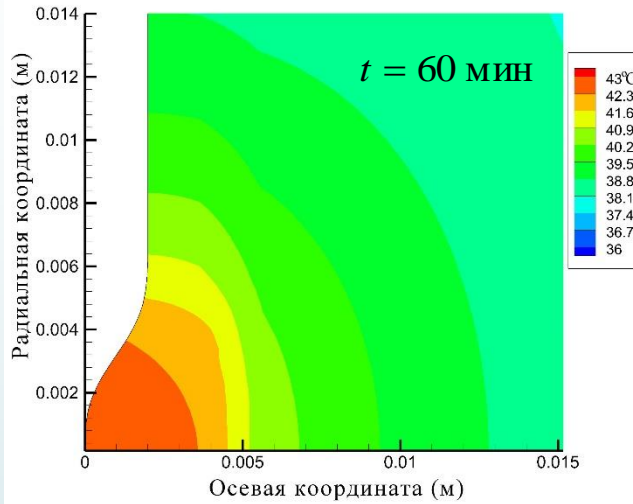
$$\frac{\partial \xi_b}{\partial t} = (1 - \xi_b)A_b \exp\left(-\frac{E_b}{RT_b}\right) \quad (a) \quad \frac{\partial \xi_t}{\partial t} = (1 - \xi_t)A_t \exp\left(-\frac{E_t}{RT_t}\right) - B_t \xi_t \omega_b \quad (b)$$

Регенерация живых тканей
в результате артериальной перфузии ω_b

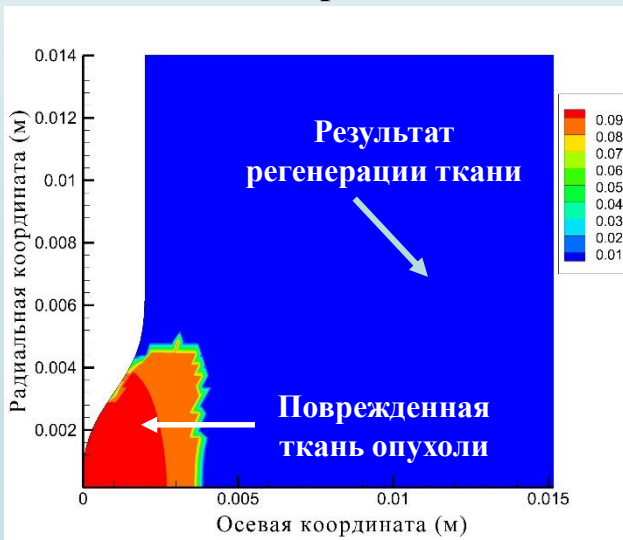
1. L.A. Dombrovsky, V. Timchenko, M. Jackson, Indirect heating strategy of laser induced hyperthermia: An advanced thermal model, *Int. J. Heat Mass Transfer* 55 (2012) 4688–700.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ПРЕИМУЩЕСТВА «УДУШЕНИЯ» ОПУХОЛИ (Indirect Heating Strategy – IHS)

Поле температуры



Степень повреждения ткани



Преимущества предложенной стратегии
(в отличие от прямого лазерного нагрева):

- Тепло поступает к опухоли с разных сторон, что приводит к ее равномерному объемному нагреву.
- Система тепловой регуляции человека не рассчитана на поступление тепла из объема тела («память» гипоталамуса); такой нагрев не вызывает значимого увеличения кровотока.
- Перегрев артериальной крови, поступающей в опухоль, приводит к частичной потере кислорода эритроцитами и кислородному голоданию (удушению) опухоли, что предотвращает регенерацию опухолевых клеток.
- Водяное охлаждение освещаемой поверхности тела с помощью прозрачной накладки с гибкими трубками значительно снижает боль при сеансе гипертермии.

СОЛНЕЧНЫЙ ЗОНД (КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ)

NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory - <http://www.jhuapl.edu/newscenter/pressreleases/2014/140318.asp>

Плита тепловой защиты



ЭКРАНИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТИЦАМИ, ГЕНЕРИРУЕМЫМИ РАЗЛАГАЮЩИМСЯ МАТЕРИАЛОМ

Основные требования к облаку частиц:

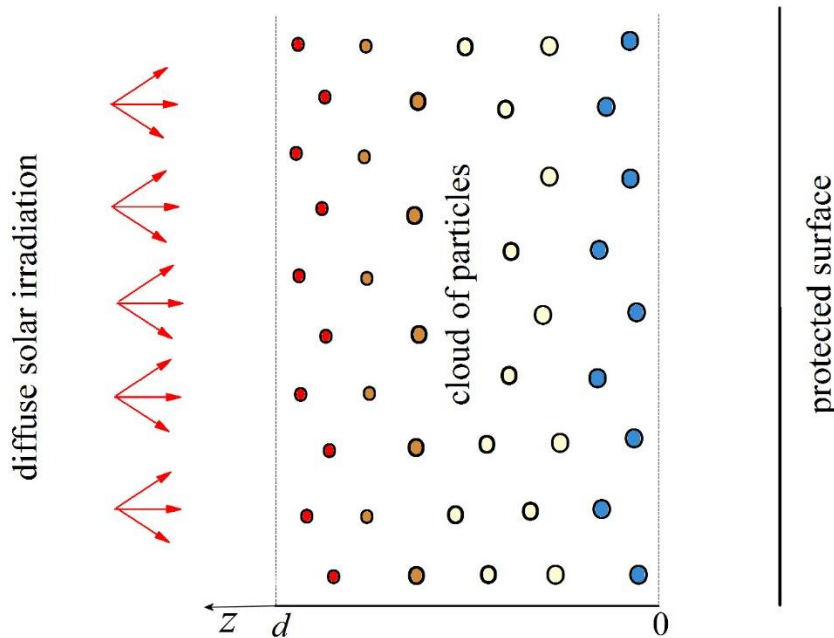
- **Значительное отражение солнечного излучения;**
- **Малая скорость сублимации твердого вещества частиц до ~ 3000 К.**

Требования к спектральным оптическим свойствам частиц:

- **Высокое альbedo частиц - для значительного отражения излучения (при этом объемное поглощение излучения в облаке велико вследствие многократного рассеяния);**
- **Продолжительная сублимация относительно крупных частиц – решающее преимущество.**

Серия расчетов показала, что SiC – приемлемый выбор для частиц тепловой завесы.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



Основное допущение:

- ✓ Перемешивание испаряющихся и исходных частиц пока не учитывается.

Одномерная краевая задача [1]:

$$-(Dg')' + \alpha g = \alpha F_{pv}(z)$$

$$Dg'(0) = (g(0) - F_w)/2$$

$$Dg'(d) = (F_{sol} - g(d))/2$$

Прошедший поток излучения:

$$q_w = \int_0^{\infty} q_{w,\lambda} d\lambda$$

$$q_{w,\lambda} = (g(0) - F_w)/2$$

$$D = 1/(4\beta_{tr}) \quad \beta_{tr} = \alpha + \sigma_{tr}$$

Обозначения: $\alpha = f_v E_a$ $\sigma_{tr} = f_v E_s^{tr}$

$$F_{pv} = 4\pi d_b(T_p) \quad F_{sol} = \pi d_b(T_{sol})/\bar{R}^2 \quad F_w = 4\pi d_b(T_w)$$

$$\bar{R} = R/R_{sol} \quad I_b(T) - \text{функция Планка}$$

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ СУБЛИМИРУЮЩЕГО ОБЛАКА ЧАСТИЦ

Уравнение энергии:

$$\rho(T_p) c(T_p) \frac{\partial T_p}{\partial t} = P(t, z) / f_v(t, z) - 3\dot{m}(t, z) L / a(t, z)$$

Начальное условие: $T_p(0, z) = T_w$

Поглощенная мощность излучения:

$$P = \int_0^{\infty} p(z) d\lambda$$
$$p(z) = \alpha [g(z) - F_{pv}(z)]$$

Массовая скорость сублимации SiC:

$$\dot{m} = A \exp\left(-\bar{E}_a / T\right) \text{ – закон Аррениуса}$$

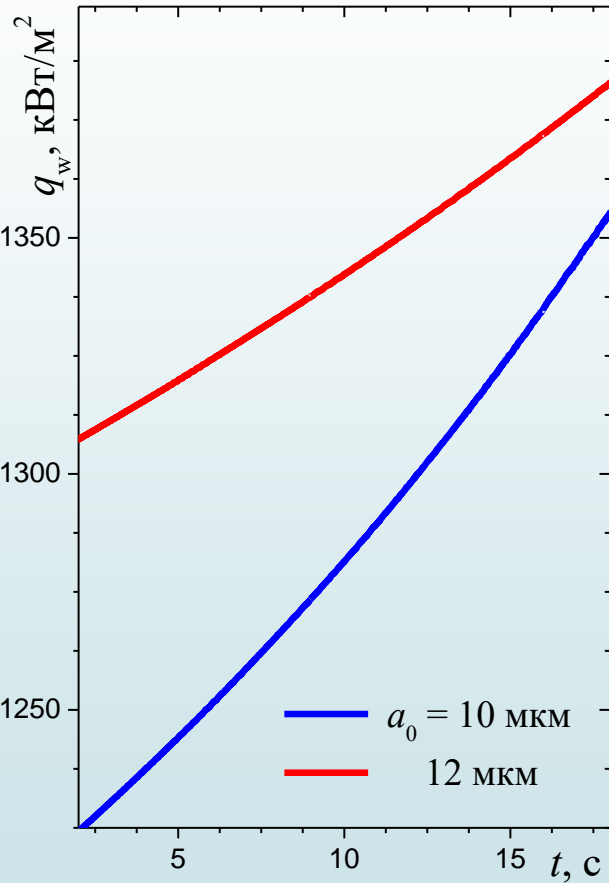
$$\bar{E}_a = 90707 \text{ К} \quad A = 1.709 \cdot 10^{11} \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{с})$$

Уменьшение радиуса и объемной доли частиц:

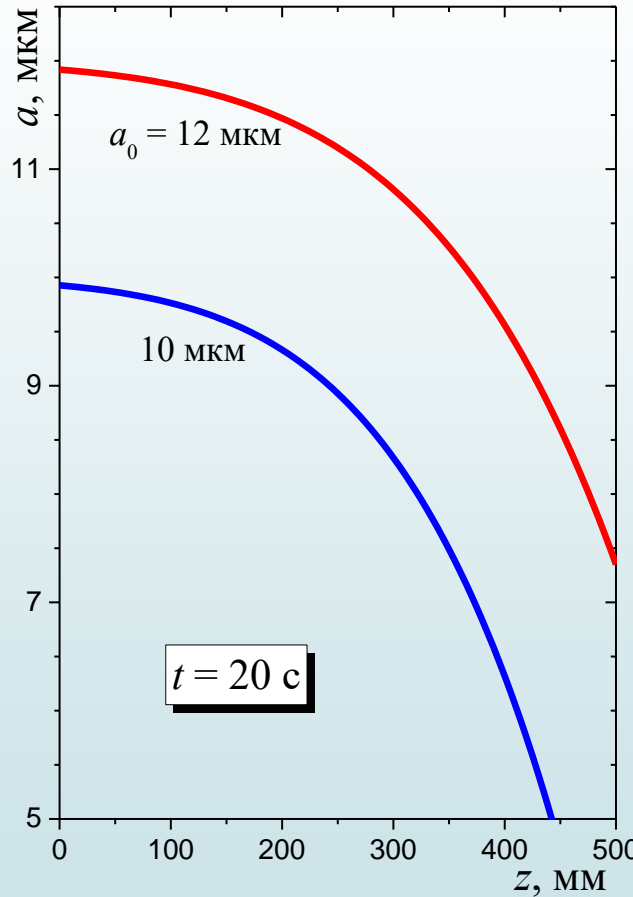
$$\frac{\partial a}{\partial t} = -\dot{m}(t, z) / \rho \quad a(0, z) = a_0 \quad f_v(t, z) = f_{v0} (a(t, z) / a_0)^3$$

РЕШЕНИЕ МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

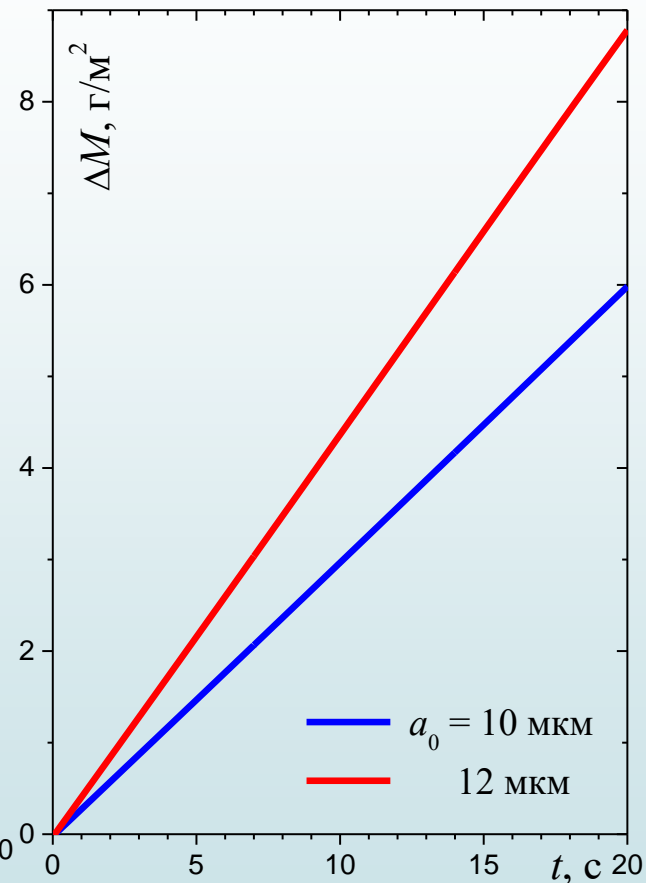
Основные параметры: $\bar{R} = 5$, $T_w = 2000 \text{ К}$, $T_{p,\max} = 3100 \text{ К}$, $f_{v0} = 2 \cdot 10^{-5}$



Прошедший поток излучения



Радиус частиц



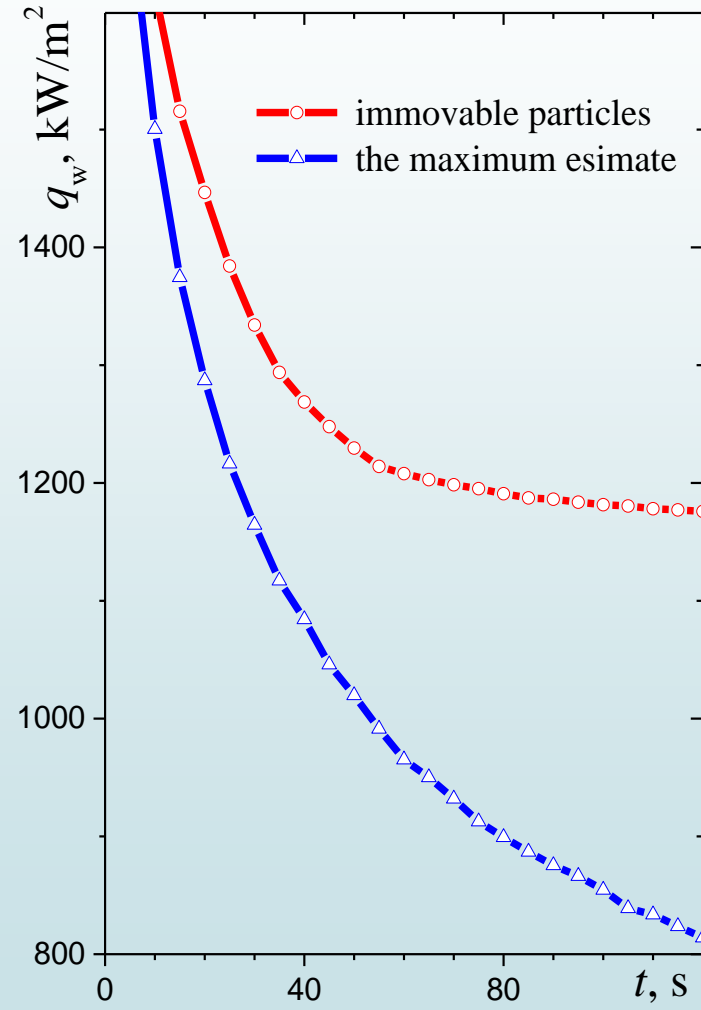
Потеря массы облака частиц

$$q_{\text{solar}} = 2940 \text{ кВт/м}^2$$

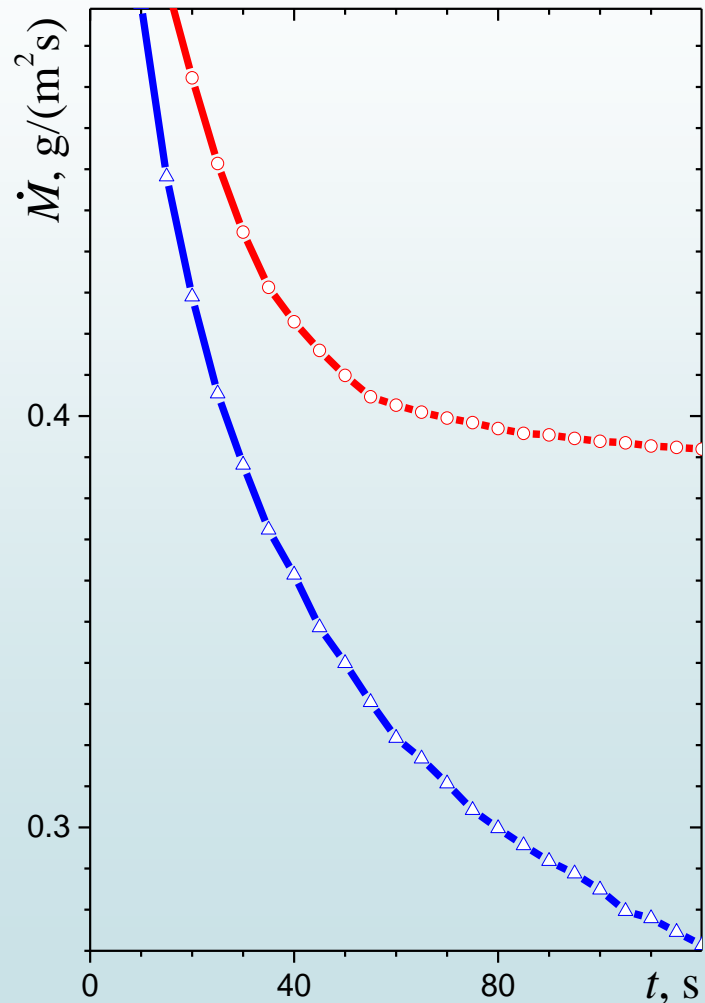
➤ Скорость потери массы – на уровне 1.5 кг/(м² час).

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛАКА ЧАСТИЦ И ОЦЕНКА РОЛИ СВЕТОГО ДАВЛЕНИЯ

✓ Сила давления света, действующая на отдельную частицу:
$$F_{\text{rad}}(t, z) = \frac{\pi [a(t, z)]^2}{c_0} \int_0^{\infty} q(t, z) Q_{\text{tr}}(t, z) d\lambda$$



Прошедший поток излучения



Потеря массы облака частиц

**Максимальная оценка
предполагает
равномерное
перемешивание частиц**

**Ожидаемая скорость
потери массы:**

$$\dot{M} \approx 1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{ час}}$$

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

**Представленные физические и вычислительные модели разработаны автором.
Расчеты проведены без использования коммерческих кодов.**

**Соавторами работы по гипертермии, которая проводилась с 2011 по 2015 г.,
являются коллеги из Австралии (UNSW и Prince of Wales Hospital, Sydney),
которые не только финансировали работу, но и активно участвовали в
обсуждении результатов.**

**В исследовании предлагаемого метода тепловой защиты солнечного зонда
приняли участие Д.Л. Ревизников (МАИ), А.П. Крюков (МЭИ) и В.Ю. Левашов
(Ин-т механики МГУ), которые являются полноправными соавторами работы.
Работа принята к опубликованию в международном журнале
“Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer”.**

Спасибо за внимание!

ОИВТ, Москва, 2017