

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЖИДКОСТЯМИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Л. Г. Астафьева<sup>1\*</sup>, В. К. Пустовалов<sup>2</sup>

УДК 535:621.3.049.77;620.3

<sup>1</sup> Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 220072, Минск, просп. Независимости, 68, Беларусь; e-mail: astafev@dragon.bas-net.by

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

(Поступила 11 июня 2015)

Представлены результаты сравнительного анализа оптических свойств металлических наночастиц, позволяющие выбирать их параметры для эффективных применений. Оптические свойства нескольких металлических (Ni, Ti, Pt, Zn, Mo и Pd) монодисперсных наночастиц радиусами 25, 50 и 75 нм теоретически исследованы и проанализированы в спектральном интервале 200—2500 нм. Изучено влияние параметров наночастиц (типа металла, радиуса и концентрации наночастиц и др.) и окружающей жидкости (воды) на оптические поперечные сечения поглощения, рассеяния и ослабления излучения наночастицами. Установлено, что титановые, никелевые и в меньшей степени молибденовые наночастицы радиусами ~75 нм могут использоваться для эффективного поглощения и ослабления солнечного излучения гетерогенными жидкостями.

**Ключевые слова:** металлические наночастицы, оптические свойства, солнечное излучение, анализ.

We present the results of the comparative analysis of optical properties of metallic nanoparticle assemblies allowing selecting their parameters for effective nanosolar applications. Optical properties of several metallic (nickel, titanium, platinum, zinc, molybdenum, and palladium) spherical nanoparticles with the radii in the range from 25 to 75 nm were analyzed in the spectral interval 200—2500 nm. The influence of nanoparticles parameters (type of metal, radius, nanoparticles concentration, etc.) and the surrounding liquid (water) on the optical cross sections of absorption, scattering and attenuation by nanoparticles was studied. It was found that nanoparticles with radii of ~75 nm made of titanium, nickel and to a lesser extent molybdenum can be used for effective absorption and attenuation of solar radiation in heterogeneous liquids.

**Keywords:** metallic nanoparticles, optical properties, solar radiation, analysis.

**Введение.** Исследование и использование наночастиц (НЧ) для поглощения солнечного излучения и преобразования света в тепло, для применения в нанознергетике, солнечных батареях, фотокатализе является в настоящее время важной областью. Эффективность применения металлических НЧ для нанотехнологий зависит от оптических свойств НЧ, характеристик излучения и окружающей жидкости. Поглощение солнечного излучения наночастицами используется в солнечных ячейках [1—10], для фотокаталитических реакций [11, 12], при нагревании гетерогенных жидкостей с НЧ [13—26], включая образование паровых нанопузырей [22—26], в компактных солнечных автоклавах [26] и т. д.

Успешное применение НЧ в нанофотонике должно основываться на их подходящих оптических свойствах. Сильное поглощение излучения наночастицами может быть использовано для превращения поглощенной энергии в тепловую энергию НЧ, нагрева НЧ и окружающей жидкости и последующих фототермических процессов. Рассеяние излучения наночастицами является конкурирующим процессом по отношению к поглощению и конверсии света в тепло в НЧ. В то же время рассеяние —

## ABSORPTION EFFECTIVITY OF SOLAR RADIATION BY FLUIDS WITH METALLIC NANOPARTICLES

L. G. Astafyeva<sup>1\*</sup> and V. K. Pustovalov<sup>2</sup> (<sup>1</sup> B. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, 68 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220072, Belarus; e-mail: astafev@dragon.bas-net.by;

<sup>2</sup> Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus)

возможный способ увеличения поглощения света в солнечных ячейках [3] и в случае многократного рассеяния в оптически плотной жидкости с НЧ посредством световой локализации [27]. Исследовано поглощение солнечного излучения различными НЧ из металлов (Cu, Au, Al, Ag), диэлектриков ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$  и др.), двухслойными ( $\text{SiO}_2$ -Au, Al-CdS) НЧ размерами 3—100 нм, размещенными в различных жидкостях (воде, этиленгликоле, масле и др.) [1—26]. К сожалению, другие металлические НЧ, например из Ti, Ni, Mo, Pd, Pt, с этой целью не изучались.

Металлические НЧ представляют наибольший интерес для некоторых нанотехнологий. Исследования плазмонных и оптических свойств металлических НЧ проведены в спектральном интервале 300—1200 нм [28—36] для применения в нанофотонике и других нанотехнологиях. Попытки найти “идеальные” или наиболее подходящие НЧ для конкретных применений в нанотехнологиях предприняты в работах [37—41]. Сравнительный анализ оптимальных параметров различных металлических НЧ для использования их как фототермических агентов солнечной нанотехнологии в спектральном интервале 200—2500 нм, составляющем 95 % спектра энергии солнечного излучения, в настоящее время отсутствует. Рассмотрение УФ диапазона длин волн 200—400 нм для целей поглощения света наночастицами представляет интерес, в частности, в Южном полушарии Земли с учетом наличия там озоновых дыр, пропускающих излучение в этом диапазоне, а также потенциального использования в космосе.

В данной работе представлены результаты анализа оптических свойств некоторых металлических НЧ для их применений в солнечных нанотехнологиях. Проведено комплексное исследование поперечных сечений поглощения, рассеяния и ослабления солнечного излучения в спектральном интервале 200—2500 нм одиночными сферическими металлическими НЧ, размещенными в воде, на основе компьютерного моделирования. Исследовано влияние радиусов НЧ (25, 50, 75 нм) и типа металла (Ti, Zn, Ni, Pt, Mo, Pd) на оптические характеристики НЧ. Рассмотрены оптические свойства гетерогенных жидкостей с концентрациями НЧ  $N_0 = 5 \cdot 10^8$  и  $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  и возможности равномерного облучения совокупностей НЧ в жидкостях.

**Численный эксперимент.** Среди характеристик отдельных НЧ и их систем, солнечного излучения и окружающей жидкости, которые определяют оптические свойства гетерогенных жидкостей, содержащих НЧ, можно выделить следующие: для солнечного излучения — непрерывное облучение или облучение в течение некоторого периода времени  $t_p$ , зависимость интенсивности солнечного излучения  $I_S$  от длины волны  $\lambda$ , плотность энергии излучения  $E_0 = I_S t_p$  для облучения длительностью  $t_p$ ; для системы сферических монодисперсных НЧ — тип металла НЧ, его плотность  $\rho_0$ , теплоемкость  $c_0$ , оптические показатели преломления  $n_{0\lambda}$  и поглощения  $\chi_{0\lambda}$ , радиус НЧ  $r_0$ , концентрация НЧ в жидкости (системе)  $N_0$ ; для непоглощающей окружающей жидкости — коэффициент теплопроводности  $k_m$ , оптический показатель преломления  $n_\lambda$ .

Пусть совокупность характерных макроразмеров облучаемого объема жидкости, содержащей НЧ, включает в себя характерную длину ослабления излучения гетерогенной жидкостью  $Z_{\text{ext}}$  и характерный размер  $L$  камеры (кюветы), содержащей жидкость с НЧ. Оптические параметры системы НЧ оценим для монодисперсной системы НЧ с  $r_0 = 75$  нм и окружающей воды. Длина волны излучения  $\lambda_{S\text{max}} \approx 560$  нм определена для максимальной интенсивности солнечного излучения  $I_{S\text{max}}$  [42]. Характерная длина  $Z_{\text{ext}}$  ослабления излучения гетерогенной жидкостью:

$$Z_{\text{ext}} = \frac{1}{\alpha_{\text{ext}}^N + \alpha_{\text{ext}}^W} = \frac{1}{N_0 \pi r_0^2 K_{\text{ext}} + \alpha_{\text{ext}}^W},$$

где  $\alpha_{\text{ext}} = \alpha_{\text{ext}}^W + \alpha_{\text{ext}}^N$  — показатель ослабления излучения жидкостью;  $\alpha_{\text{ext}}^N$  и  $\alpha_{\text{ext}}^W$  — показатели ослабления излучения системой НЧ и окружающей жидкостью по отдельности;  $K_{\text{ext}}$  — фактор эффективности ослабления излучения отдельной НЧ [28];  $\alpha_{\text{ext}}^W = 0.004 \text{ см}^{-1}$  (вода) [43] для  $\lambda_{S\text{max}} = 560$  нм и характерная длина ослабления излучения чистой водой  $Z_{\text{ext}}^W = 1/\alpha_{\text{ext}}^W = 2.5 \cdot 10^2$  см. Следовательно, вода практически не ослабляет излучение с данной длиной волны на расстоянии меньше или много меньше  $\sim 10^2$  см. Для системы НЧ  $\alpha_{\text{ext}}^N = \pi N_0 r_0^2 K_{\text{ext}}$ . В случае Ti-НЧ  $K_{\text{ext}} \approx 4.0$  при  $r_0 = 75$  нм и  $N_0 = 10^9 \text{ см}^{-3}$  имеем  $\alpha_{\text{ext}}^N \approx 7.8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  и  $Z_{\text{ext}}^N \approx 12.7$  см. Значение  $Z_{\text{ext}}^N$  уменьшается с возрастанием  $N_0$ . Система НЧ оказывает доминирующее влияние на поглощение излучения с  $\lambda = 560$  нм при  $N_0 \geq 10^8 \text{ см}^{-3}$  по сравнению с чистой водой и определяет оптические свойства жидкости в данном случае. Аппрок-

симация оптически тонкого слоя жидкости при  $Z_{\text{ext}} = 1/(\alpha_{\text{ext}}^N + \alpha_{\text{ext}}^W) > L$  с примерно равномерным облучением и одинаковой интенсивностью излучения для всего облучаемого объема может быть использована для характерных размеров  $< 10$  см.

Расстояние между центрами соседних НЧ  $R_c \approx 1/N_0^{1/3}$  и для  $N_0 = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$   $R_c \sim 6 \cdot 10^3$  нм. Условие независимого взаимодействия излучения (процессов рассеяния и поглощения) с соседними НЧ выполняется, когда расстояние между НЧ  $2R_c$  больше длины волны излучения и размеров НЧ [45]. Поглощение излучения НЧ должно быть больше (или много больше), чем поглощение окружающей жидкостью, чтобы увеличить оптический контраст НЧ, и должно быть больше, чем рассеяние излучения НЧ для эффективного использования солнечной энергии в системах с прямым поглощением солнечного излучения.

Различие между показателями поглощения ( $\alpha_{\text{abs}}^N$ ), рассеяния ( $\alpha_{\text{sc}}^N$ ) и ослабления ( $\alpha_{\text{ext}}^N$ ) солнечного излучения системой НЧ и показателями поглощения ( $\alpha_{\text{abs}}^W$ ) и ослабления ( $\alpha_{\text{ext}}^W$ ) излучения окружающей жидкостью (водой) должно обеспечить выполнение условий:

$$\alpha_{\text{abs}}^N = \pi N_0 r_0^2 K_{\text{abs}} > \alpha_{\text{abs}}^W, \quad \alpha_{\text{abs}}^N > \alpha_{\text{sc}}^N, \quad K_{\text{abs}} > K_{\text{sc}}. \quad (1)$$

Ослабление излучения наночастицами должно быть больше, чем ослабление излучения окружающей жидкостью для эффективного использования НЧ для фототермических превращений и примерно однородного облучения всего рассматриваемого объема жидкости:

$$\alpha_{\text{ext}}^N = \pi N_0 r_0^2 K_{\text{ext}} > \alpha_{\text{ext}}^W. \quad (2)$$

Анализ оптических свойств НЧ и жидкостей, концентраций и размеров НЧ может дать нам соответствующие типы НЧ.

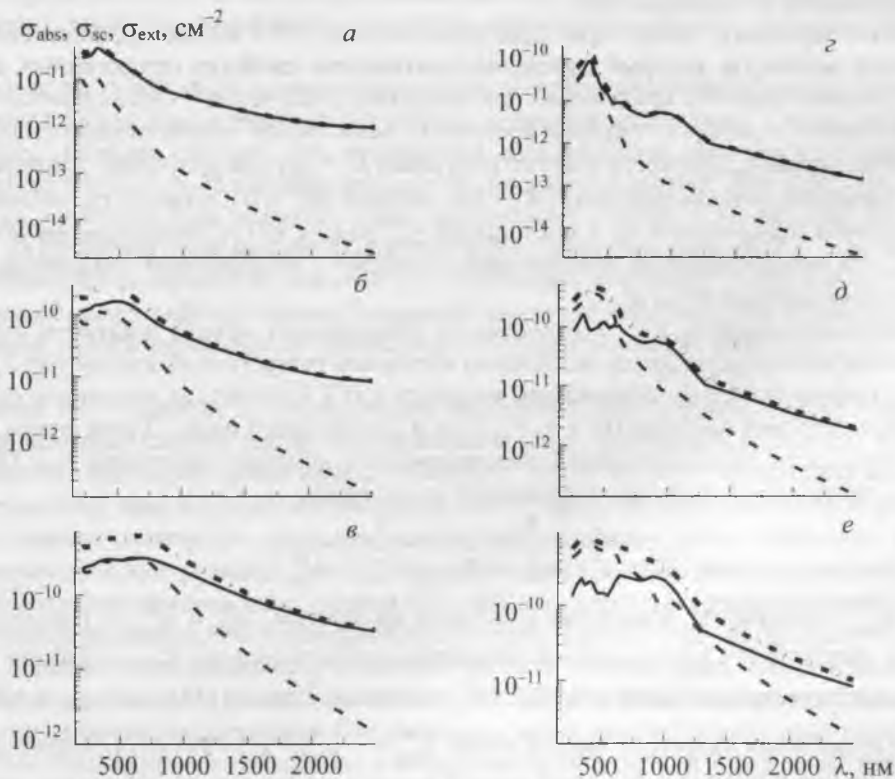


Рис. 1. Зависимости сечений поглощения  $\sigma_{\text{abs}}$  (сплошные), рассеяния  $\sigma_{\text{sc}}$  (штриховые) и ослабления  $\sigma_{\text{ext}}$  (штрихпунктир) излучения Ti (а–в) и Zn (z–e) наночастицами с  $r_0 = 25$  (а, z), 50 (б, d) и 75 нм (в, e) от длины волны

В настоящей работе на основе теории Ми проведен численный расчет поперечных сечений поглощения  $\sigma_{\text{abs}} = \pi r_0^2 K_{\text{abs}}$ , рассеяния  $\sigma_{\text{sc}} = \pi r_0^2 K_{\text{sc}}$  и ослабления  $\sigma_{\text{ext}} = \pi r_0^2 K_{\text{ext}}$  солнечного излучения в интервале 200—2500 нм одиночными НЧ. Оптические постоянные металлов и воды взяты из [43, 44]. Проанализированы оптические свойства НЧ металлов [36] с радиусами 10—75 нм в спектральном интервале излучения 200—2500 нм. Показано, что сферические Ti, Ni, Mo, Pt, Pd и Zn-НЧ радиусами 25—75 нм могут использоваться для поглощения солнечного излучения.

Зависимости поперечных сечений  $\sigma_{\text{abs}}$ ,  $\sigma_{\text{sc}}$  и  $\sigma_{\text{ext}}$  для Ti- и Zn-НЧ с  $r_0 = 25, 50, 75$  нм от длины волны представлены на рис. 1. Возрастание  $r_0$  ведет к очевидному увеличению всех поперечных оптических сечений НЧ. Для Ti-НЧ максимальные значения  $\sigma_{\text{abs}}$ ,  $\sigma_{\text{sc}}$  и  $\sigma_{\text{ext}}$  сдвигаются в сторону больших длин волн с возрастанием  $r_0$ . Для Ti-НЧ с  $r_0 = 50$  и 75 нм  $\sigma_{\text{abs}} \geq \sigma_{\text{sc}}$  в интервале 200—750 нм и  $\sigma_{\text{abs}} >$  (или  $\gg$ )  $\sigma_{\text{sc}}$  в интервале 750—2500 нм. Это означает возможность эффективного использования Ti-НЧ для поглощения солнечной радиации во всем спектральном интервале 200—2500 нм.

Для Zn-НЧ возрастание  $r_0$  приводит к образованию осцилляции поперечных сечений  $\sigma_{\text{abs}}$ ,  $\sigma_{\text{sc}}$  и  $\sigma_{\text{ext}}$  с последующим сдвигом максимальных значений в сторону больших  $\lambda$ . Для Zn-НЧ с  $r_0 = 25$  нм  $\sigma_{\text{abs}} > \sigma_{\text{sc}}$  в спектральном интервале 200—2500 нм, а для НЧ с  $r_0 = 50$  нм — в интервале 200—600 нм. Для Zn-НЧ с  $r_0 = 75$  нм  $\sigma_{\text{sc}} > \sigma_{\text{abs}}$  в спектральном интервале 200—830 нм, для остального интервала 830—2500 нм  $\sigma_{\text{abs}} > \sigma_{\text{sc}}$ . Это означает, что Zn-НЧ не полностью подходят для их эффективного использования для поглощения солнечной радиации в первую очередь в энергетически важном спектральном интервале 200—800 нм.

Зависимости поперечных сечений  $\sigma_{\text{abs}}$ ,  $\sigma_{\text{sc}}$  и  $\sigma_{\text{ext}}$  для Ni, Pt, Mo и Pd-НЧ с  $r_0 = 25, 50$  и 75 нм от длины волны представлены на рис. 2 и 3. Для Ni-НЧ с  $r_0 = 25$  и 50 нм  $\sigma_{\text{abs}} > \sigma_{\text{sc}}$  в интервале 200—2500 нм, а в интервалах 150—310 и 375—885 нм  $\sigma_{\text{abs}} < \sigma_{\text{sc}}$ . Для Ni-НЧ с  $r_0 = 75$  нм  $\sigma_{\text{abs}} \geq \sigma_{\text{sc}}$  в интервалах 310—380 и 885—2500 нм. Это означает возможность использования Ni-НЧ с  $r_0 = 25$  и 50 нм

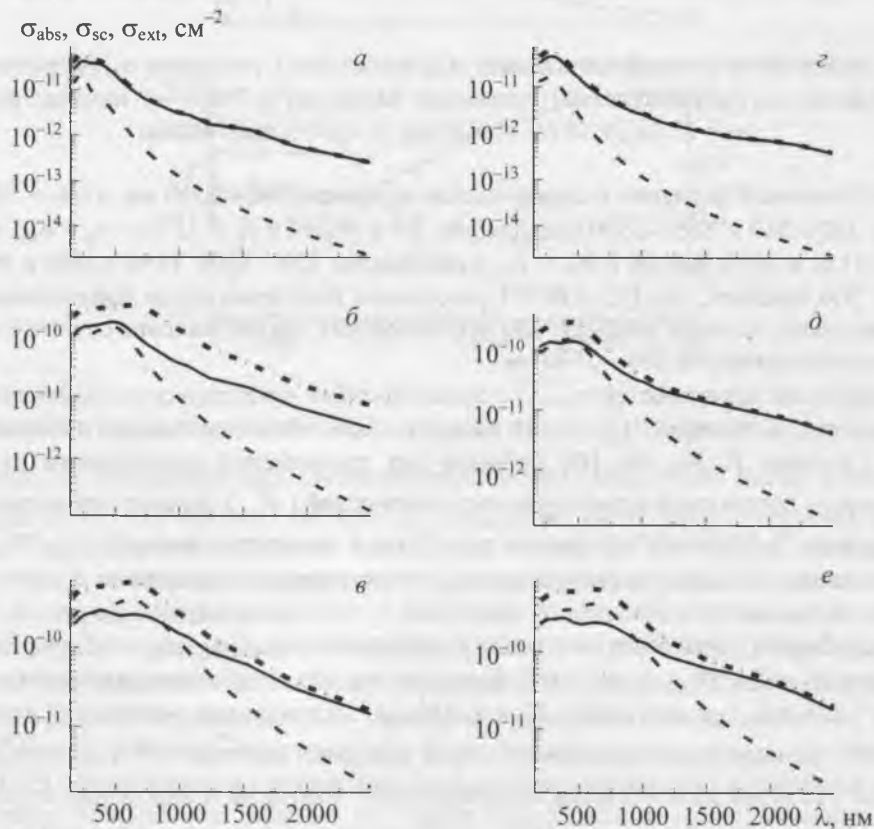


Рис. 2. Зависимости сечений поглощения  $\sigma_{\text{abs}}$  (сплошные), рассеяния  $\sigma_{\text{sc}}$  (штриховые) и ослабления  $\sigma_{\text{ext}}$  (штрихпунктир) излучения Ni (а–в) и Pt (г–е) наночастицами с  $r_0 = 25$  (а, г), 50 (б, д) и 75 нм (в, е) от длины волны

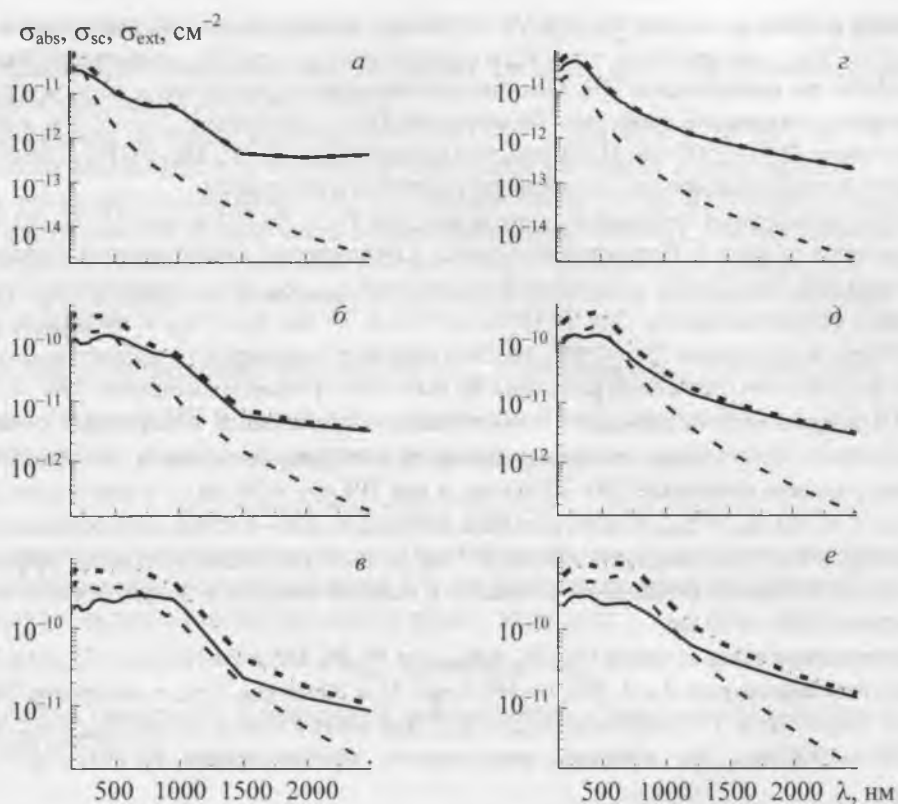


Рис. 3. Зависимости сечений поглощения  $\sigma_{\text{abs}}$  (сплошные), рассеяния  $\sigma_{\text{sc}}$  (штриховые) и ослабления  $\sigma_{\text{ext}}$  (штрихпунктир) излучения Mo (а—в) и Pd (z—e) наночастицами с  $r_0 = 25$  (а, z), 50 (б, d) и 75 нм (в, e) от длины волны

для поглощения солнечной радиации в спектральном интервале 200—2500 нм, а с  $r_0 = 75$  нм — только в интервалах 310—380 и 885—2500 нм. Для Mo, Pd и Pt-НЧ с  $r_0 = 75$  нм  $\sigma_{\text{sc}} > \sigma_{\text{abs}}$  в интервалах 200—730, 200—1150 и 200—900 нм и  $\sigma_{\text{abs}} > \sigma_{\text{sc}}$  в интервалах 730—2500, 1150—2500 и 900—2500 нм соответственно. Это означает, что Pd- и Pt-НЧ рассеивают излучение более эффективно, чем поглощают, и, следовательно, не очень подходят для использования для поглощения солнечного излучения во всем спектральном интервале 200—2500 нм.

Анализ и сравнение зависимостей  $\sigma_{\text{abs}}(\lambda)$  с зависимостями интенсивности солнечного излучения  $I_S(\lambda)$  показывают, что Ti, Ni, Mo-НЧ с  $r_0 = 75$  нм могут быть использованы для поглощения солнечной радиации. Системы Ti, Ni, Mo НЧ выбраны для дальнейшего исследования их оптических свойств. Зависимости показателей ослабления излучения водой ( $\alpha_{\text{ext}}^W$ ), показателей ослабления ( $\alpha_{\text{ext}}^N$ ) излучения системами Ti, Ni, Mo-НЧ радиусом  $r_0 = 75$  нм и концентрациями  $N_0 = 5 \cdot 10^8$ ,  $5 \cdot 10^9$  см $^{-3}$ , совокупный показатель ослабления излучения гетерогенными жидкостями с системами Ti, Ni, Mo-НЧ, а также интенсивности солнечного излучения  $I_S$  от  $\lambda$  представлены на рис. 4. В интервале 200—1050 нм ослабление солнечного излучения водой много меньше, чем ослабление системой НЧ с концентрациями  $N_0 = 5 \cdot 10^8$  и  $5 \cdot 10^9$  см $^{-3}$ . Естественно, что ослабление излучения системой НЧ с  $N_0 = 5 \cdot 10^9$  см $^{-3}$  больше, чем системой с  $N_0 = 5 \cdot 10^8$  см $^{-3}$ . В результате ослабление излучения в интервале 200—1050 нм определяется доминирующим влиянием системы НЧ и  $\alpha_{\text{ext}} \approx \alpha_{\text{ext}}^N$ . Для спектральной области >1250 нм вода является доминирующим фактором и определяет ослабление излучения  $\alpha_{\text{ext}} \approx \alpha_{\text{ext}}^W$ . Спектральный интервал 1050—1250 нм является переходной зоной от доминирующего влияния систем НЧ к доминирующему влиянию воды на ослабление излучения жидкостями. С учетом реальной зависимости  $I_S(\lambda)$  на уровне моря [42] ~15 % всей солнечной энергии сосредоточено в спектральном интервале 1250—2500 нм (см. рис. 4, кривая 3). Для систем Ti, Ni, Mo-НЧ пока-

затель ослабления  $\alpha_{\text{ext}} \sim \alpha_{\text{ext}}^W$  для  $\lambda > 1050$  нм ( $N_0 = 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ ) и  $\lambda > 1250$  нм ( $N_0 = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ). Показатель ослабления излучения водой  $\alpha \sim \alpha_{\text{ext}}^W \sim 10\text{--}100 \text{ см}^{-1}$  в интервале 2500—1250 нм [43]. Это означает, что ослабление солнечного излучения с длинами волн в указанном интервале будет реализовано в тонком слое воды толщиной  $\sim 0.1\text{--}1$  см.

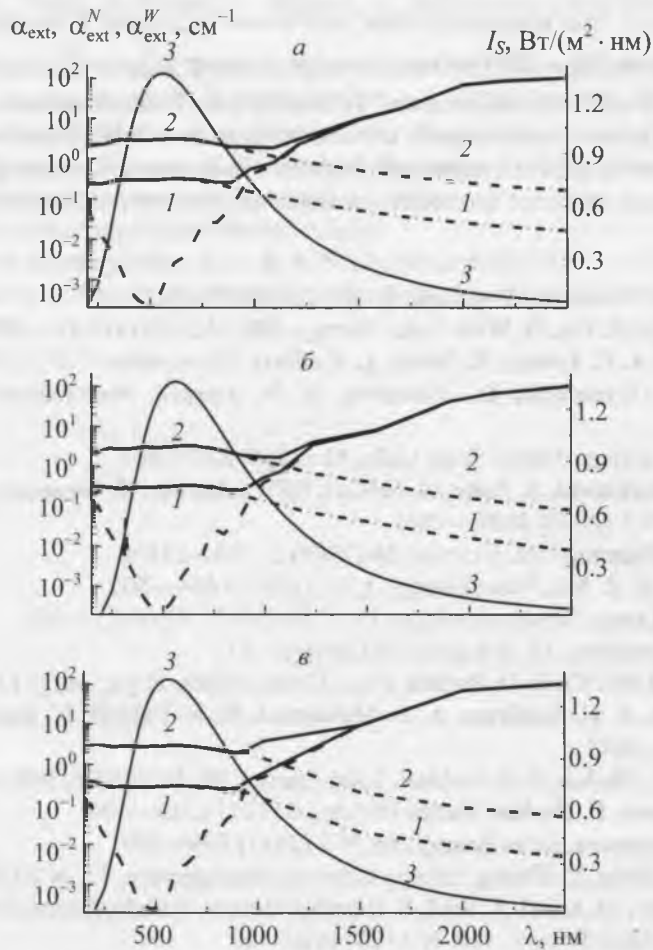


Рис. 4. Зависимости показателя ослабления излучения водой  $\alpha_{\text{ext}}^W$  (штриховые), показателей ослабления излучения  $\alpha_{\text{ext}}^N$  (штрихпунктир) системами наночастиц Ti (а), Ni (б), Mo (в) радиусом  $r_0 = 75$  нм, концентрацией  $N_0 = 5 \cdot 10^8$  (1) и  $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  (2), показателя ослабления излучения  $\alpha_{\text{ext}}$  (сплошная) гетерогенной жидкостью с системами наночастиц Ti (а), Ni (б), Mo (в), а также зависимость интенсивности солнечного облучения  $I_S$  (3) от длины волны

Для спектрального интервала 200—1050 нм  $\alpha_{\text{ext}} \approx 0.2\text{--}0.3$  ( $N_0 = 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ ) и  $\alpha_{\text{ext}} \approx 2\text{--}3 \text{ см}^{-1}$  ( $N_0 = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ) и толщина слоя гетерогенной жидкости с ослаблением излучения в  $e$  ( $e = 2.718$ ) раз составляет  $\approx 5\text{--}0.5$  см. Это означает, что примерно одинаковое облучение систем НЧ реализовано в слое гетерогенной жидкости толщиной 0.5—5 см. Эти результаты позволяют оценить характеристики систем НЧ с подобранными значениями  $N_0$ ,  $r_0$ , типами металла НЧ и толщиной слоя жидкости.

**Заключение.** Сильное поглощение излучения сферическими металлическими наночастицами делает их новым и высокоэффективным классом контрастных агентов для солнечных наноэнергетических и фототермических применений при действии солнечного излучения в широком спектральном интервале 200—2500 нм. Для успеха в этих областях необходимо оптимизировать ряд факторов. На основе компьютерного моделирования проведены исследование и анализ сечений поглощения

( $\sigma_{\text{abs}}$ ), рассеяния ( $\sigma_{\text{sc}}$ ) и ослабления ( $\sigma_{\text{ext}}$ ) металлических (Ti, Ni, Pt, Zn, Pd, Mo) наночастиц радиусами  $r_0 = 25\text{--}75$  нм для спектрального интервала 200—2500 нм. Вода использована как окружающая наночастицу жидкость. Анализ зависимостей  $\sigma_{\text{abs}}$ ,  $\sigma_{\text{sc}}$  и  $\sigma_{\text{ext}}$  от длины волны с изменением металла наночастицы и значения  $r_0$  показал, что увеличение радиуса частиц ведет к возрастанию  $\sigma_{\text{abs}}$ ,  $\sigma_{\text{sc}}$  и  $\sigma_{\text{ext}}$  и смещению их максимальных значений в сторону больших длин волн. Ослабление излучения системой наночастиц ( $\alpha_{\text{ext}}^{\text{N}}$ ) и окружающей жидкостью ( $\alpha_{\text{ext}}^{\text{W}}$ ) — дополняющие друг друга и одновременно конкурирующие процессы при взаимодействии солнечной радиации с гетерогенными жидкостями. В спектральном интервале 200—1000 нм выполняется условие  $\alpha_{\text{ext}}^{\text{N}} < \alpha_{\text{ext}}^{\text{W}}$ , особенно для Ti, Ni и Mo-наночастиц с  $N_0 = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Металлические Ti, Ni, Pd, Mo, Pt-наночастицы с  $r_0 \sim 75$  нм могут использоваться для эффективного поглощения солнечной радиации в экспериментальных исследованиях и системах прямого поглощения солнечной энергии. По-видимому, среди рассмотренных наночастиц Ti- и Ni-наночастицы наиболее подходят для поглощения солнечной энергии.

- [1] Y. Tang, B. Vlahovic. *Nanoscale Res. Lett.*, **8**, N 1 (2013) 65—72
- [2] H. Zhang, H.-J. Chen, X. Du, D. Wen. *Solar Energy*, **100**, N 2 (2014) 141—147
- [3] A. Paris, A. Vaccari, A. C. Lesina, E. Serra, L. Calliari. *Plasmonics*, **7**, N 3 (2012) 525—534
- [4] T. F. Villesen, C. Uhrenfeldt, D. Johansen, A. N. Larsen. *Nanotechnology*, **12**, N 27 (2012) 275606(1—5)
- [5] G. P. Smestad. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **82** (2004) 227—240
- [6] F. Hallermann, C. Rockstuhl, S. Fahr, G. Seifert, S. Wackerow, H. Graener, G. Plessen, F. Lederer. *Phys. Status Solidi*, **205**, N 1 (2008) 2844—2861
- [7] K. R. Catchpole, A. Polman. *Opt. Express*, **16** (2008) 21793—21800
- [8] G. A. E. Vandenbosch, Z. Ma. *Nano Energy*, **1**, N 3 (2012) 494—502
- [9] H. B. Radousky, H. Liang. *Nanotechnology*, **23**, N 50 (2012) 502001(1—35)
- [10] V. Mlinar. *Nanotechnology*, **24**, N 4 (2013) 042001(1—11)
- [11] S. M. H. Hashemi, J.-W. Choi, D. Psaltis. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **16**, N 11 (2014) 5137—5141
- [12] M. M. Ba-Abbad, A. A. H. Kadhum, A. B. Mohamad, M. S. Takriff, K. Sopian. *Int. J. Electrochem. Sci.*, **7**, N 6 (2012) 4871—4888
- [13] T. P. Otanicar, P. E. Phelan, J. S. Golden. *Solar Energy*, **83**, N 7 (2009) 969—977
- [14] D. Erickson, D. Sinton, D. Psaltis. *Nature Photon.*, **5** (2011) 583—590
- [15] Y. Kameya, K. Hanamura. *Solar Energy*, **85**, N 2 (2011) 299—307
- [16] O. He, S. Wang, S. Zeng, Z. Zheng. *Energy Convers. Management*, **73**, N 2 (2013) 150—157
- [17] M. Hossain, R. Saidur, M. Sabri, Z. Said, S. Hassani. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **43** (2015) 750—762
- [18] H. Duan, Y. Xuan. *Appl. Energy*, **114**, N 1 (2014) 22—29
- [19] M. Chen, Y. He, J. Zhu, Y. Shuai, B. Jiang, Y. Huang. *Solar Energy*, **115**, N 1 (2015) 85—94
- [20] A. N. Al-Shamani, M. H. Yazdi, M. A. Alghoul, A. M. Abed, M. H. Ruslan, S. Mat, K. Sopian. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **38** (2014) 348—367
- [21] Z. Said, M. H. Sajid, R. Saidur, M. Kamalisarvestani, N. A. Rahim. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **46** (2013) 74—84
- [22] M. H. Sajid, Z. Said, R. Saidur, F. R. M. Adikan, M. F. M. Sabri, N. A. Rahim. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **50** (2014) 108—116
- [23] O. Neumann, A. S. Urban, J. Day, S. Lal, N. J. Halas. *ACS Nano*, **7**, N 1 (2012) 42—49
- [24] Z. Fang, Y.-R. Zhen, O. Neumann, A. Polman, F. J. Garcia de Abajo, P. Nordlander, N. J. Halas. *Nano Lett.*, **13** (2013) 1736—1742
- [25] A. Polman. *ACS Nano*, **7**, N 1 (2013) 15—18
- [26] O. Neumann, C. Feronti, A. D. Neumann, A. Dong, K. Schell, B. Lu, E. Kim, M. Quinn, S. Thompson, N. Grady, P. Nordlander, M. Oden, N. J. Halas. *PNAS*, **110** (2013) 11677—11681
- [27] N. J. Hogan, A. S. Urban, C. A. Orozco, A. Pimpinelli, P. Nordlander, N. J. Halas. *Nano Lett.*, **14**, (2014) 4640—4645
- [28] C. F. Bohren, D. R. Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, New York, Wiley (1983)
- [29] U. Kreibig, M. Vollmer. *Optical Properties of Metal Clusters*, Heidelberg, Springer (1995)
- [30] S. Maier. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*, Heidelberg, Springer (2007)

- [31] **V. K. Pustovalov, V. A. Babenko.** *Laser Phys. Lett.*, **1**, N 3 (2004) 516—520
- [32] **P. K. Jain, X. Huang, I. El-Sayed, M. El-Sayed.** *Plasmonics*, **2**, N 3 (2007) 107—118
- [33] **M. Pelton, J. Aizpurua, G. Bryant.** *Laser Photon. Rev.*, **2**, N 1 (2008) 136—159
- [34] **I. Mayergoyz.** *Plasmon Resonances in Nanoparticles*, Singapore, World Scientific Publ. (2013)
- [35] **V. Amendola, O. M. Bakr, F. Stellacci.** *Plasmonics*, **5**, N 1 (2010) 85—97
- [36] **V. Pustovalov, L. Astafyeva, W. Fritzsche.** *Sci. Adv. Mater.*, **4**, N 3/4 (2012) 480—488
- [37] **P. West, S. Ishii, G. Naik, N. Emani, V. Shalaev, A. Boltasseva.** *Laser Photon. Rev.*, **4**, N 6 (2010) 795—808
- [38] **M. G. Blaber, M. D. Arnold, M. J. Ford.** *J. Phys. Chem. C*, **113**, N 8 (2009) 3041—3045
- [39] **R. Bardhan, N. K. Grady, T. Ali, N. J. Halas.** *ACS Nano*, **4** (2010) 6169—6179
- [40] **Y. Sonnefraud, A. Koh, D. McComb, S. Maier.** *Laser Photon. Rev.*, **6**, N 2 (2012) 277—295
- [41] **V. Grigoriev, N. Bonod, J. Wenger, B. Stout.** *ACS Photonics*, **2** (2015) 263—270
- [42] ASTM G-173-03-International standard ISO 9845-1 (1992)
- [43] Refractive Index Database, <http://refractiveindex.info/>
- [44] **P. B. Johnson, R. W. Christy.** *Phys. Rev. B*, **6**, N 12 (1972) 4370—4379
- [45] **R. G. Newton.** *Theory of Waves and Particles*, New York, San Francisco, St. Louis, Toronto, London, McGraw-Hill Book (1968)