

Попов Алексей Петрович

**ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА СИЛЬНОРАССЕИВАЮЩИХ
СРЕД
И ИЗМЕНЕНИЕ ИХ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПУТЕМ ИМПЛАНТАЦИИ НАНОЧАСТИЦ
(кандидатская диссертация)**

специальность 01.04.21 – лазерная физика

научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент А.В. Приезжев

СОДЕРЖАНИЕ

- Введение
- Глава 1. Прохождение сверхкороткого лазерного импульса через случайную среду
- Глава 2. Моделирование распространения сверхкороткого лазерного импульса в среде с сильным рассеянием методом Монте-Карло
- Глава 3. Метод лазерной импульсной времяпролетной фотометрии как инструмент диагностики сред с сильным рассеянием
- Глава 4. Изменение оптических свойств сред с сильным рассеянием в УФ-диапазоне путем имплантации наночастиц диоксида титана
- Заключение
- Список литературы

Глава 1. **Нестационарное уравнение теории переноса излучения**

$$\frac{\partial}{\partial s} I(\bar{r}, \bar{s}, t) + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} I(\bar{r}, \bar{s}, t) = -\mu_t I(\bar{r}, \bar{s}, t) + \frac{\mu_s}{4\pi} \int_{4\pi} \left[\int_{-\infty}^t I(\bar{r}, \bar{s}', t') f(t, t') dt' \right] p(\bar{s}, \bar{s}') d\Omega',$$

$I(\bar{r}, \bar{s}, t)$ - лучевая интенсивность в точке \bar{r} в направлении \bar{s} , Вт·м⁻²·ср⁻¹;

$p(\bar{s}, \bar{s}')$ - фазовая функция рассеяния;

μ_s – коэффициент рассеяния (величина, характеризующая среднее количество актов упругого рассеяния, в которых участвует фотон при пробеге на единицу длины);

μ_a – коэффициент поглощения (величина, обратная расстоянию, на котором интенсивность уменьшается за счет поглощения в e раз);

$\mu_t = \mu_s + \mu_a$ – коэффициент экстинкции;

$d\Omega'$ - единичный телесный угол в направлении;

$\mu_s / \mu_t \equiv \Lambda$ – альbedo единичного рассеивателя;

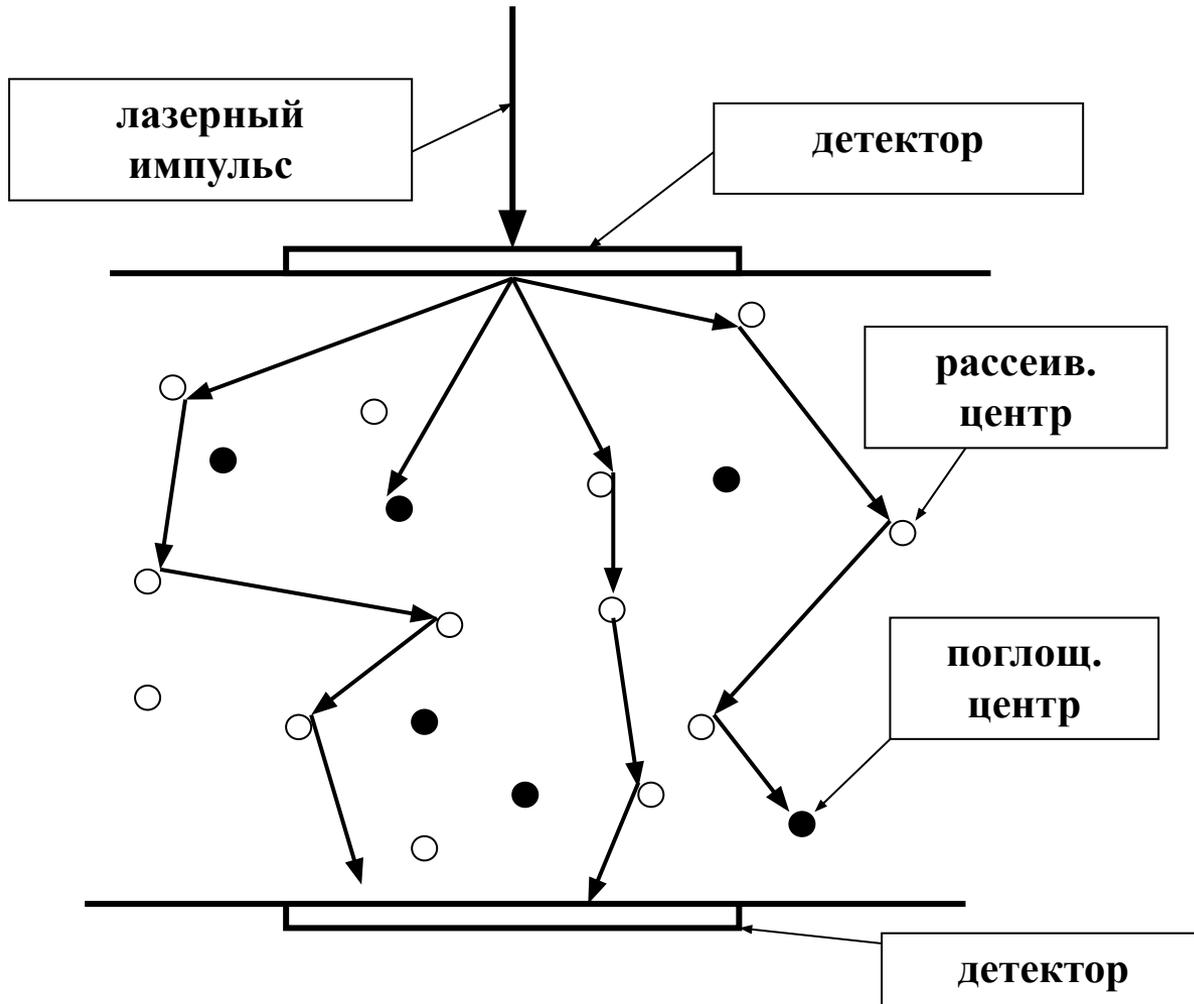
t – время;

c – скорость света в среде;

$f(t, t')$ – описывает временную деформацию δ -образного импульса после единичного акта рассеяния.

Метод Монте-Карло

пример: слой среды



параметры среды

n - показатель преломления

μ_s - коэф. рассеяния

μ_a - коэф. поглощения

$p(\phi, \theta)$ - фазовая

функция рассеяния

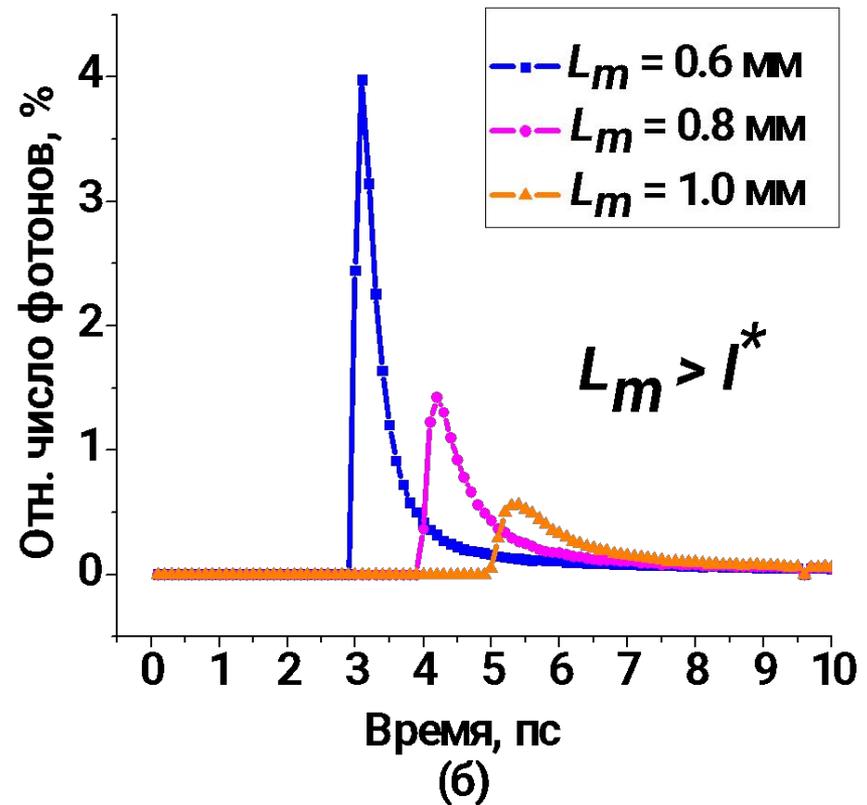
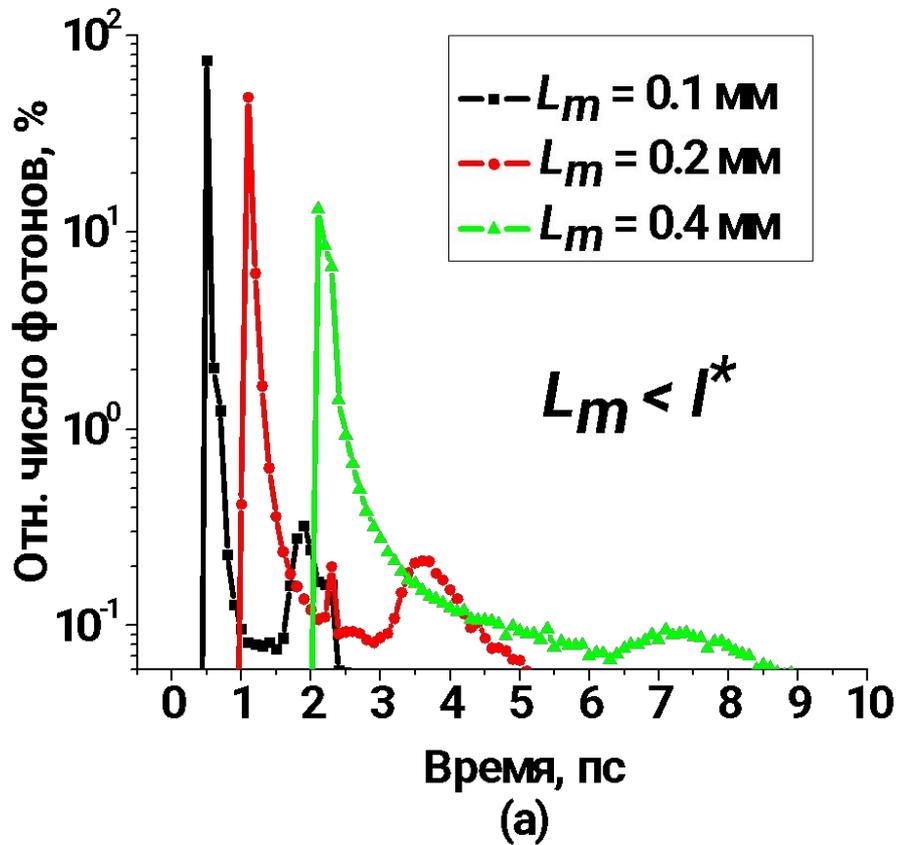
$g = \langle \cos(\theta) \rangle$

L_m - толщина среды

ЗАДАЧИ

- **исследовать возможность регистрации параметров рассеянного в переднее полупространство импульса в зависимости от оптических свойств и геометрических параметров среды, а также от длительности зондирующего импульса;**
- **изучить возможность использования сверхкоротких лазерных импульсов для диагностики сред с сильным рассеянием на примере среды, имитирующей кожу с разной концентрацией глюкозы; определить параметры рассеянного импульса, наиболее чувствительные для мониторинга изменений содержания глюкозы в физиологическом диапазоне концентраций;**
- **разработать методику определения размеров наночастиц, наиболее эффективно ослабляющих УФ-излучение при его распространении в среде, имитирующей кожу человека, а также метод расчета пропускания, отражения и поглощения света в среде с наночастицами.**

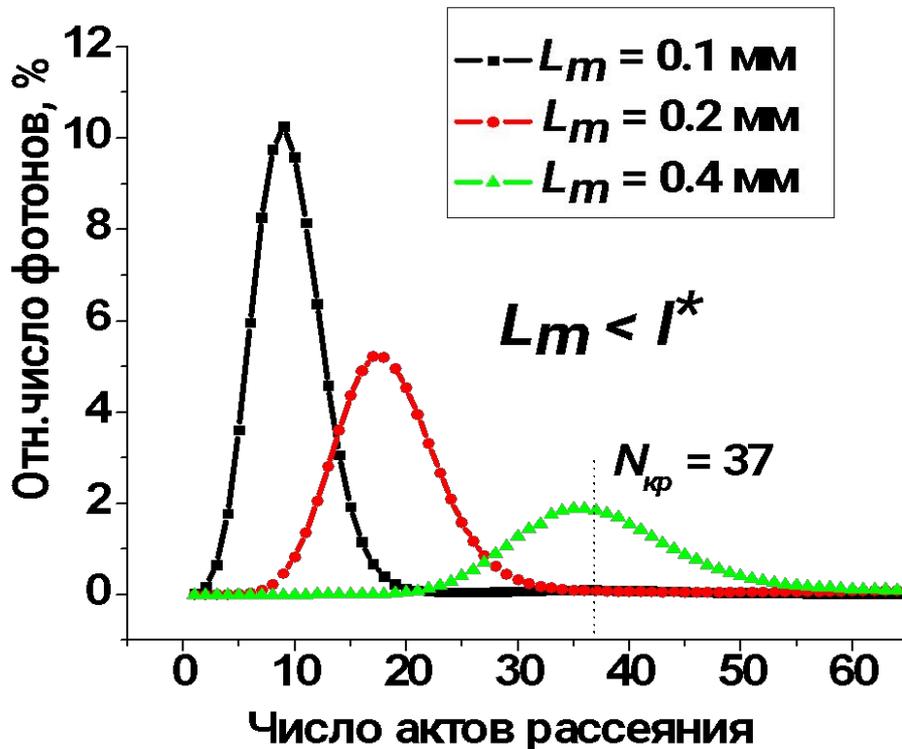
Глава 2. Сверхкороткий лазерный импульс, рассеянный вперед от слоя: временные профили



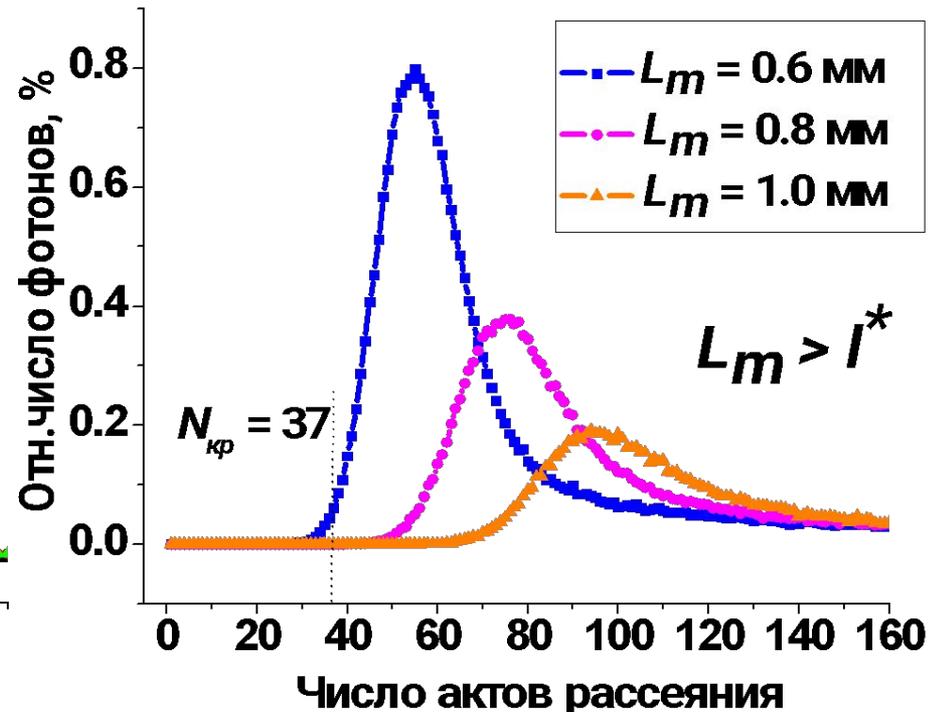
$$g = 0.98, \mu_s = 85 \text{ мм}^{-1}, \mu_a = 0.6 \text{ мм}^{-1}, l^* = [\mu_s(1 - g) + \mu_a]^{-1} = 0.43 \text{ мм}$$

$$\text{фазовая функция Хеньи-Гринштейна: } p_{HG}(\theta) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}$$

Сверхкороткий лазерный импульс, рассеянный вперед от слоя: кратности рассеяния



(a)



(б)

$$N_{кр} = \frac{l^*}{l_{ph}} = \frac{\mu_s + \mu_a}{\mu_s(1-g) + \mu_a}$$

$N > N_{кр}$: диффузные фотоны

$N < N_{кр}$: недиффузные фотоны

Параметры слоев, имитирующих слои кожи ($\lambda = 820$ нм)

Слой	$\mu_s, \text{мм}^{-1}$	$\mu_a, \text{мм}^{-1}$	g	n	Толщина, мм
эпидермис	42.0	4.00	0.85	1.36	0.20
кровь	57.3	0.82	0.977	1.40	0.08
дерма	17.5	0.23	0.85	1.36	4.72

В.В. Тучин, *Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях*, 1998.

Влияние глюкозы на оптические свойства слоев кожи

$$\mu_s^{\text{глюк}} = (1 - 0.0022 \cdot C/18) \cdot \mu_s$$

$$g^{\text{глюк}} = (1 + 0.000007 \cdot C/18) \cdot g$$

$$n^{\text{глюк}} = n + 1.515 \cdot 10^{-6} \cdot C$$

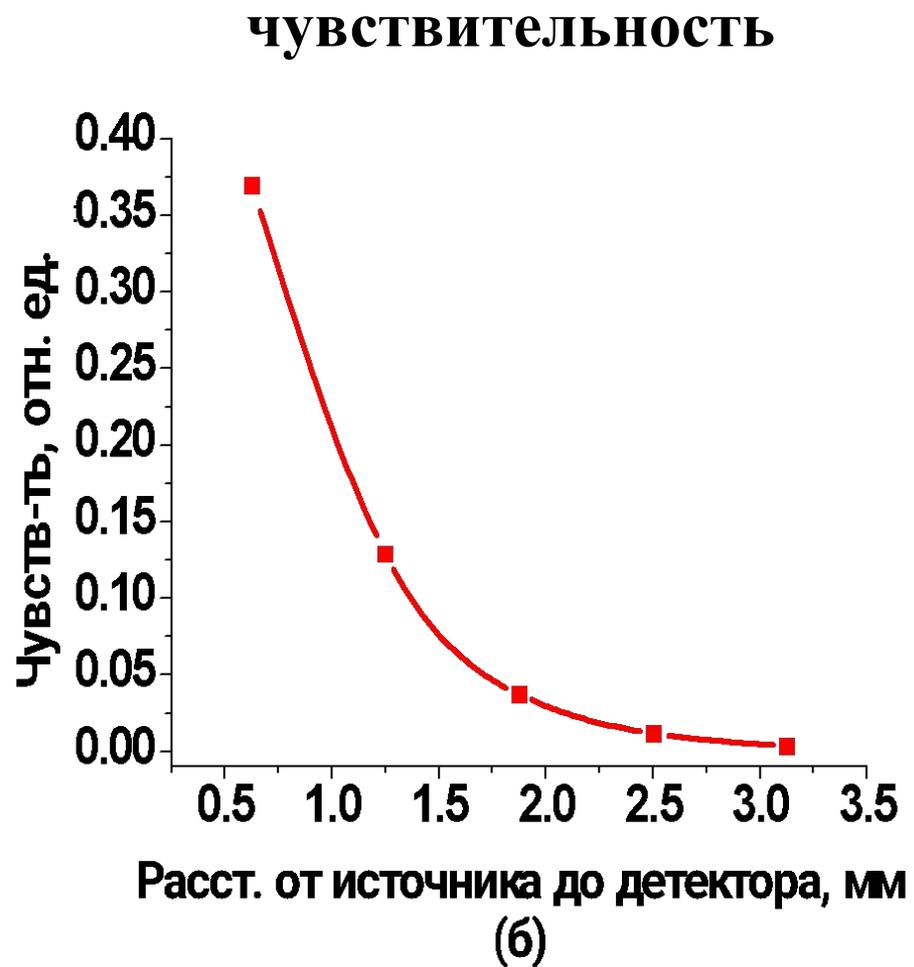
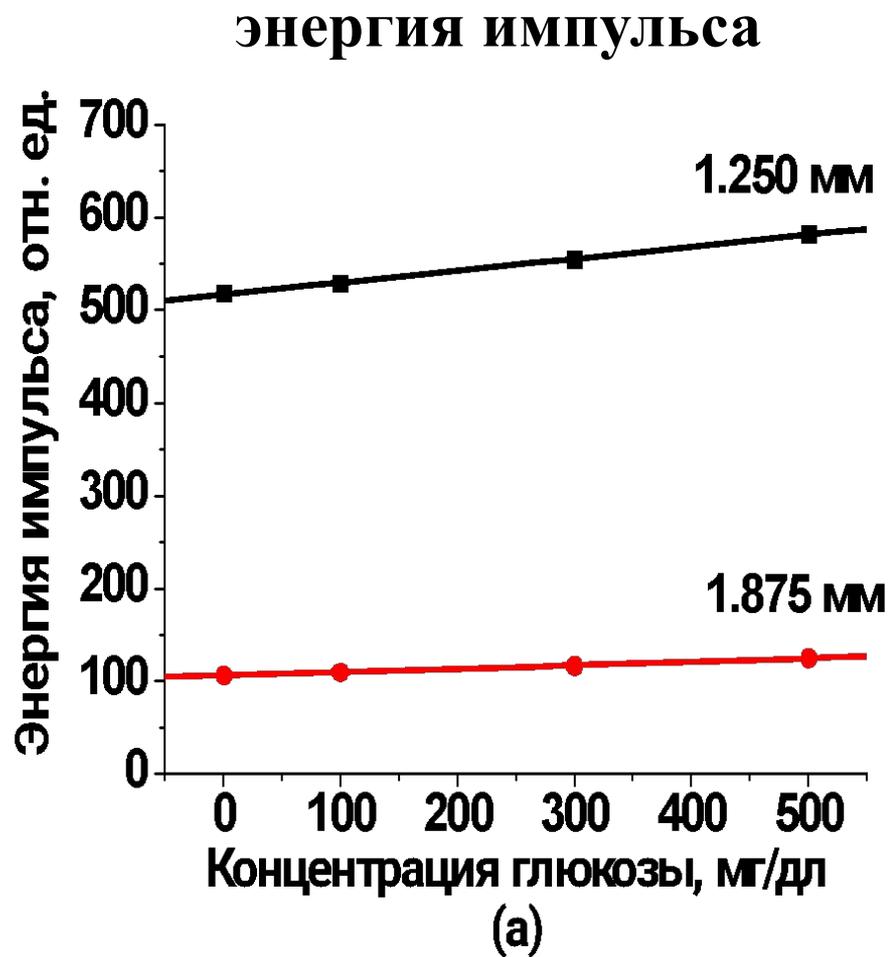
C [мг/дл] – конц. глюкозы [0..500]

фазовая функция Хеньи-Гринштейна:

$$P_{HG}(\theta) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}$$

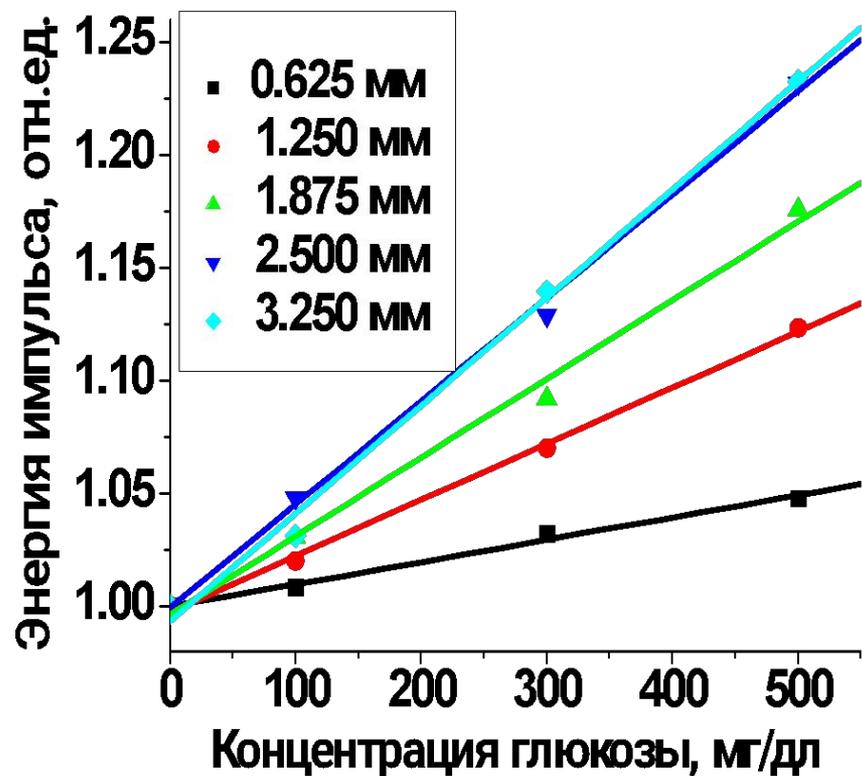
М. Kohl et al., *Phys. Med. Biol.* **40**, 1267 (1995), М. Tarumi et al.,
Phys. Med. Biol. **48**, 2373 (2003), К. Larin et al., *Phys. Med. Biol.* **48**, 1371 (2003).

Чувствительность энергии импульса к глюкозе



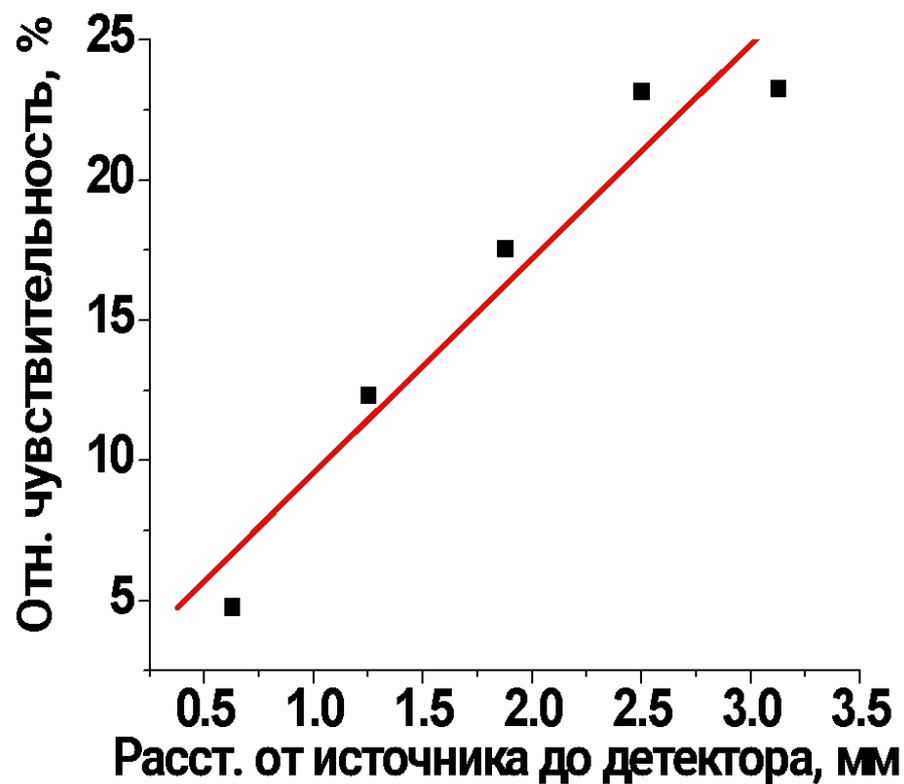
Относительная чувствительность к глюкозе

нормированная энергия импульса



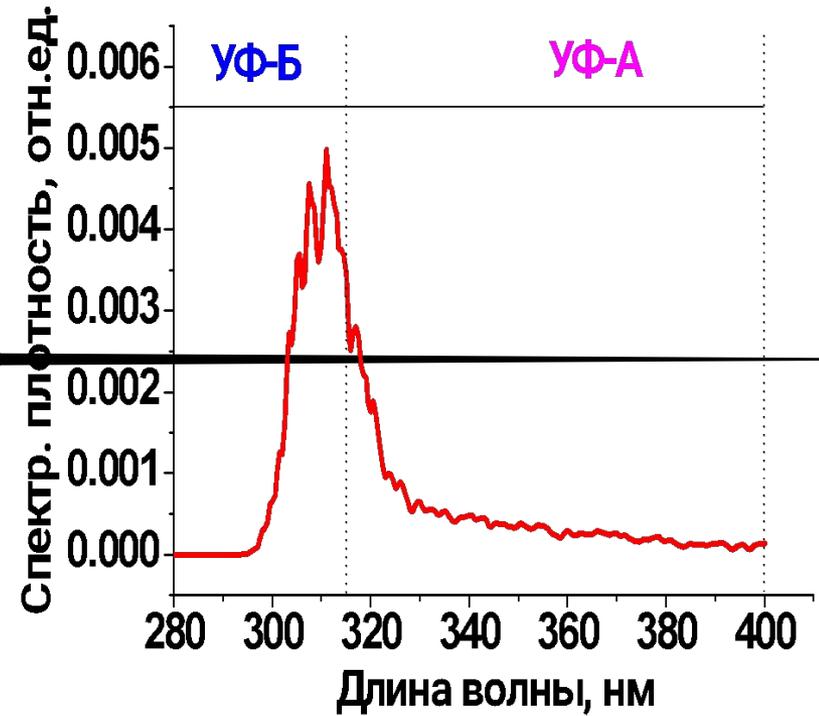
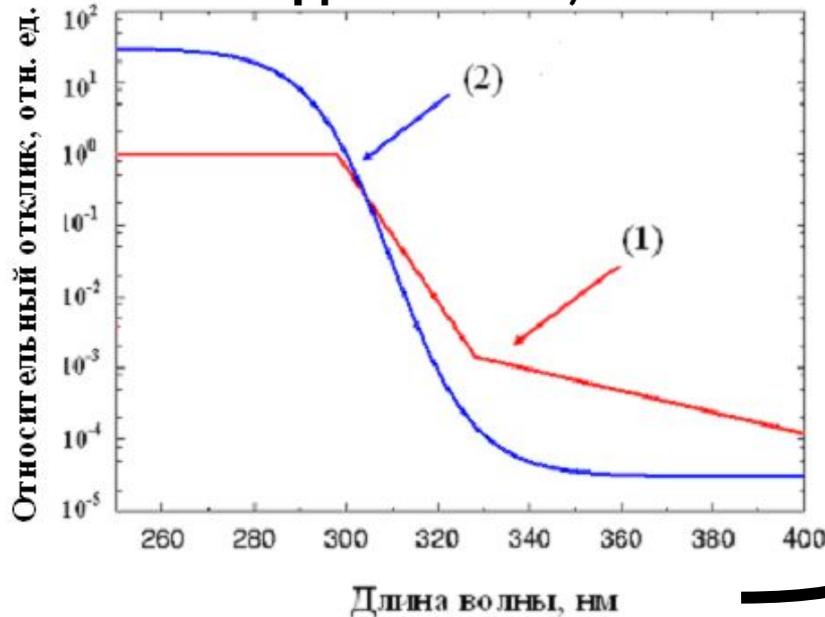
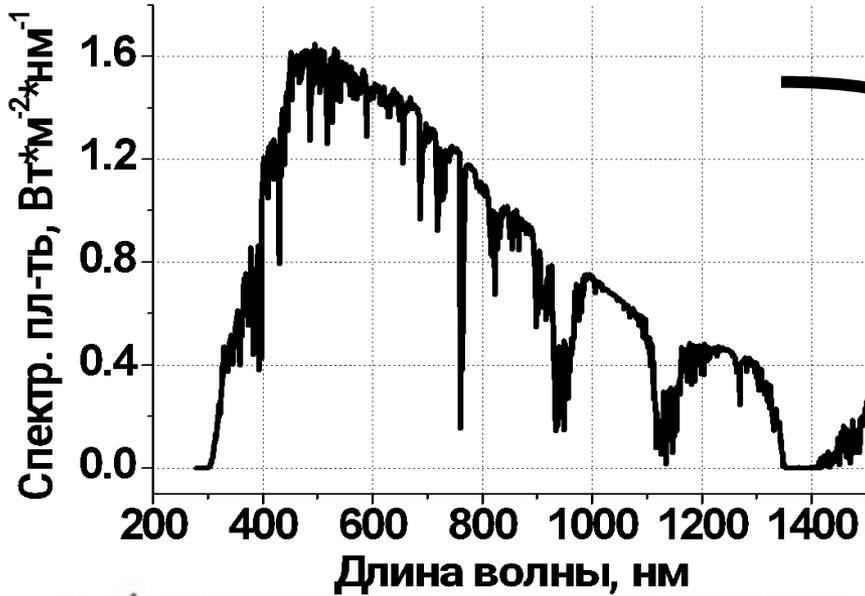
(а)

отн. чувствительность



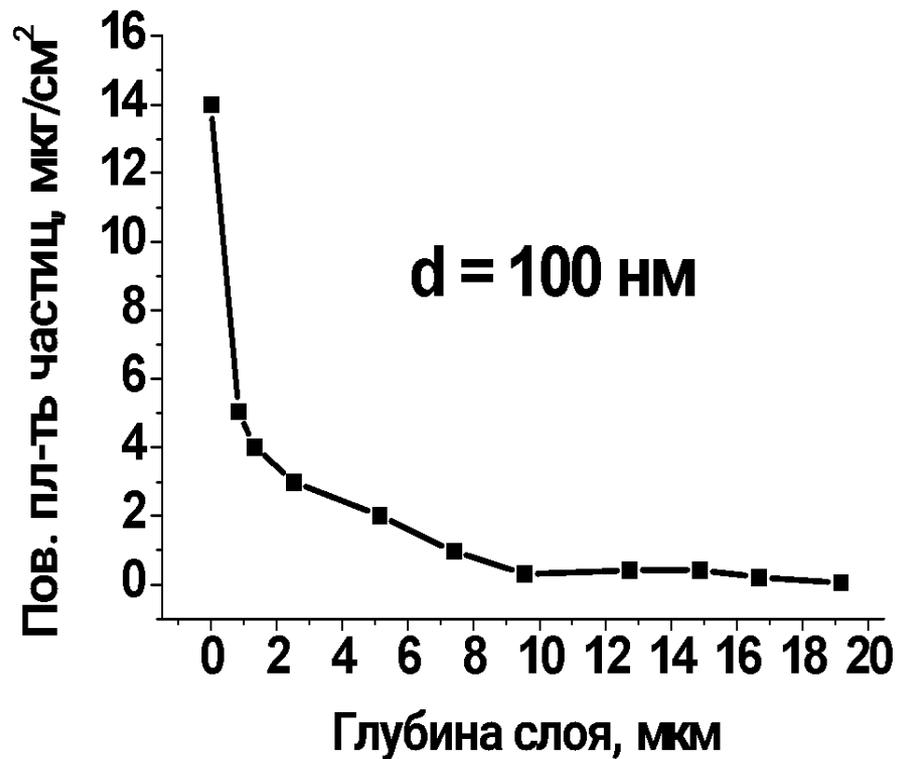
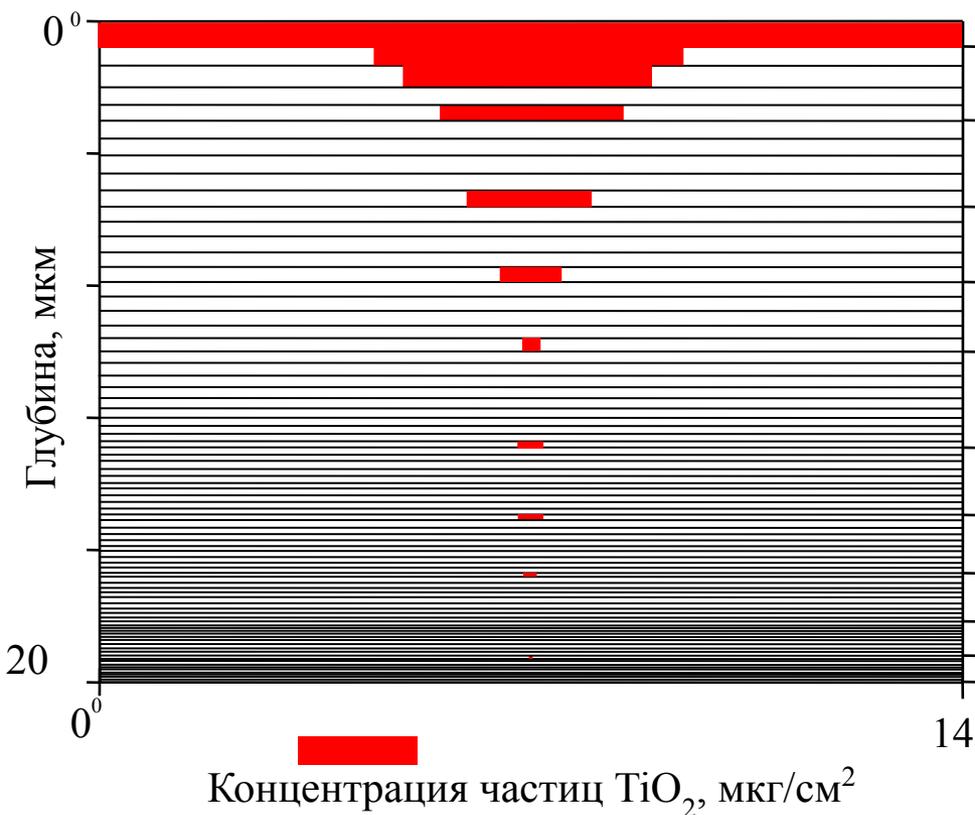
(б)

Глава 4. Спектр действия УФ-излучения



Наночастицы TiO_2 в роговом слое кожи

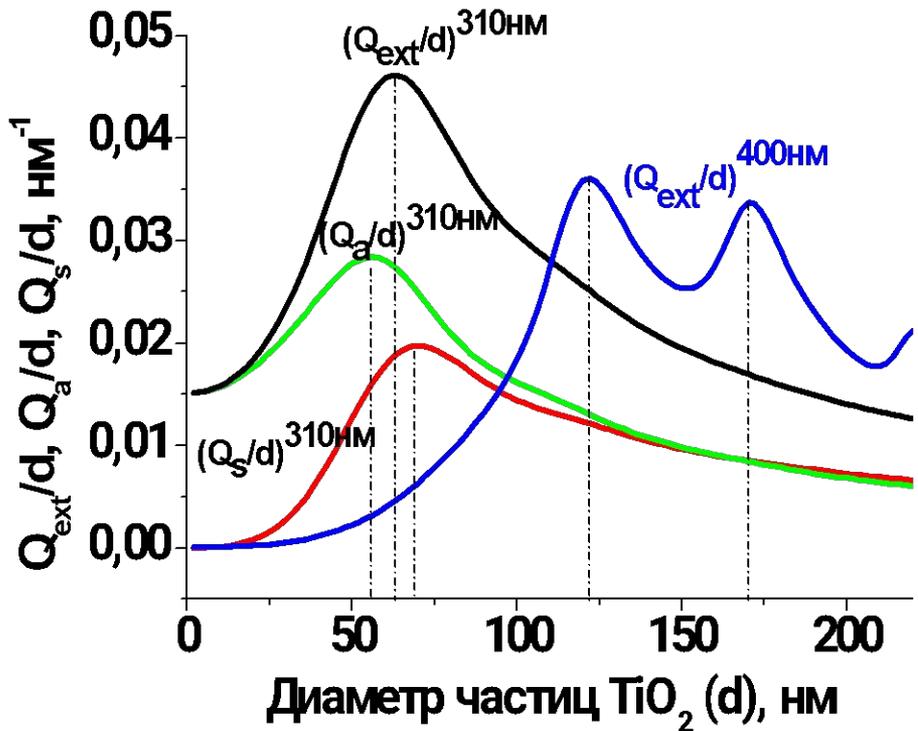
профиль распределения частиц по глубине



Объемная концентр. частиц TiO_2 :

$$C = \frac{N \cdot V_0}{V} = \frac{M}{\rho_0 \cdot V_0} \cdot \frac{V_0}{V} = \frac{M}{\rho_0 \cdot V}$$

Расчеты факторов эффективности для частицы по теории Ми

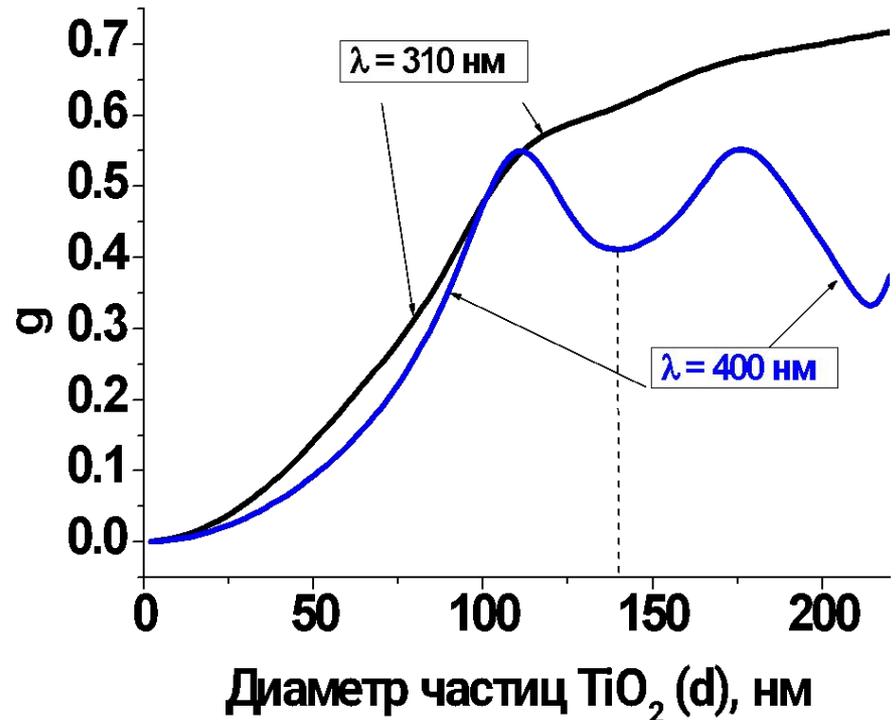


(а)

Относительные факторы эффективности рассеяния, поглощения и ослабления излучения частицей, отнесенные к диаметру (Q_s/d), (Q_a/d) и (Q_{ext}/d)

$Q_s = \sigma_s / (4\pi R^2)$ – фактор эф-ти расс.
 σ_s – сеч. рассеяния, R - радиус ч-цы

A.P. Popov et al., *J. Biomed. Opt.* **10**, 064037 (2005).



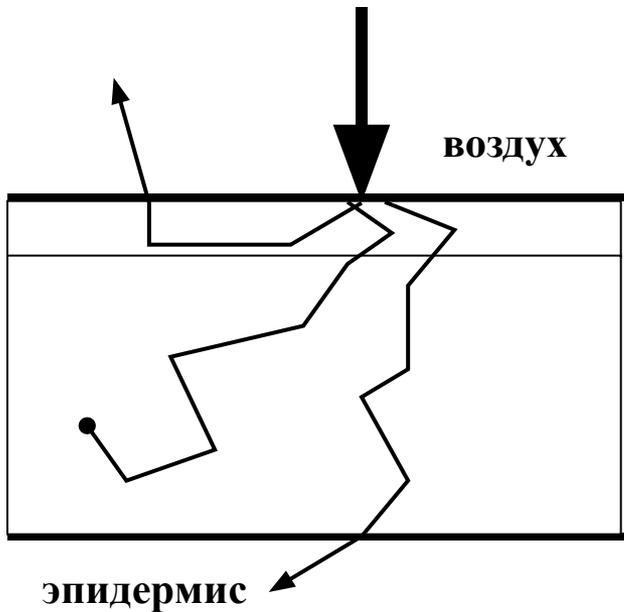
(б)

Фактор анизотропии рассеяния излучения частицей

Оптические св-ва наночастиц TiO_2

λ , нм	$Re(n) - i \cdot Im(n)$
310	3.56 – i · 1.72
400	3.13 – i · 0.008

Модель рогового слоя кожи с наночастицами



$$\mu_s^{(1)} = \frac{N \cdot \sigma_s}{V} = 1.5 \cdot \frac{Q_s \cdot C}{d} \quad \text{- коэффициент рассеяния частиц}$$

$$\mu_a^{(1)} = \frac{N \cdot \sigma_a}{V} = 1.5 \cdot \frac{Q_a \cdot C}{d} \quad \text{- коэффициент поглощения частиц}$$

$$p(\theta) = A \cdot p_{Mie}(\theta) + (1 - A) \cdot p_{HG}(\theta) \quad \text{- гибридная фазовая функция}$$

$$p_{HG}(\theta) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}} \quad \text{- фаз. функция рог. слоя}$$

$$\mu_a = \mu_a^{(1)} + \mu_{am} \quad \text{- коэффициент поглощения}$$

$$A = \mu_s^{(1)} / (\mu_s^{(1)} + \mu_{sm})$$

$$\mu_s = \mu_s^{(1)} + \mu_{sm} \quad \text{- коэффициент рассеяния}$$

Параметры рогового слоя

наночастицы TiO_2 в слое, $C = 1\%$

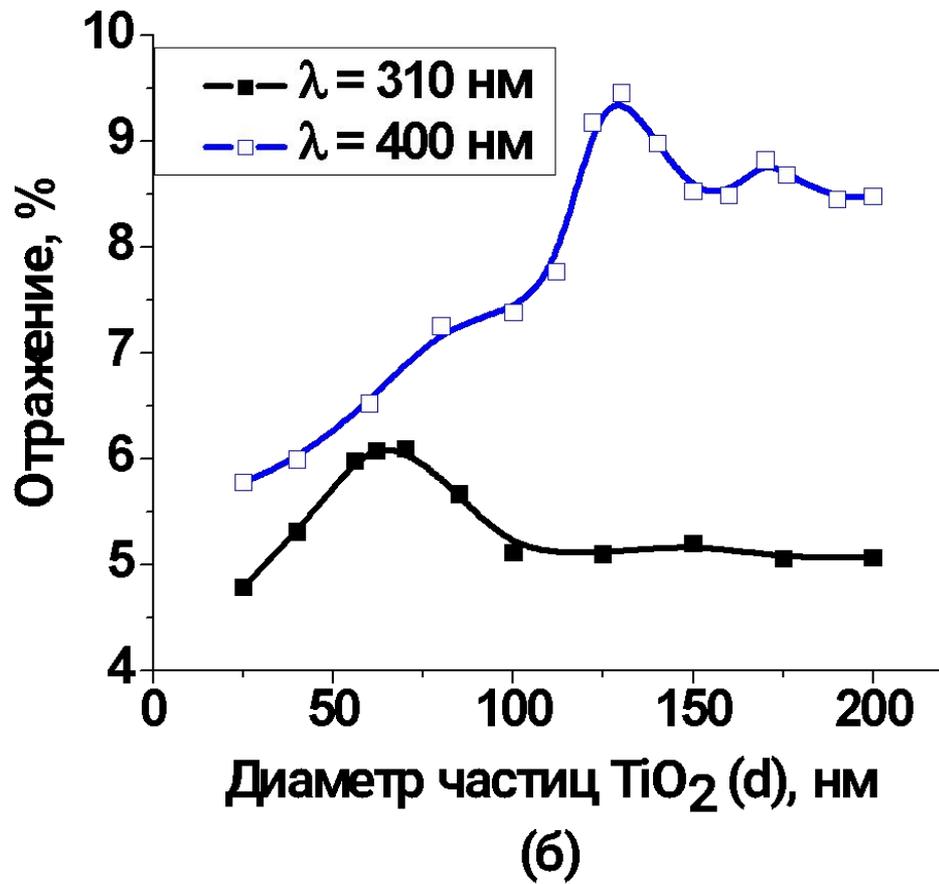
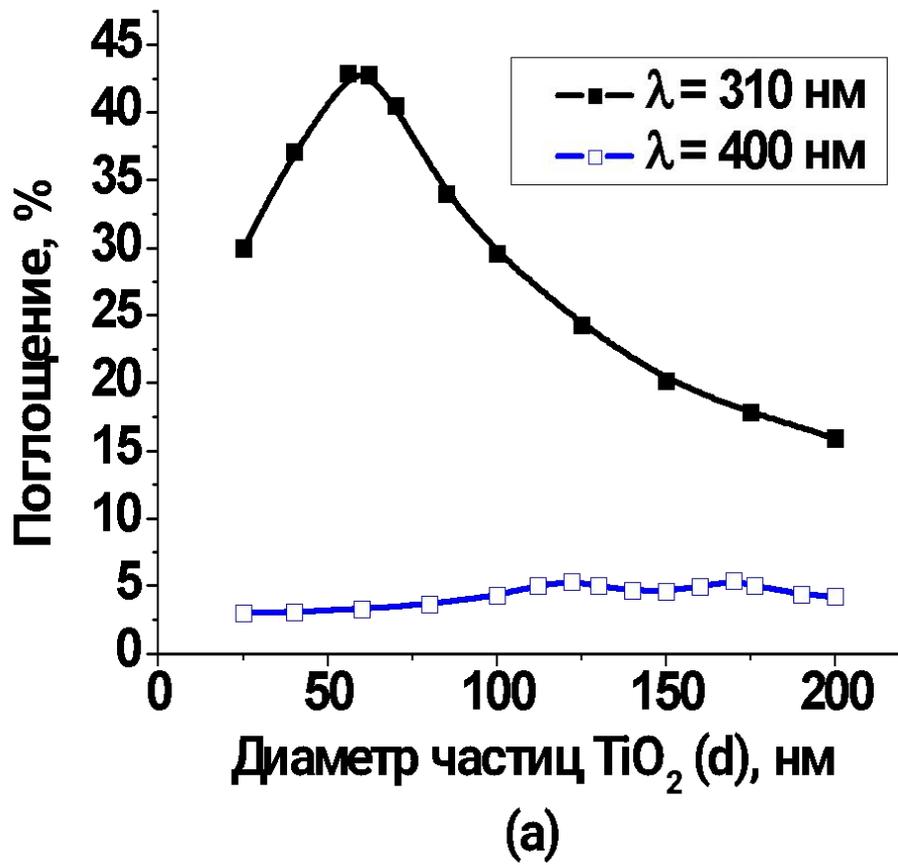
λ , нм	μ_{sm} , мм^{-1}	μ_{am} , мм^{-1}	g_m	n_m
310	240	60	0.9	1.53
400	200	23	0.9	1.53

λ , нм	μ_s , мм^{-1}	μ_a , мм^{-1}	d, нм
310	517	466	62
400	733	31	122

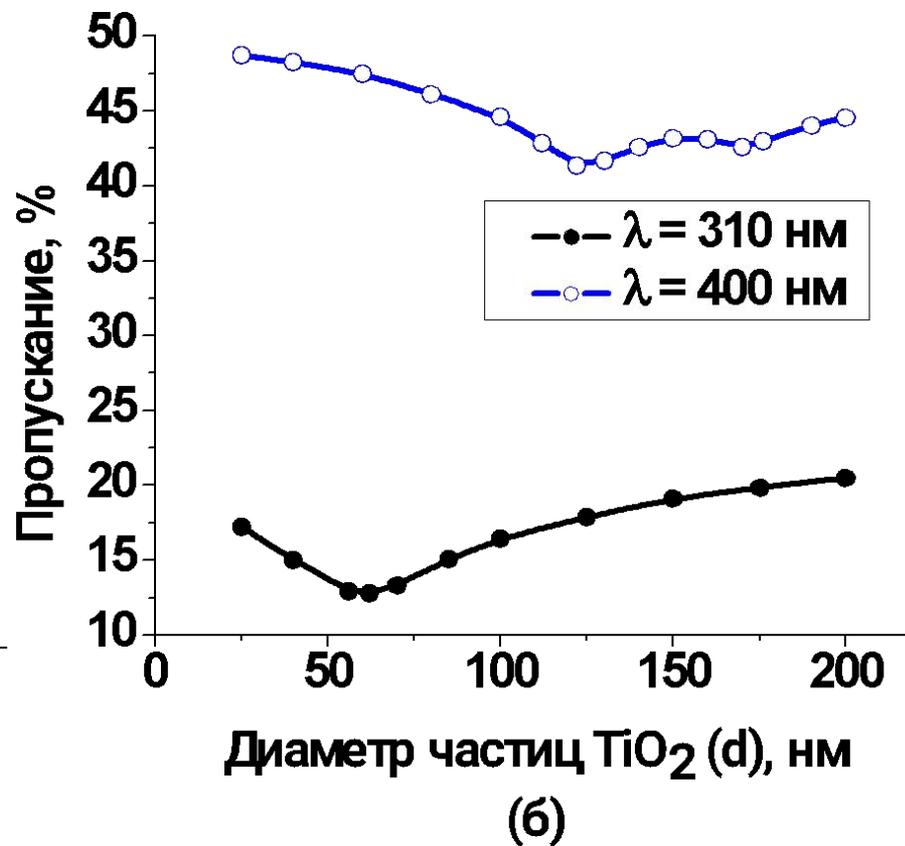
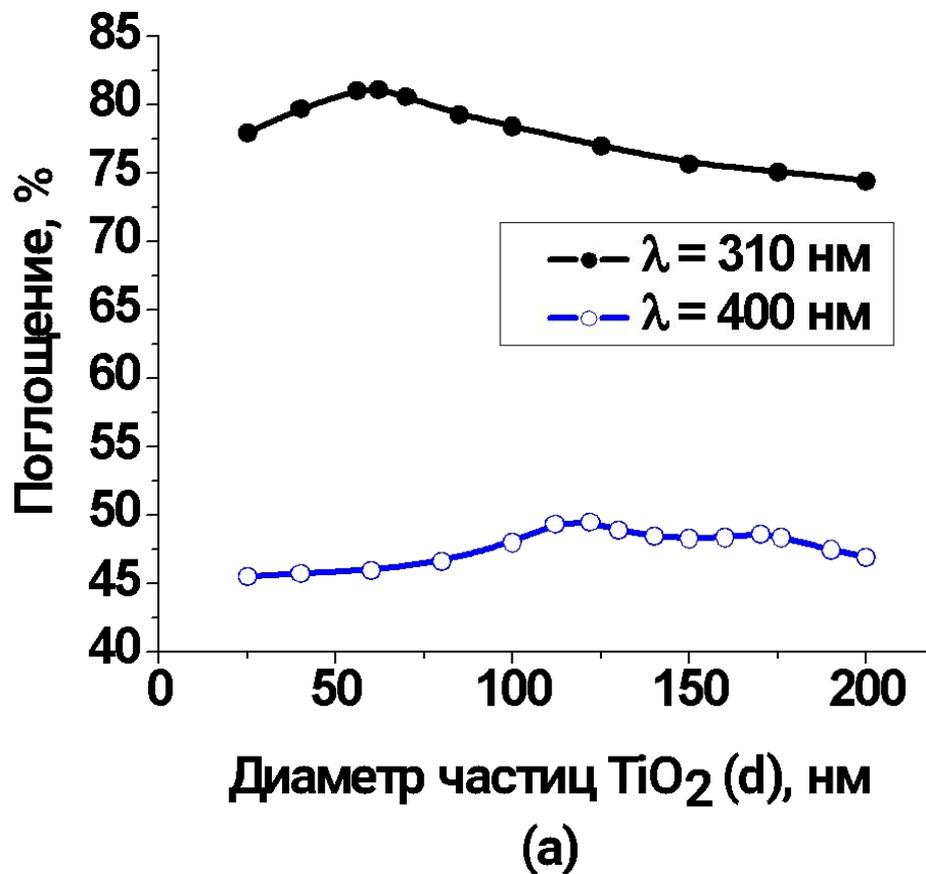
В.В. Тучин 1998.

M.W. Ribarsky 1985.

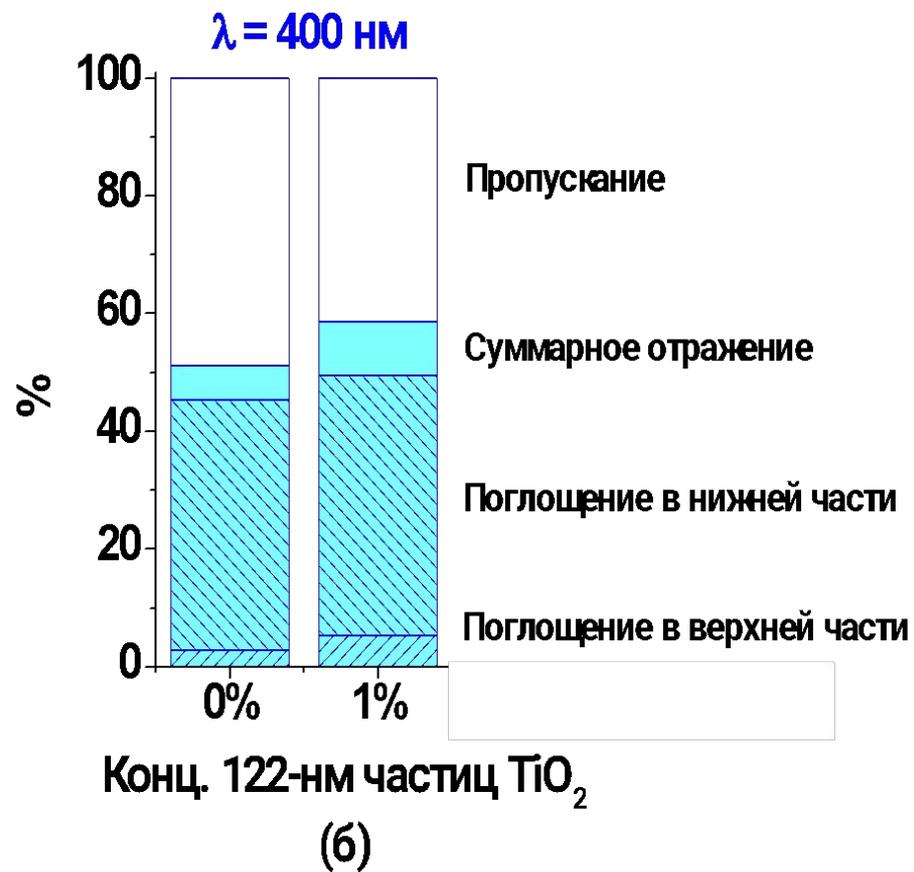
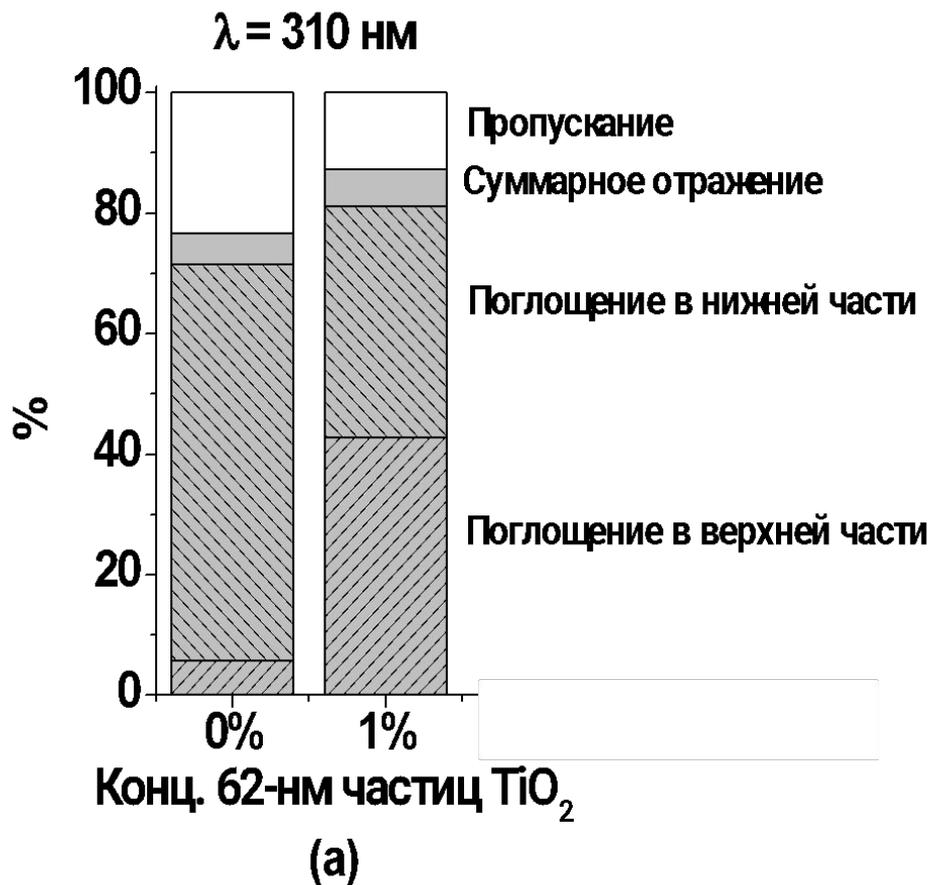
Зависимость поглощения (а) внутри верхней части рогового слоя (с частицами TiO_2) и отражения (б) на длинах волн 310 (■) и 400 нм (□) от диаметра частиц



**Зависимость поглощения (а) и пропускания (б)
всем роговым слоем (толщиной 20 мкм) на длинах волн
310 (●) и 400 нм (○) от диаметра частиц**



Влияние частиц TiO_2 оптимальных размеров на прохождение излучения с длинами волн 310 (а) и 400 нм (б) через роговой слой кожи



ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Сверхкороткие лазерные импульсы (**0.1 – 0.5 пс**) являются эффективным инструментом диагностики изменения таких параметров сильно рассеивающей среды, как коэффициент рассеяния, параметр анизотропии рассеяния и показатель преломления, имитирующих содержание глюкозы в коже в физиологическом диапазоне концентраций (**0 – 500 мг/дл**). При этом наиболее чувствительным параметром лазерного импульса являются его энергия при детектировании излучения, рассеянного в заднее полупространство.
2. Определен размер наночастиц, наиболее эффективно ослабляющих оптическое излучение при его распространении в сильно рассеивающей среде. Он зависит от длины волны излучения и соответствует положению максимума зависимости фактора экстинкции, отнесенного к диаметру наночастицы, от ее размера.
3. Основной вклад в ослабление излучения УФ-диапазона в сильно рассеивающей среде толщиной 20 мкм, моделирующей роговой слой кожи, вносит поглощение, при равном распределении наночастиц

СТАТЬИ В ЖУРНАЛАХ

- A.P. Popov, A.V. Priezzhev, J. Lademann, and R. Myllylä, “TiO₂ nanoparticles as effective UV-B radiation skin-protective compound in sunscreens”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, 2564-2570 (2005).
- А.П. Попов, А.В. Приезжев, Р. Мюллюля, “Влияние концентрации глюкозы в модельной светорассеивающей суспензии на характер распространения в ней сверхкоротких лазерных импульсов”, *Квант. эл.* **35**, 1075-1078 (2005).
- A.P. Popov, J. Lademann, A.V. Priezzhev, and R. Myllylä, “Effect of size of TiO₂ nanoparticles embedded into stratum corneum on UVA and UVB sun-blocking properties of the skin”, *J. Biomed. Opt.* **10**, 064037 (2005).
- А.П. Попов, А. В. Приезжев, Ю. Ладеман, Р. Мюллюля, “Влияние нанометровых частиц оксида титана на защитные свойства кожи в УФ-диапазоне”, *Опт. журнал* **73**, 67-71 (2006).
- А.О. Рыбалтовский, В.Н. Баграташвили, А.И. Белогорохов, В.В. Колташев, В.Г. Плотниченко, А.П. Попов, А.В. Приезжев, А.А. Ищенко, А.А. Свиридова, К.В. Зайцева, И.А. Тугорский, “Спектральные особенности водно-эмульсионных композитных сред, содержащих наночастицы кремния”, *Оптика и спектроскопия* **100**, 626-633 (2006).
- A.P. Popov, A.V. Priezzhev, J. Lademann, and R. Myllylä, “Advantages of NIR radiation use for optical determination of skin horny layer thickness with embedded TiO₂ nanoparticles during tape stripping procedure”, *Laser Physics* **16**, 751-757 (2006).