A grayscale microscopic image of biological tissue, showing various cellular structures and patterns. The image is used as a background for the text.

***ПРОБЛЕМЫ
ОПТИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ И
БИОФОТОНИКИ***

OPTICAL PHYSICS AND BIOPHOTONICS

***ПОСВЯЩАЕТСЯ СТОЛЕТИЮ
САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА***

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И БИОФОТОНИКИ

Материалы 12-ой Международной молодежной научной школы
по оптике, лазерной физике и биофизике

23 - 26 сентября 2008 года
Саратов

СБОРНИК ПОСВЯЩЕН СТОЛЕТИЮ
САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«Новый ветер»
2009

УДК 535(068)
ББК 22.343.43

П78 Проблемы оптической физики и биофотоники: Материалы 12 – ой Междунар. Молодежной научн. Школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. – Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2009. – 234 с.: ил

В сборник вошли конспекты лекций и краткие доклады участников 12 – ой Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике, организованной и проведенной в Саратове в сентябре 2008 года.

Для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов физических факультетов университетов, специализирующихся в области оптики, лазерной физики, оптических технологий в биофизике и медицине, спектроскопии и оптоэлектроники.

Редакционная коллегия:

В.В. Тучин (редактор), д-р физ.-мат. наук,
д-р физ.-мат. наук, В.Л. Дербов, д-р физ.-мат. наук,
В.П. Рябухо, д-р физ.-мат. наук, Д.А. Зимняков, д-р физ.-мат. наук,
Г.В. Симоненко (отв. секретарь), канд. физ.-мат. наук

*Международная молодежная научная школа проведена при финансовой поддержке
РФФИ (грант 08-02-06152-з),*

*Российского отделения Международного общества по оптической технике (SPIE),
Научно – образовательного центра «Нелинейная динамика и биофизика» Саратовского государственного
университета
(грант CRDF RUX0-006-SR-06-BG8206)*

*Издание осуществлено при финансовой поддержке Научно – образовательного центра «Нелинейная динамика
и биофизика» Саратовского государственного университета (грант CRDF RUX0-006-SR-06-BG8206)*

УДК 535(068)
ББК 22.343.43

Работа выполнена в авторской редакции
Научное издание

ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Материалы 12 – ой Международной молодежной научной школы
по оптике, лазерной физике и биофотонике

Отв. за выпуск Г.В. Симоненко
Технический редактор Перепелицина О.А. Корректор Лакодина Н.А.
Оригинал – макет подготовила Е.С. Кириллова

Подписано в печать 25.02.2009. Формат 60×84 ½. Бумага офсетная
Гарнитура Times New Roman Cyr. Печать офсетная. Усл. Печ. Л. 48,83(49)
Тираж 100. Заказ № 019

Издательство «Новый ветер»
Отпечатано в типографии ООО «Новый ветер»

ISBN 978 – 5 – 98116 – 085- 1

© Саратовский государственный университет, 2009

N.G. Chernyshevsky Saratov State University

OPTICAL PHYSICS AND BIOPHOTONICS

Proceedings of 12th Annual International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser
Physics & Biophotonics

Dedicated to the Centenary Anniversary of Saratov State University

23 – 26 September 2008
Saratov, Russia

«Novyi Veter» Press
2009

Optical Physics and Biophotonics: Proceedings of 12th Annual International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics & Biophotonics. – Saratov: «Novyi Veter», 2009. – 234 p.: figs

The Proceeding includes abstracts of lectures and brief reports of participants of 12th Annual International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics & Biophotonics organized in Saratov in September 2008.

For researchers, postgraduate and undergraduate students of physical departments of universities specializing in the field of optics, laser physics, optical technologies in biophysics and medicine, spectroscopy and optoelectronics.

Editorial Board:

V.V. Tuchin (editor), PhD, DSc

V.L. Derbov, PhD, DSc,

V.P. Ryabukho, PhD, DSc, D.A. Zimnyakov, PhD, DSc,

G.V. Simonenko (executive secretary), PhD

*International School for Young Scientists was organized at the financial support of
RFBR (grant 08-02-06152-z),
International Society for Optical Engineering (SPIE),
Research – Educational Center “Nonlinear Dynamics and Biophysics” of Saratov State University
(grant CRDF RUX0-006-SR-06-BG8206)*

*Proceeding is published at the financial support of Research – Educational Center “Nonlinear Dynamics and
Biophysics” of Saratov State University (grant CRDF RUX0-006-SR-06-BG8206)*

«Novyi Veter» Press
Printed by «Novyi Veter» Ltd.

ISBN 978 – 5 – 98116 – 085- 1

© Saratov State University, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	9
ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ	
Response Variable Transform method for concentration measurement with near-infrared spectroscopy in high scattering backgrounds Dan Peng, Huijuan Zhao, Kexin Xu	11
Laser Speckle Imaging for the Quantitative Assessment of Flow Velocity Donald D. Duncan, Sean J. Kirkpatrick, James C. Gladish, & Sawan A. Hurst	16
Study of INS-1E insulinoma cells using autofluorescence imaging J. Kirchnerova, M. Uherek, P. Topor, V. Strbak and D. Chorvat jr.	23
Characterization of dental composite curing using dynamic light scattering Elaine M. Wells-Gray, Sean J. Kirkpatrick, Donald D. Duncan and Ron L. Sakaguchi	29
Обработка сигналов в оптической когерентной томографии с использованием рекурсивной обратной свертки М.А. Вольнский	33
Опыт лазерофотокоагуляции кровоточащей язвы желудка и двенадцатиперстной кишки Ю.Г. Шапкин, С.В. Капралов, В.А. Гришаев, А.Н. Башкатов, Э.А. Генина, В.В. Тучин	37
Модель проницаемости дентина Н.А. Трунина, В.Л. Дербов, В.В. Тучин, Г.Б. Альтшулер	42
Исследование оптического просветления дентина Н.С. Герасимова, Э. А. Генина, Трунина Н.А., А. Н. Башкатов, В.И. Кочубей, В.В. Тучин	47
Моделирование влияния возрастных изменений структуры коллагеновых тканей на их оптическую анизотропию А.Д. Михайлова, Д.А. Зимняков	54
Проточный метод регистрации реакции агглютинации эритроцитов in vitro на основе кросскорреляционного анализа Ю.А. Ганилова, В.А. Дубровский, С.С. Ульянов	60
Регистрация агглютинации эритроцитов на основе математической обработки цифровых фотографий К.Н. Дворецкий, А.А. Долмашкин, В.А. Дубровский	63
Моделирование влияния эпидермиса на перенос света и тепла в кожном покрове В. В. Барун, А. П. Иванов, И. В. Васильковский, С. М. Кватернюк, В. Г. Петрук	69
Спектральные особенности распространения света в морской воде с сильно поглощающими водорослями В. В. Барун, А. П. Иванов, И. В. Васильковский, С. М. Кватернюк, В. Г. Петрук	78
Фотостарение Г.Ф. Пронченкова, С.А. Шишова	85
ОПТИКА РАССЕИВАЮЩИХ СРЕД	89
A heuristic method to describe co-localized scattering and absorbing perturbations in optically diffusive media beyond born approximation Angelo Sassaroli, Fabrizio Martelli, and Sergio Fantini	89
Об особенностях рассеяния лазерного излучения слоями композитов «жидкий кристалл – диспергирующий полимер» Д.А. Зимняков, А.В. Садовой, М.А. Виленский, А. Кудряшова	92
Идентификация спекл-структур, порожденных средой распространения в задачах оптического контроля строительных конструкций Д.К. Проскурин, Н.С. Печенкин, А.В. Земцов	98
Архитектура информационной системы численного моделирования процессов рассеяния оптических волн Д.К. Проскурин, А.В. Земцов, Н.С. Печенкин	102
ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА	111
Адиабатический подход для задачи о параболической квантовой яме С.И. Виницкий, А.А. Гусев, О. Чулуунбаатар, В.Л. Дербов, Э.М. Казарян, А.А. Костянян, А.А. Саркисян	111
Исследование аномально больших логарифмических вкладов при решении задачи об отдаче ядра квазипотенциальным методом О.А. Бойкова, Н.А. Бойкова, С.В. Клещевская, Ю.Н. Тютяев	118
Водородоподобный атом в поле титан-сапфирового лазера Н.И. Тепер, В.Л. Дербов	124
Численное моделирование эволюции резонансных эллиптически поляризованных оптических бризеров А.В. Волков, О.М. Паршков	126
Спектр излучения системы двух идентичных диполь-дипольно взаимодействующих атомов Горохов А.В., Семин В.В.	132
Численное моделирование поляризационных эффектов при нестационарном двойном резонансе на вырожденных квантовых переходах А.В. Волков, Н.А.	

24. M. Meinke, M. Friebel, G. Muller Influence of cell shape and orientation on the optical properties of human erythrocytes // SPIE Proc. 2007. V. 6629. Paper No. 6629-13.
25. M. Meinke, G. Muller, J. Helfmann, M. Friebel Optical properties of platelets and blood plasma and their influence on the optical behavior of whole blood in the visible to near infrared wavelength range // J. Biomed. Opt. 2007. V. 12. No. 1. P. 0140241-1 – 014024-9.
26. В.В. Барун, А.П. Иванов, А.В. Волотовская, В.С. Улащик Спектры поглощения и глубина проникновения света в нормальную и патологически измененную кожу человека // Журн. прикл. спектроск. 2007. Т. 74. № 3. С. 388 – 394.
27. В.В. Барун, А.П. Иванов Световое и тепловое воздействие низкоинтенсивного лазерного излучения на биологические ткани. Аналитические подходы // Альманах клинической медицины. 2008. Т. XVII. Ч. 1. С. 20 – 23.
28. В.В. Барун, А.П. Иванов Аналитический подход к описанию нагрева многокомпонентных биологических тканей лазерным излучением // Кв. электрон. 2004. Т. 34. № 11. С. 1069 – 1076.
29. Ю.Н. Щербаков, А.Н. Якунин, И.В. Ярославский, В.В. Тучин Моделирование тепловых процессов при взаимодействии некоагулирующего лазерного излучения с многослойной биотканью. II. Численные результаты // Опт. спектроск. 1994. Т. 76. № 5. С. 851 – 857.

Спектральные особенности распространения света в морской воде с сильно поглощающими водорослями

В. В. Барун¹, А. П. Иванов¹, И. В. Васильковский², С. М. Кватернюк², В. Г. Петрук²

¹*Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ, пр. Независимости 68, Минск 220072, Беларусь,
email: barun@dragon.bas-net.by, ivanovap@dragon.bas-net.by*

²*Винницкий национальный технический университет, Хмельницкое шоссе 95, Винница 21001,
Украина, email: petruk@vstu.vinnica.ua*

Исследовано влияние эффекта «сита» или локализованного поглощения излучения водорослями морской воды на ее спектральный показатель поглощения. По аналогии с опубликованными ранее оценками для кровеносных сосудов в дерме, получены аналитические формулы, описывающие этот эффект. Показано, что локализованное поглощение в сине-зеленой области спектра приводит к уменьшению суммарного показателя поглощения морской воды по сравнению с равномерным распределением поглотителя по элементарному объему среды и, как следствие, к увеличению глубины проникновения света в толщу воды и ее коэффициента диффузного отражения. В зависимости от концентрации водорослей, такие изменения глубины проникновения и коэффициента отражения могут достигать 2-х и более раз. Полученные результаты важны, например, для оценки биопродуктивности водоемов по спектрам восходящего излучения.

Введение

Распространение света в дисперсной среде зависит от характеристик рассеяния и поглощения ее элементарного объема. Если среда многокомпонентная и оптические свойства каждой составляющей известны, то обычно характеристики среды находят как средневзвешенные параметры компонент с весами, равными их объемным концентрациям. Физически это соответствует “размазыванию” свойств отдельных компонент на весь элементарный объем или аддитивному сложению. Такой подход вполне уместен для большинства ситуаций. Однако возможны другие случаи. В оптике биологических объектов известно явление под названием эффекта “сита” [1]. Его сущность сводится к следующему. Основное поглощение биологической ткани в видимой области спектра имеет место в кровеносных сосудах, содержащих гемоглобин. Их объемная концентрация невелика (несколько процентов), но они образуют сильно поглощающую “сетку”. В синей области спектра поглощение света в кровеносных сосудах велико. Если для определения показателя поглощения элементарного объема использовать вышеуказанный метод аддитивности, то этот объем также будет сильно поглощать излучение. Между тем, очевидно, что достаточно большая доля света пройдет через непоглощающие участки в среде, т.е. через «дырки» в упомянутой «сетке». Это и есть эффект «сита» или влияние локализованного поглощения на оптические характеристики. Под «локализованным» понимается поглощение света в ограниченных по пространству областях, занимающих малую долю объема среды, и его надо учитывать при определении параметров элементарного объема. Подобно капиллярам в ткани, показатель поглощения морской воды подвержен влиянию водорослей. В

данной работе, опираясь на теоретические результаты по распространению света в биологических тканях [2, 3], проанализирован эффект «сита» в морской воде.

Постановка задачи

Задача сводится к оценке вклада поглощения водорослей в суммарную поглощательную способность морской воды. Здесь рассматривается только поглощение по следующим причинам. Показатели преломления воды и водорослей близки, так что рассеяние на них происходит, в основном, в узкой области углов вблизи направления «вперед» [4], и во многих случаях это излучение можно отнести к нерассеянному свету [5]. Кроме того, концентрация водорослей мала и поэтому их рассеянием, по сравнению с рассеянием другими компонентами, часто можно пренебречь. По определению [6], показатель поглощения среды численно равен поглощенному единичным объемом потоку излучения при единичном падающем потоке. Для морской воды он имеет вид [7]

$$k(\lambda) = k_y(\lambda)f_y + Ck_a(\lambda)f_a + k_w(\lambda)(1 - f_y - f_a) = K_y(\lambda) + K_a(\lambda) + K_w(\lambda) \quad (1)$$

Здесь λ – длина волны, k_y и k_a – показатели поглощения желтого вещества и водорослей; f_y и f_a – их объемные концентрации, k_w – показатель поглощения чистой воды, K_y, a, w – вклады соответствующих компонент в суммарное поглощение. В свою очередь, $k_a = f_p k_p$, где k_p – показатель поглощения пигментов, а f_p – их концентрация в водорослях. В (1) размерность показателей поглощения 1/длина. Поглощением органических и неорганических частиц и других возможных компонент, согласно [8], пренебрежем. Часто формулу (1) записывают через удельные концентрации компонент (в мг/м³). Тогда соответствующим образом изменится размерность величин k_y и k_a . Отметим, что в этом случае произведение $F = f_p f_p$ есть размерная концентрация пигментов в морской воде. Ниже она выражена в мг/м³. Поправочный коэффициент C в (1) учитывает локализованное поглощение света водорослями. При аддитивном сложении показателей $C = 1$. Цель данной работы состоит в определении коэффициента C . По физическому смыслу $C \leq 1$, и он, как бы, уменьшает эффективную концентрацию f_p пигментов в водорослях, обуславливающих поглощение света морской водой.

Как видно из (1), суммарный показатель поглощения k пропорционален произведению CF , т.е. его зависимость от концентрации F слабее, чем при обычном аддитивном сложении. Для кровеносных сосудов было показано [3], что коэффициент C уменьшается с ростом f_p как $1/f_p$ (здесь под f_p следует понимать объемную концентрацию капилляров), так что произведение Cf_p или вклад поглощения кровью в суммарный показатель поглощения ткани претерпевает «насыщение» при достаточно больших значениях f_p . Аналогичная зависимость поглощения водорослями от концентрации f_p пигментов исследовалась теоретически [11 – 15] и экспериментально [15 – 17], где также отмечено указанное «насыщение». Применительно к оптике фитопланктона этот эффект в англоязычной литературе называют “pigment packaging”. Его физическая причина вполне понятна – при больших концентрациях f_p или, что эквивалентно, при больших характерных размерах поглотителя [3, 13] свет ослабляется, в основном, его периферийными участками, а до внутренних областей он просто не доходит, так что последние не участвуют в поглощении. Отличительной особенностью данной работы являются предложенные ниже инженерные формулы для оценки эффекта «сита», позволяющие аналитически изучать влияние различных параметров водорослей на их вклад в суммарное поглощение морской воды и, в частности, свести сложные формы поглотителей к очень простой сферической (см. ниже). Обычно же для несферических поглотителей этот эффект исследуется численными методами [9], включая метод Монте Карло [10].

Методика расчета поправочного коэффициента

По аналогии с [2, 3, 9, 10, 13], форму водорослей будем моделировать в виде цилиндров длины L и диаметра D . Под L и D понимаются средние величины. Ось цилиндра ориентирована по отношению к падающему свету под углом θ_0 . Пренебрежем отражением и преломлением света на поверхности водоросли. В [2, 3] рассчитан поперечник поглощения S ориентированного цилиндра, а по нему и показатель поглощения элементарного объема, обусловленный только водорослями,

$$k_1 = NS = Cf_p k_p \quad (2)$$

где N – количество водорослей в единице объема воды. Обычно (без учета эффекта «сита») показатель поглощения записывают в виде $k_a = f_p k_p$, но в общем случае в формуле (1) необходимо

использовать k_1 . Если водоросли в воде распределены хаотично, так что все их ориентации равновероятны, следует выполнить усреднение коэффициента C по возможным положениям оси цилиндра в пространстве. В [2, 3] показано, что в расчетах показателя поглощения цилиндр можно заменить параллелепипедом той же длины, но с поперечным сечением $D \times a_{\text{eff}}$, где a_{eff} – сторона вдоль направления падения света. В результате были получены приведенные ниже формулы для C [2, 3].

Для случайно ориентированных поглотителей

$$C_{\text{rand}} = \frac{0.25\pi L + 0.5a_{\text{eff}} - \int_0^{\pi/2} \sin \vartheta d\vartheta \int_0^{L \sin \vartheta + a_{\text{eff}} \cos \vartheta} \tau(x, \vartheta) dx}{k_p L \pi D / 4} \quad (3)$$

Здесь τ – коэффициент пропускания параллелепипеда в точке x , лежащей в плоскости, перпендикулярной направлению падения света. Внутренний интеграл по x вычисляется вдоль длины проекции параллелепипеда на указанную плоскость. Используя явный вид коэффициента пропускания [2, 3], находим

$$\int_0^{L \sin \vartheta + a_{\text{eff}} \cos \vartheta} \tau(x, \vartheta) dx = \begin{cases} \frac{\sin 2\vartheta}{k_p} [1 - \exp(-\frac{k_p L}{\cos \vartheta})] + (a_{\text{eff}} \cos \vartheta - L \sin \vartheta) \exp(-\frac{k_p L}{\cos \vartheta}) \\ \text{при } 0 \leq \vartheta \leq \arctg(a_{\text{eff}} / L), \\ \frac{\sin 2\vartheta}{k_p} [1 - \exp(-\frac{k_p a_{\text{eff}}}{\sin \vartheta})] + (L \sin \vartheta - a_{\text{eff}} \cos \vartheta) \exp(-\frac{k_p a_{\text{eff}}}{\sin \vartheta}) \\ \text{при } \arctg(a_{\text{eff}} / L) \leq \vartheta \leq \pi / 2, \end{cases} \quad (4)$$

$$a_{\text{eff}} = -\frac{1}{k_p} \ln \left[\int_0^1 \exp(-k_p D \sqrt{1-x^2}) dx \right] \quad (5)$$

Выражение (3) принимает простой вид при $L = \infty$

$$C_{\text{rand}} = \frac{1 - \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin^2 \vartheta \exp(-k_p a_{\text{eff}} / \sin \vartheta) d\vartheta}{k_p D} \quad (6)$$

Из (4) и (5) видно, что C_{rand} зависит от произведения $k_p D$, а не от каждого из сомножителей в отдельности. Таким образом, имеет место отмеченная выше эквивалентность [3, 13] размеров D и показателя k_p (или концентрации f_p) локализованных поглотителей. Аналогично (3), (4) и (6) можно получить формулы для поправочного коэффициента C_{alig} при другой крайней ситуации – полностью ориентированных поглощающих цилиндров при произвольном угле ϑ_0 между направлением падения света и осью цилиндра. При $L = \infty$ имеем

$$C_{\text{alig}} = \frac{\sin \vartheta_0 [1 - \exp(-k_p a_{\text{eff}} / \sin \vartheta_0)]}{k_p \pi D / 4} \quad (7)$$

Некоторые свойства водорослей

Для конкретного анализа поправочного коэффициента C дадим общую справку о свойствах водорослей. Известно более 30000 видов водорослей. Их размеры варьируются от долей мкм (*Coccolithoforides*) до десятков метров (*Macrocystis*). Водоросли находятся под поверхностью воды до глубин 20 – 40 м. Самыми простыми из них – отдельные клетки (напр., диатомы); более сложные образуют сферические колонии (*Volvox*), имеют вид ленточек (*Spirogyra*) или пластинчатых ветвлений (*Fucus*). Водоросли содержат различные пигменты, поглощающие свет (например, хлорофиллы a , b и c , каратиноиды, фикобилины и др. [18]). Концентрация этих пигментов зависит от множества факторов (вида водоросли, ее возраста, условий роста). Однако их содержание тесно коррелирует с концентрацией хлорофилла a , поглощение которого является

превалирующим. По данным натурных измерений коэффициенты корреляции превышают 0.85 [18, 19]. Мониторинг хлорофилла a осуществляется различными инструментальными средствами, в т.ч. и космическими (спектрометр MODIS, установленный на платформе ADEOS-II GLI [20]). Например, ежедневно на сайте [20] публикуются данные этого прибора по концентрации хлорофилла a в западной части Тихого океана вблизи берегов Китая, Кореи, Японии и России. Как следует из [20], концентрация может варьироваться примерно от 0.01 до 60 мг/м³, хотя типичные ее значения для олиготрофных и мезотрофных вод составляют 0.09 – 0.35 мг/м³ [21]. С другой стороны, проводятся лабораторные эксперименты по исследованию поглощения света пигментами водорослей. В таблице, по данным работы [22], приведены сведения по морфологии и оптическим свойствам тех водорослей, на которых выполнено большое количество измерений. Водоросли были собраны в водах Атлантического океана вблизи берегов Испании и Португалии. Результаты таблицы пересчитаны с длины волны 675 нм [22] на $\lambda = 440$ нм в соответствии с хорошо известным спектром показателя поглощения хлорофилла a . Эти данные позволяют найти k_p как отношение средней оптической плотности к средней толщине листа водоросли. Ниже будем использовать $k_p(\lambda = 440 \text{ нм}) = 5 \text{ мм}^{-1}$ (2.5/0.5 мм).

Таблица
Экспериментальные данные [22] по морфологии и оптическим свойствам водорослей

Водоросль	Количество измерений	Оптическая плотность ($\lambda \cong 440$ нм)	Концентрация хлорофилла a , мг/мм ²	Толщина (мм)
<i>Posidonia oceanica</i>	80	1.1 – 5	0.07 – 0.41	0.25 – 0.82
<i>Cymodocea nodosa</i>	40	1.2 – 4.3	0.086 – 0.44	0.22 – 1
<i>Zostera noltii</i>	15	1.1 – 2.7	0.096 – 0.246	0.146 – 0.46

Результаты расчетов поправочного коэффициента

Перейдем к исследованию зависимости C от оптико-геометрических параметров поглотителя. Рис. 1 иллюстрирует влияние оптического диаметра $k_p D$ на коэффициент C при разной ориентации водорослей для $L = \infty$. Из рисунка следует, что поправочные коэффициенты C_{rand} (кривая 1) и C_{alig} (2 – 4) заметно убывают с ростом оптического диаметра. Так, при $k_p D = 8$ только 10 – 20% объема водорослей эффективно участвует в поглощении света. Как отмечалось выше, физически это связано с ослаблением излучения, в основном, вблизи поверхности водоросли. При направленной ориентации водорослей с уменьшением ϑ_0 значения C падают. Это обусловлено увеличением характерного размера поглотителя вдоль светового луча при малых ϑ_0 . Видно также, что кривые 1 (хаотическая ориентация) и 3 ($\vartheta_0 = 60$ град) близки друг к другу. Таким образом, при расчете C_{rand} можно практически обойтись без интегрирования в (3), а вычислять его значения по (6) при $\vartheta_0 = 60^\circ$ (см. ниже (12)). На рис. 1 изображена также зависимость нормированной величины $a^* = a_{\text{eff}} / (0.25\pi D)$ от оптического диаметра $k_p D$ (кривая 5). Эту зависимость при $k_p D \leq 8$ можно аппроксимировать формулой

$$a_{\text{eff}} = 0.25\pi D(1 - 0.043k_p D) \quad (8)$$

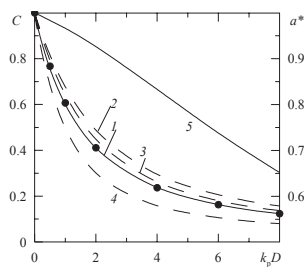


Рис. 1. Зависимость поправочного коэффициента C (кривые 1 – 4) и стороны a^* (5) параллелепипеда от $k_p D$ для хаотично распределенных (1) и ориентированных цилиндрических поглотителей при $\vartheta_0 = 90$ (2), 60 (3) и 30 град (4). Точки дают значения C для эквивалентных сфер

Различия в поправочных коэффициентах C_{rand} (3), (6), рассчитанных с помощью (5) или (8), не превышают нескольких процентов. Итак, формулы (7) и (8) дают полностью аналитическую запись коэффициента C в случае цилиндров.

На рис.1 приведена также зависимость поправочного коэффициента C от $k_p D$ для сферических поглотителей (точки), которые имеют такое же, как у цилиндров, отношение объема к боковой поверхности. В этом случае диаметр сферы

$$D_s = 1.5D. \quad (9)$$

Несложно показать, что коэффициент пропускания сферического поглотителя

$$T_s = [1 - (1 + D_s k_p) \exp(-D_s k_p)] / [0.5(D_s k_p)^2] \quad (10)$$

Тогда соответствующий поправочный коэффициент

$$C_s = 1.5(1 - T_s) / (D_s k_p) \quad (11)$$

Видно, что точки практически совпадают со сплошной кривой для хаотически ориентированных цилиндров. Таким образом, формулы (9) – (11) дают очень простую аналитическую аппроксимацию поправочного коэффициента C при $L = \infty$. Для другой ситуации, когда $L < D$, цилиндры можно заменить на эквивалентные сферические поглотители того же объема [23]. Ниже будем анализировать только случай $L = \infty$.

Рис.2 иллюстрирует влияние конечной длины цилиндра на C_{rand} . Здесь приведены зависимости $C^* = C_{\text{rand}}(L) / C_{\text{rand}}(L = \infty)$ от отношения L/D . Видно, что при $L/D \geq 3 - 4$ указанный нормированный поправочный коэффициент близок к единице. Поэтому часто водоросли можно рассматривать как бесконечно длинные цилиндры, что, с учетом сказанного выше, существенно упрощает расчетные формулы. Близость кривых 1 и 3 на рис. 1 позволяет полностью избавиться от интегрирования в (6) и использовать для хаотически ориентированных цилиндров соотношение

$$C_{\text{rand}} = 2\sqrt{3} \frac{1 - \exp[-\pi k_b D(1 - 0.043k_b D)/(2\sqrt{3})]}{\pi k_b D} \quad (12)$$

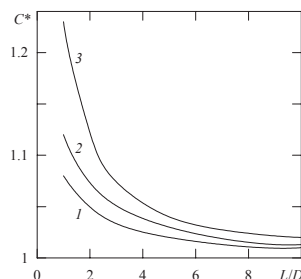


Рис.2. Зависимость нормированного поправочного коэффициента C^* от L/D для хаотично распределенных поглотителей при $k_p D = 0.5$ (кривая 1), 1 (2) и 8 (3)

Спектральные характеристики рассеяния и поглощения света морской водой

Рассмотрим, как влияет коэффициент C на спектральный показатель поглощения всего элементарного объема морской воды и характеристики, описывающие распространение света в такой среде.

На рис. 3 приведены спектры поглощения пигментов водорослей, желтого вещества и чистой воды [9], а также их смеси – морской воды в целом. Концентрация пигментов полагалась равной $F = 3 \text{ мг/м}^3$, что соответствует повышенному содержанию хлорофилла a по сравнению со средним его значением [21]. Максимум поглощения пигментов находится вблизи $\lambda = 440 \text{ нм}$. Спектральная зависимость показателя поглощения желтого вещества полагалась экспоненциально спадающей с длиной волны [24] при $k_y(390 \text{ нм})f_y = 0.2 \text{ м}^{-1}$. Из рис.3,а видно, что желтое вещество сильно ослабляет излучение в сине-фиолетовой области спектра. Чистая вода, как хорошо известно, слабо поглощает свет в сине – зеленой части спектра и относительно сильно в красной и инфракрасной областях. Она подавляет максимумы поглощения пигментов водорослей в красной области спектра (на рис.3 не показаны). Для эвтрофных вод содержание желтого вещества и хлорофилла довольно заметно коррелировано [9], так что увеличение концентрации одной компоненты обычно приводит к росту содержания другой составляющей. В отличие от этого, в олиготрофных средах указанные концентрации некоррелированы [9], и при цветении воды может

иметь место повышенное содержание хлорофилла *a*. Для этого случая на рис. 3,б представлен спектр поглощения морской воды. Данные приведены для ситуаций, когда учитывается и не учитывается локализация поглощения света в водорослях. Здесь и на всех последующих рисунках полагается, что $D = 1$ мм. Обращает внимание достаточно сильное влияние эффекта «сита» (штриховые кривые) на спектр поглощения в синей – зеленой области. Естественно, что этот эффект проявляется при достаточно больших концентрациях пигментов водорослей, когда их вклад в суммарное поглощение морской воды существенен. В диапазоне $\lambda = 420 - 450$ нм без учета эффекта «сита» ($C = 1$ в (1)) проявляется соответствующий максимум поглощения пигментов $k_p(\lambda)$. Если же в формулу (1) ввести поправочный коэффициент C по (5), то указанный максимум пропадает. Это связано с заметным уменьшением вклада K_a поглощения водорослями в суммарный показатель поглощения морской воды при учете эффекта «сита», т.к. здесь $C < 1$. Влияние концентрации F пигментов водорослей в воде на k при разных λ представлено на рис. 4. Данные получены с использованием значений показателей поглощения чистой воды и желтого вещества, приведенных на рис. 3,а. Чем больше F , тем сильнее проявляется локализация поглощения водорослями. Это, очевидно, связано с возрастанием их вклада K_a в показатель k морской воды. Естественно, что наиболее заметный эффект имеет место в максимуме поглощения пигментов при $\lambda = 440$ нм (кривая 2). Здесь показатель поглощения k воды при учете поправочного коэффициента C в (1) может уменьшиться в несколько раз по сравнению со случаем $C = 1$. Пересечение сплошных кривых 1 и 2 соответствует максимуму k , показанному на рис. 3,б. Штриховые кривые не пересекаются, т.к. в синей области спектра указанный максимум при учете эффекта «сита» пропадает, что отмечалось выше.

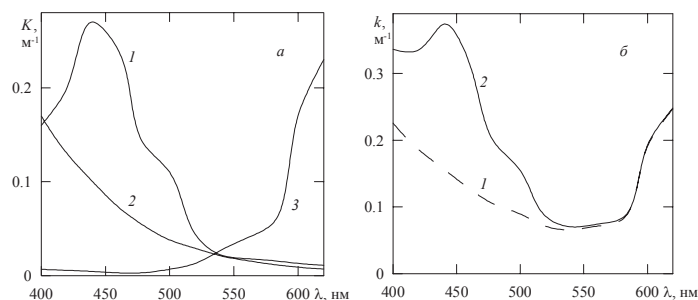


Рис.3. Спектральные зависимости (а) вклада K пигментов водорослей (кривая 1) при $F = 3$ мкг/м³, желтого вещества (2), чистой воды (3) и (б) показателя поглощения морской воды с учетом (1) и без учета эффекта «сита» (2)

Рис.5 иллюстрирует глубины проникновения света z_0 (а) в водную толщу и ее коэффициент диффузного отражения R (б) на разных длинах волн. Под z_0 понимается глубина, на которой плотность радиации уменьшается в $e = 2.7$ раз по сравнению с плотностью у поверхности. Данные рассчитаны для спектров поглощения элементарного объема, представленных на рис. 3,б, и при десятикратном уменьшении концентрации F пигментов. В малоугловом приближении [5]

$$z_0 = 1/(\sigma\delta + k). \quad (13)$$

Здесь σ – показатель рассеяния элементарного объема воды, а δ – доля света, рассеянная в обратную полусферу при направленном облучении.

Коэффициент диффузного отражения R вычислялся в приближении квазиоднократного рассеяния [25]. Оно включает малоугловое распространение света до точки рассеяния, однократное рассеяние в направлении «назад» и снова малоугловое распространение в обратном направлении. В этом приближении при освещении поверхности воды по нормали коэффициент яркости воды имеет вид [5, 25]

$$r(\mu) = \frac{\Lambda\delta}{2(\mu + 1)[1 - \Lambda(1 - \delta)]}, \quad (14)$$

где $\mu = \cos\theta$, θ – полярный угол выходящего излучения, $\Lambda = \sigma/(\sigma + k)$ – вероятность выживания фотона. В (14) индикатриса в направлении «назад» полагается диффузной и равной 2δ . Коэффициент отражения находим как интеграл

$$R = 2 \int_0^1 r(\mu) \mu d\mu \approx \frac{0.35\sigma\delta}{k + \sigma\delta}. \quad (15)$$

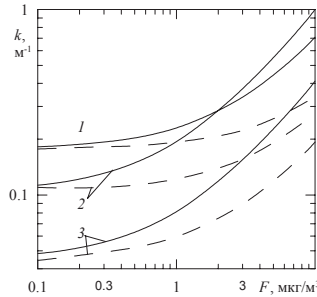


Рис.4. Зависимость показателя поглощения морской воды от концентрации F пигментов водорослей с учетом (штриховые кривые) и без учета эффекта «сита» (сплошные), $\lambda = 400$ (1), 440 (2) и 500 нм (3)

Отметим, что формула (15) дает результаты, близкие по порядку величины к соотношению [4]

$$R = \frac{0.5\sigma\delta}{k}, \quad (16)$$

полученному в двухпоточковом приближении, пренебрегая $\sigma\delta$ по сравнению с k .

Из рис. 5 видно, что эффект «сита» проявляется в видимой области в широком интервале значений F . В красном участке спектра его влияние подавляется высоким поглощением чистой воды. Рассматриваемый эффект приводит к увеличению глубины проникновения света в толщу воды и возрастанию ее коэффициента отражения R . Очевидно, что влияние локализованного поглощения тем сильнее, чем больше F .

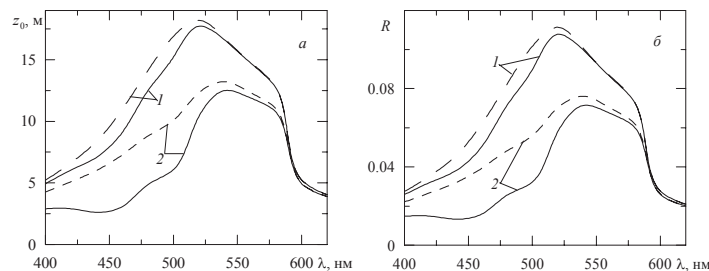


Рис.5. Спектры глубины проникновения света (а) и коэффициента диффузного отражения морской воды при освещении по нормали к поверхности (б) с учетом (штриховые кривые) и без учета эффекта сита (сплошные) при $F = 0.3$ мг/м³ (1) и 3 мг/м³ (2), $\sigma = 0.5$ м⁻¹, $\delta = 0.02$

Заключение

В работе аналитически проанализирован эффект «сита» в морской воде, содержащей водоросли. Показано, что его проявления зависят от концентрации пигментов (в основном, хлорофилла a) в единице объема среды и типичных размеров поглотителей. Это открывает принципиальную возможность решения обратной задачи по определению указанных концентрации и размеров с использованием характеристик рассеянного света. В заключение следует отметить, что в природе эффект «сита» может проявляться не только в изменении показателя поглощения, но и характеристик рассеяния – показателя и индикатрисы рассеяния. Однако данные вопросы требуют дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по договору №Ф07К-047 и Государственного фонда фундаментальных исследований Украины.

Литература

1. Ю.В. Владимиров, А.Я. Потапенко Физико-химические основы фотобиологических процессов. М.: Высшая школа, 1989. 202 с.

2. V.V. Barun, A.P. Ivanov Effect of localized absorption by cylindrical blood vessels on optical characteristics of biological tissue // Proc. 7th Conf. Electromagnetic and Light Scattering by Nonspherical Particles. Ed. Wriedt T. Bremen: Universitat Bremen, 2003. P. 41 – 44.
3. В.В. Барун, А.П. Иванов Оценка вклада локализованного поглощения света кровеносными сосудами в оптические свойства биологической ткани // Опт. спектр. 2004. Т. 96. №6. С. 1019 – 1024.
4. А.П. Иванов Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975. 504 с.
5. Э.П. Зеге, А.П. Иванов, И.Л. Кацев Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1975. 327 с.
6. А.П. Иванов Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1975. 592 с.
7. О.В. Копелевич Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. Ред. Мони́н А. С. М.: Наука, 1983. Т.1. С. 208 – 234.
8. О.В. Копелевич, К.С. Шифрин Современные представления об оптических свойствах морской воды // Оптика океана и атмосферы. М.: Наука, 1981. С. 4 – 55.
9. W. Verkruyse, G.W. Lucassen, J.F. de Boer et al. Modelling light distributions of homogeneous versus discrete absorbers in light irradiated turbid media // Phys. Med. Biol. 1997. V. 42. P. 51 – 65.
10. A. Talsma, B. Chance, R. Graaf Corrections for inhomogeneities in biological tissue caused by blood vessels // JOSA A. 2001. V. 18. No. 4. P. 932 – 939.
11. L.N.M. Duysens The flattening of the absorption spectrum of suspensions, as compared to that of solutions // Biochim. Biophys. Acta. 1956. V. 19. P. 1 – 12.
12. J.T.O. Kirk A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters. II. Spherical cells // New Phytol. 1975. V. 75. P. 21 – 36.
13. J.T.O. Kirk A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters. III. Cylindrical and spheroidal cells // New Phytol. 1976. V. 77. P. 341 – 358.
14. A. Morel, A. Bricaud Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton // Deep-Sea Res. 1981. V. 28. P. 1375 – 1393.
15. A. Morel, A. Bricaud Inherent optical properties of algal cells including picoplankton: theoretical and experimental results // Can. Bull. Fish Aquat. Sci. 1986. V. 214. P.521 – 529.
16. S. Enriquez Light absorption efficiency and the package effect in the leaves of seagrass *Thalassia testudinum* // Marine Ecology Progress Series. 2005. V. 289. P. 141 – 150.
17. H. Naardt, H. Maske Specific *in vivo* absorption coefficient of chlorophyll *a* at 675 nm // Limnol. Oceanogr. 1987. V. 32. P. 608 – 619.
18. О.И. Кобленц-Мишке, М.А. Семенова Пигменты фитопланктона мезотрофных и эвтрофных районов тропической Пацифики // Тр. Ин-та океанологии. 1975. Т. 102. С. 131 – 139.
19. О.Д. Бекасова, А.М. Цветкова, В.Б. Евстигнеев Об изменениях пигментной системы океанического фитопланктона // Гидрофизические и оптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. Ред. Бреховских Л. М., Шифрин К.С. М.: Наука, 1975. С. 235 – 242.
20. http://www.nowrap3.go.jp/jsr//eng/callender/sstdata_p02.html.
21. О.И. Кобленц-Мишке, В.И. Ведерников Первичная продукция // Биология океана. М.: Наука. 1977. Т. 2. С. 183 – 209.
22. S. Enriquez, S. Agusti, S.M. Duarte Light absorption by seagrass *Posidonia oceanica* leaves // Marine Ecology Progress Series. 1992. V. 86. P. 201 – 204.
23. V.V. Barun, A.P. Ivanov Effect of hemoglobin localization in erythrocytes on optical absorption by human blood // Proc. 10th Conf. Electromagnetic and Light scattering by Nonspherical Particles. Ed. Videen G., Mishchenko M., et al. Bodrum, Turkey: ICHMT, 2007. P. 5 – 8.
24. Н.Г. Ерлов Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 247 с.
25. I.L. Katsev, E.P. Zege, A.S. Prikhach, I.N. Polonsky Efficient technique to determine backscattered light power for various atmospheric and oceanic sounding and imaging systems // JOSA A. 1997. V. 14. No. 6. P. 1338 – 1346.

Фотостарение

Г.Ф. Пронченкова, С.А. Шишова

Саратовский государственный медицинский университет

Неизбежность биологического старения запрограммирована генетически: с момента рождения или даже до него начинают свой ход наши «биологические часы»). Разработаны многочисленные теории, трактующие механизмы биологического (иначе — хронологического) старения, которые, скорее всего, взаимно дополняют друг друга. Хотя о том, как именно стареет каждый орган и ткань, мы знаем немного. Лишь кожа, которая всегда на виду, предоставляет нам уникальный шанс воочию наблюдать за процессом и последствиями старения органа (рис. 1 - 3).