

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНССПЕКТРАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТА С ВОДНОЙ СРЕДОЙ С УЧЕТОМ ВОЛНЕНИЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

О. С. Ухинова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск

УДК 519.245

В работе проведены исследования влияния волнения водной поверхности на трансспектральные процессы (ТП) в водной среде при моделировании методом Монте — Карло. В качестве основной модели ТП была взята четырехкомпонентная модель ВЕО [3]. В качестве модели поверхности морского волнения была взята упрощенная модель Кокса-Манка [2]. Проведены вычисления спектрального состава восходящего потока излучения под границей разделения атмосфера-океан для различных начальных длин волн, различных углов падения и разных моделей границ.

Ключевые слова: статистическое моделирование, трансспектральные процессы, водная поверхность.

Введение

В данной статье с помощью численных экспериментов, проведенных с использованием моделей трансспектральных процессов анализируется влияние комбинационного (рамановского) рассеяния света на молекулах воды, а также флуоресценции хлорофилла (ХЛ) и растворенного органического вещества (РОВ) на спектральный состав света, выходящего из воды. Именно спектральный состав несет основную информацию об оптически активных компонентах (ОАК) природных вод. Исследуются спектральные вариации восходящей яркости, обусловленные отдельным и совместным влиянием упомянутых выше трансспектральных процессов при различных комбинациях ОАК, а именно ХЛ фитопланктона, РОВ и МВ. Также анализируется влияние волновой поверхности на результат моделирования. Модель волновой поверхности взята из работы Кокса — Манка [2].

1 Модель

1.1 Основные уравнения

В качестве основной модели была взята четырехкомпонентная модель ВЕО, подробно описанная в работе [4]. Рассмотрим слой $0 \leq z \leq H$ трехмерного пространства, заполненный рассеивающим и поглощающим свет веществом. Граница слоя $z = H$ освещается параллельным потоком фотонов I_0 в направлении ω_0 . Внутри рассматриваемого слоя расположена граница раздела двух сред, при взаимодействии с которой свет испытывает преломление или отражение. Эта граница представляет собой случайную (вследствие ветрового волнения) поверхность, составленную из набора случайных площадок, центры которых лежат в плоскости $z = h$, а нормали к площадкам s — случайные единичные векторы с плотностью распределения вероятности $p_s(s)$. При попадании на плоскость $z = 0$ свет испытывает отражение. Световой режим в плоскопараллельной системе водоем-атмосфера, освещенной параллельным потоком излучения, описывается известным

интегродифференциальным уравнением переноса с соответствующими краевыми условиями:

$$\begin{aligned}
 I(r, \omega) = & S(r - t_o \omega, \omega) \exp \left\{ - \int_0^{t_o} \sigma(r - t' \omega) dt' \right\} + \\
 & + \int_0^{t_o} dt \sigma_s(r - t \omega) \exp \left\{ - \int_0^t \sigma(r - t' \omega) dt' \right\} \times \\
 & \times \frac{1}{2\pi} \int_{\Omega} d\omega' g(r - t \omega, \mu) I(r - t \omega, \omega').
 \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $I(r, \omega)$ — интенсивность излучения в точке r в направлении ω , $\sigma(r)$ и $\sigma_s(r)$ — коэффициенты ослабления и рассеяния соответственно, $g(r, \mu)$ — индикатриса рассеяния с нормировкой $\int_{-1}^1 g(r, \mu) d\mu = 1$, t_o — расстояние от точки r до границы среды в направлении $-\omega$, $\mu = (\omega, \omega')$, Ω — множество всех направлений. Функция $S(r, \omega)$ определяется распределением источников и характером воздействия границ среды на излучение. В данной задаче функция имеет вид:

$$S(r, \omega) = \begin{cases} I_o \delta(\omega - \omega_o), & \omega \in \Omega_-, z = H; \\ R_h I(r, \omega), & \omega \in \Omega, z = h; \\ R_o I(r, \omega), & \omega \in \Omega_+, z = 0, \end{cases} \quad (2)$$

и

$$t_o = \begin{cases} (z - H)/(\omega, k), & z \in [h, H], \omega \in \Omega_-; \\ (z - h)/(\omega, k), & z \in [h, H], \omega \in \Omega_+; \\ (z - h)/(\omega, k), & z \in [0, h], \omega \in \Omega_-; \\ z/(\omega, k), & z \in [0, h], \omega \in \Omega_+. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $k = (0, 0, 1)$, $\Omega_+ = \omega : (\omega, k) \geq 0$, $\Omega_- = \omega : (\omega, k) \leq 0$, R_o — линейный интегральный оператор, описывающий закон отражения излучения плоскостью $z = 0$, интегральный оператор R_h описывает воздействие границы раздела вода-воздух на излучение. Будем предполагать, что плоскость $z = 0$ является диффузно отражающей с альбедо A , и свет, приходящий на дно водоема, отражается по закону Ламберта. Для описания воздействия морской поверхности на излучение примем модель, в которой отражение и преломление происходят по законам лучевой оптики на элементарной случайной площадке с нормалью s . В этом случае при попадании луча, имеющего направление ω , на поверхность в некоторой точке r доля излучения $I(r, \omega) \cdot R(\omega, s)$ зеркально отражается в направлении $\omega - 2(\omega, s)s$, а часть излучения $I(r, \omega) \cdot (1 - R(\omega, s))$ преломляется в направлении $\nu(\omega - \gamma s)$, где $R(\omega, s)$ — коэффициент отражения Френеля, $\gamma = (\omega, s) - \text{sign}(\omega, s) \sqrt{1/\nu^2 - 1 + (\omega, s)^2}$,

$$\nu = \begin{cases} 1/n, & (\omega, s) \leq 0, \\ n, & (\omega, s) > 0, \end{cases}$$

n — коэффициент преломления воды относительно воздуха. При моделировании наклона морской поверхности предполагалось, что плотность распределения уклонов равна

$$p_s(s) = p(z_u, z_c) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_c} \exp \left(-\frac{z_u^2}{2\sigma_u^2} - \frac{z_c^2}{2\sigma_c^2} \right),$$

где σ_u — дисперсия составляющей наклона вдоль скорости ветра, σ_c — дисперсия составляющей поперек скорости ветра, при этом, если скорость ветра равна W

$$\sigma_u^2 = 0,003 + 0,00185W \pm 0,0005$$

$$\sigma_c^2 = 0,001 + 0,00316W \pm 0,0005.$$

Т. е. составляющие уклонов независимы имеют нормальное распределение с дисперсией, зависящей от скорости приповерхностного ветра. Также предполагалось, что скорость ветра совпадает с осью x .

1.2 Особенности моделирования

Для учета влияния флуоресценции ОАК и комбинационного рассеяния воды рассмотрим следующие особенности моделирования, обоснования для которых приведены в работе [1]. Статистическое моделирование состоит в реализации цепи случайных событий. В каждом последовательном акте случайного взаимодействия фотона с дискретным центром среды (молекула, частица) его энергия может рассеяться или поглотиться. При этом возможна следующая вероятностная цепочка:

а) вероятность того, что фотон испытает акт рассеяния p_b

б) вероятность того, что фотон поглотится p_a

Для моделирования необходимы следующие спектральные оптические характеристики среды:

$\sigma(r, \lambda) = a(r, \lambda) + b(r, \lambda)$ — коэффициент ослабления среды,

$a(r, \lambda) = a_w(r, \lambda) + a_{chl}(r, \lambda) + a_{doc}(r, \lambda) + a_{sm}(r, \lambda) = \sum_{i=1}^4 a_i$ — коэффициент поглощения среды,

$b(r, \lambda) = b_w(r, \lambda) + b_{chl}(r, \lambda) + b_{doc}(r, \lambda) + b_{sm}(r, \lambda) = \sum_{i=1}^4 b_i$ — коэффициент рассеяния среды,

a_i и b_i — соответствующие коэффициенты поглощения и рассеяния i -й компоненты среды.

w — вода, chl — ХЛ (хлорофилл), doc — РОВ (растворимые органические вещества), sm — МВ (минеральные взвеси).

Вводя удельные коэффициенты поглощения и рассеяния a_i^* и b_i^* на длине волны для единичной концентрации i -й компоненты, итоговые свойства можно представить следующим образом:

$$a(r, \lambda) = a^*(r, \lambda) \cdot C, \quad b(r, \lambda) = b^*(r, \lambda) \cdot C,$$

$$a^*(r, \lambda) = [a_w(r, \lambda), a_{chl}^*(r, \lambda), a_{doc}^*(r, \lambda), a_{sm}^*(r, \lambda)]$$

$$b^*(r, \lambda) = [b_w(r, \lambda), b_{chl}^*(r, \lambda), b_{doc}^*(r, \lambda), b_{sm}^*(r, \lambda)]$$

$C = [1, C_{chl}, C_{doc}, C_{sm}]$ — концентрации соответствующих компонент.

Также при моделировании процесса флуоресценции понадобятся такие параметры как квантовые выходы флуоресценции ХЛ (η_{chl}) и РОВ (η_{doc}), параметры функции распределения Гаусса ($\sigma_{chl}, \sigma_{doc}$) с использованием которых аппроксимируется полоса излучения ХЛ и РОВ, а также значение длины волны максимума излучения.

При моделировании комбинационного рассеяния воды понадобится параметр $b_r(r, \lambda)$ — коэффициент рамановского рассеяния.

$$b_w(r, \lambda) = b_{el}(r, \lambda) + b_r(r, \lambda)$$

При моделировании первой фазы возможна следующая вероятностная цепочка:

а) вероятность того, что фотон испытает акт рассеяния равна $p_b(r, \lambda) = b(r, \lambda)/\sigma(r, \lambda)$

б) вероятность того, что произойдет комбинационное рассеяние воды $p_r(r, \lambda) = b_r(r, \lambda)/b(r, \lambda)$

в) вероятность того, что фотон поглотится равна $p_a(r, \lambda) = a(r, \lambda)/\sigma(r, \lambda)$

г) вероятность того, что фотон поглотится ХЛ равна $p_{a_{chl}}(r, \lambda) = a_{chl}(r, \lambda)/\sigma(r, \lambda)$

д) вероятность того, что фотон, поглощенный ХЛ, переизлучится равна η_{chl}

е) вероятность того, что фотон поглотится РОВ равна $p_{a_{doc}}(r, \lambda) = a_{doc}(r, \lambda)/\sigma(r, \lambda)$

ж) вероятность того, что фотон, поглощенный РОВ переизлучится равна η_{doc} .

При реализации событий б), д) или ж) процесс случайного блуждания на длине волны λ останавливается и начинается процесс блуждания фотона с меньшей энергией на длине волны $\lambda' > \lambda$. Новая длина волны выбирается согласно функции распределения Гаусса с соответствующими параметрами для ХЛ и РОВ, для рамановского рассеяния функция распределения по частотам также аппроксимируется функцией Гаусса с максимумом интенсивности $\lambda_{max} = \frac{\lambda}{-3357 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda + 1}$.

Следующей фазой является моделирование перехода $(r, w) \rightarrow (r', w')$. Т.е. нахождение нового направления, длины свободного пробега и пересчет координат. При моделировании косинуса угла рассеяния индикатрисы выбирались следующим образом: для флуоресцентного излучения предполагалось, что угловое распределение светового поля под поверхностью воды изотропно, в противоположном случае в качестве индикатрисы

выбиралась реальная заданная таблично кусочно-постоянная функция, являющаяся средневзвешанной индикатрисой, зависящая от длины волны. Водное пространство предполагалось состоящим из нескольких однородных параллельных горизонтальных слоев заданной толщины, в каждом из которых все оптические параметры среды постоянны. В связи с этим предположением и вычислялась длина свободного пробега.

Для учета влияния атмосферы использовалась трехслойная модель безоблачной стандартной атмосферы, предложенная Комиссией по радиации Международной ассоциации метеорологии и физики атмосферы [6].

2 Численный метод

В настоящем исследовании во всех численных экспериментах в качестве основной была использована модель ВЕО, подробное описание приведено в [3]. Это четырехкомпонентная модель, включающая в себя спектральные значения сечений поглощения и обратного рассеяния для самой воды, фитопланктона ХЛ, МВ и РОВ в спектральном диапазоне 410–690 нм с шагом $\Delta\lambda=20$ нм. С использованием результатов работы [1] спектральный диапазон был расширен в коротковолновую область до 310 нм. Отсюда же была взята оценка величины $b_r(\lambda) = (2.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ при $\lambda=488$ нм для моделирования рамановского рассеяния воды, спектральная зависимость $b_r(\lambda)$ от длины волны пропорциональна λ^{-5} . Включение в рассмотрение коротковолнового диапазона спектра падающего потока обусловлено учетом рамановского рассеяния воды, которое сдвигает спектр приблизительно на ~ 75 нм. При моделировании флуоресценции в свете совокупных изученных данных полоса испускания была представлена функцией Гаусса с центром (длиной волны максимума) при 685 нм для хлорофилла и 490 нм для РОВ с полушириной $\sigma_{chl} = 25$ и $\sigma_{doc} = 100$ соответственно. Квантовый выход для ХЛ в данных вычислениях принимался равным $\eta_{chl} = 0,03$, хотя, как известно, он зависит от состава фитопланктона. При нахождении значения квантового выхода для РОВ η_{doc} использовались данные таблицы:

λ , нм	310	330	350	370	390	410	430	450	470
$\eta_{doc} \times 10^4$	125	175	230	245	270	260	230	210	0

Таблица 1: Квантовый выход РОВ

3 Результаты

На рис. 1 представлен спектральный состав восходящего излучения при $z = h_-$, вычисленный на одинаковом количестве траекторий $3 \cdot 10^6$, для плоского случая (1) и для случая с учетом волнения при скорости ветра 7 м/с (2), для начальной длины волны $\lambda=450$ нм и начальном угле падения 5° над горизонтом и концентрации РОВ 5 мгС/л и концентрации ХЛ равной нулю.

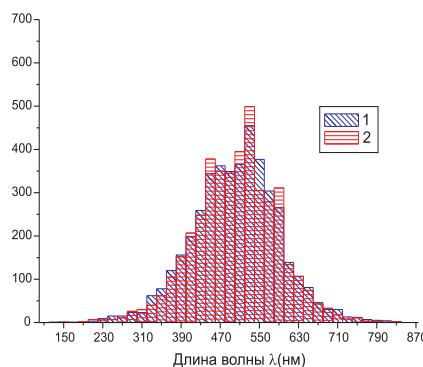


Рис. 1: Спектральный состав восходящего излучения, $\lambda_0=450$ нм, $C_{doc}=5$ мгС/л, $C_{chl}=0$

На рис. 2 представлен спектральный состав восходящего излучения при $z = h_-$, вычисленный на одинаковом количестве траекторий $3 \cdot 10^6$, для начальной длины волны $\lambda=450$ нм, начальном угле падения 5° над горизонтом (слева) и начальном угле падения 30° над горизонтом (справа), концентрации РОВ 5 мгС/л и концентрации ХЛ равной 2 мкг/л.

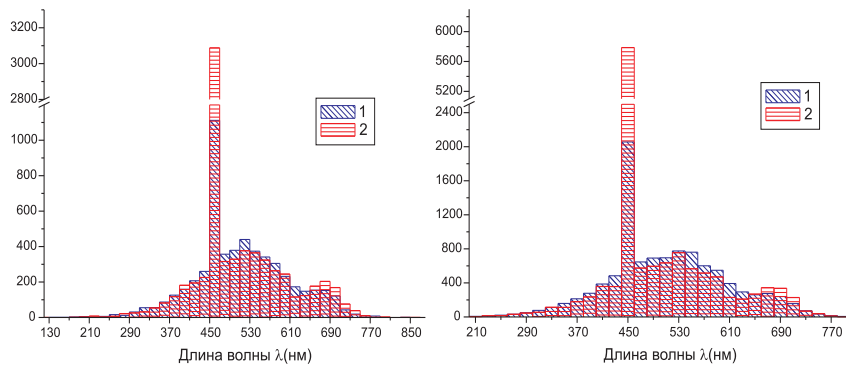


Рис. 2: Спектральный состав восходящего излучения, $\lambda_o=450$ нм, $C_{doc}=5$ мгС/л, $C_{chl}=2$ мкг/л

На рис. 3 представлен спектральный состав восходящего излучения при $z = h_-$, вычисленный на одинаковом количестве траекторий $3 \cdot 10^6$, для начальной длины волны $\lambda=390$ нм, начальном угле падения 5° над горизонтом (слева) и начальном угле падения 30° над горизонтом (справа), концентрации РОВ 5 мгС/л и концентрацией ХЛ равной 2 мкг/л.

Номера функций соответствуют соответственно плоскому случаю (1) и с учетом волнения водной поверхности (2).

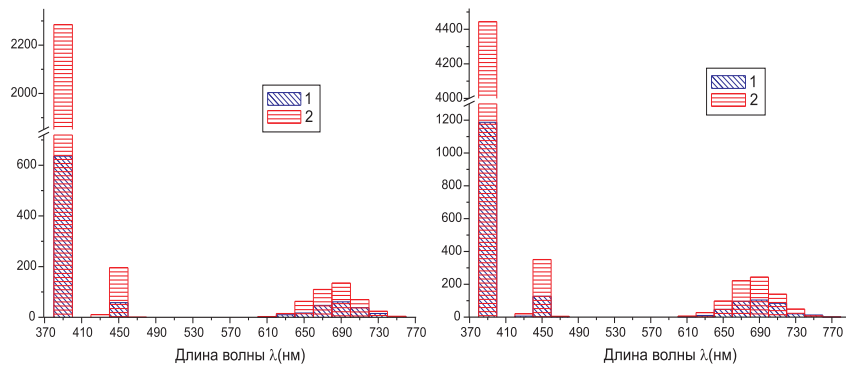


Рис. 3: Спектральный состав восходящего излучения, $\lambda_o=390$ нм, $C_{doc}=5$ мгС/л, $C_{chl}=2$ мкг/л

На рис. 4 представлены графики коэффициента диффузии водного слоя $R(\lambda, h_-)$, вычисленного непосредственно под границей раздела двух сред, который по определению равен отношению восходящей освещенности $E_{up}(\lambda, h_-)$ к нисходящей $E_d(\lambda, h_-)$. График (а) соответствует случаю $C_{chl} = 0$ мкг/л, а графики (b) и (c) случаю $C_{chl} = 2$ мкг/л, во всех случаях $C_{doc} = 5$ мгС/л, случаи (а) и (b) соответствуют углу падения света 5° над горизонтом, а случай (c) углу падения света 30° над горизонтом. Номера функций также соответствуют плоскому случаю (2) и с учетом волнения (1), графики представлены в логарифмическом масштабе.

Рисунок доказывает, что поскольку графики (b) и (c) совпадают, то $R(\lambda, z)$ не зависит от начального угла падения. График (а) показывает, что при наличии в воде только РОВ (без ХЛ) различие моделей волновой поверхности сказывается слабее.

Заключение

В работе получены следующие результаты. При моделировании имитации поверхности морского волнения очень важен выбор модели. Важным параметром при выборе модели является параметр, называющийся фактором увеличения поглощенного излучения $I_{abs} = (1 - \alpha)/(1 - R(\beta))$, где α — альбеда случайной поверхности, равное среднему коэффициенту отражения света от поверхности, а $R(\beta)$ — коэффициент Френеля для плоского слоя при заданной высоте Солнца над горизонтом β . В таблице 2 приведены результаты расчетов фактора увеличения поглощенного излучения для трех различных моделей:

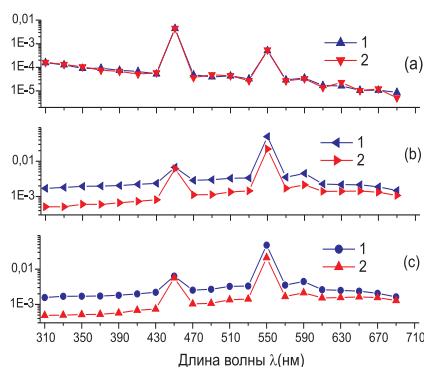


Рис. 4: Коэффициент диффузии, $C_{doc}=5$ мгС/л, (а) $C_{chl} = 0$, (b) и (c) $C_{chl}=2$ мкг/л

- 1) модель, предложенная Каргиным и Пригариным для скорости ветра 7 м/с [5]
- 2) упрощенная фацетная модель Кокса — Манка для скорости ветра 7 м/с [2]
- 3) модель синусовой волны $z = A \cdot \sin kx$, где $k = 2\pi/\lambda$ (λ — длина волны) с крутизной волны $4A/\lambda = 0.1$.

Высота Солнца	модель 1	модель 2	модель 3
5°	1,5255	1,6164	1,8851
10°	1,1427	1,0461	1,2402
15°	1,0496	0,9428	1,0735
20°	1,0194	0,9436	1,0217
30°	1,0041	0,9776	1,0007
40°	1,0013	0,9920	0,9993
50°	1,0007	0,9970	0,9997
60°	1,0006	0,9989	1,0001

Таблица 2: Фактор увеличения поглощенного излучения.

Из таблицы следует очевидный вывод, что в этом смысле свойства моделей довольно отличаются. Стоит отметить, что в модели 1 и модели 3 учитывается возможное неоднократное переотражение света от поверхности, а в модели 2 нет. При неоднократном переотражении света средний коэффициент отражения вычислялся в виде произведения коэффициентов отражения при каждом столкновении $\alpha = R_1(s_1) \cdot \dots \cdot R_k(s_k)$, где $R_i(s_i)$ — коэффициент Френеля в i -й точке столкновения с поверхностью, зависящий от нормали к поверхности в данной точке s_i .

Список литературы

- [1] Поздняков Д.В., Лясковский А.В., Грассл Х., Петерсон Л. Численное моделирование трансспектральных процессов (ТП) взаимодействия света с водной средой. Воздействие ТП на спектральный состав восходящего излучения. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2000, №5, с. 3–15.
- [2] Cox C., Munk W. Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter// Journal of the Optical Society of America. 1954. V. 44, Num. 11, P. 838–850.
- [3] Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В., Исаков В.Ю. Гидрооптические и радиационные эксперименты на озерах. Л.: Наука, 1990 С.115.
- [4] Кондратьев К.Я., Кантер Р.Р., Каргин Б.А., Поздняков Д.В. Численное моделирование в задачах оптического дистанционного зондирования внутренних водоемов. Л.: Наука, 1987 С. 62.
- [5] Кантер Р.Р., Пригарин С.М. Численное моделирование морского ветрового волнения для исследования поля отраженного оптического излучения. ВЦ СО АН СССР, Новосибирск, 1989 С. 25.
- [6] McClarchey R.E., Bolle H.J., Kondratyev K.Ya. Report of the IAMAP RC WG on standart atmosphere. Boulder (Colorado), 1982 p.20.

*Ольга Сергеевна Ухинова — к.ф.-м.н., науч.сотр. Института
вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
e-mail: olsu@osmf.sscc.ru.*

Дата поступления — 31 мая 2017 г.