

РЕШЕНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ — КАРЛО ЗАДАЧ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОКЕАНА

А. Б. Каргин¹, Б. А. Каргин^{1,2}, С. М. Пригарин^{1,2}

¹ *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск*

² *Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск*

УДК 551.52+519.245

Приведено описание численной статистической модели переноса оптического излучения в приближении лучевой оптики в системе океан — атмосфера для полной и упрощённой “фацетной” моделей случайной взволнованной поверхности океана. Работа выполнена в связи с обоснованием аналоговых и весовых алгоритмов в статистическом моделировании прямых задач пассивного и активного аэрокосмического зондирования океана. Рассмотренные модели, наряду с методом Монте — Карло, могут быть полезны для анализа поля оптического излучения также и другими численными или аналитическими методами, имеющими дело с уравнением переноса. Приведено несколько примеров результатов численных экспериментов.

Ключевые слова: метод Монте — Карло, уравнение переноса, оптика атмосферы и океана, дистанционное оптическое зондирование океана.

Введение

Поле оптического излучения системы океан — атмосфера в значительной мере формируется под воздействием взволнованной морской поверхности, отражающей и преломляющей приходящее электромагнитное излучение. Характерная особенность этого воздействия обусловлена случайным характером ветрового волнения морской поверхности. В силу этого строгое решение подавляющего числа прямых и обратных задач оптики системы океан — атмосфера возможно лишь в статистической формулировке. Математическая суть таких задач заключается в вычислении соответствующих функционалов от решения уравнения переноса излучения, заданных на случайном поле, каковым является взволнованная морская поверхность. Метод Монте — Карло впервые был применен к расчету переноса солнечной радиации в системе атмосфера-океан, по-видимому, в [1], где для описания взволнованной поверхности моря принята так называемая плоская “фацетная” модель, в которой граница раздела вода-воздух представляет собой случайную поверхность, составленную из набора элементарных площадок, центры которых лежат в одной плоскости, а нормали к ним распределены с заданной одноточечной функцией распределения. Расчеты в [1] были выполнены на основе прямого моделирования процесса переноса излучения. Результаты расчетов в [1] получены, таким образом, в пренебрежении эффектами затенения и переотражения излучения элементами поверхности. В работе [2] статистические характеристики взволнованной морской поверхности уже рассмотрены для более адекватной спектральной модели ветрового волнения, которая позволяет методом Монте — Карло учесть также и эффекты затенения и переотражения излучения элементами поверхности. В [3] выписано интегральное стационарное уравнение переноса излучения в среде со случайно-неоднородной преломляющей границей и предложен весовой алгоритм решения этого уравнения методом Монте — Карло. Настоящая работа посвящена усовершенствованию и практической реализации этого алгоритма в связи с решением прикладных задач пассивного и активного аэрокосмического зондирования океана в рамках ряда целевых грантов.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 15-01-00894 и 16-01-00145) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.33П.

1 Постановка задачи

Рассмотрим слой $0 \leq z \leq H$ трехмерного пространства, заполненный рассеивающим и поглощающим оптическое излучение веществом. Введем обозначения: $r_{\perp} = (x, y)$ — проекция радиус-вектора $r = (x, y, z)$ на горизонтальную плоскость XOY ; $\omega = (a, b, c)$ — единичный вектор направления с направляющими косинусами a , b и c ; Ω — множество всех направлений с $c \in [-1, 1]$; $\Omega_+ = \{\omega : (\omega, k) \geq 0\}$, $\Omega_- = \{\omega : (\omega, k) < 0\}$, $k = (0, 0, 1)$. Обозначим через $\varsigma(r_{\perp})$ случайную функцию, описывающую отклонения взволнованной морской поверхности S относительно среднего уровня $z = h$ в зависимости от горизонтальных координат $r_{\perp} = (x, y)$, так что выражение $z = h + \varsigma(x, y)$ является уравнением поверхности S . Относительно функции $\varsigma(r_{\perp})$ будем предполагать, что она однозначна и непрерывно дифференцируема по координатам x, y . В дальнейшем функция $\varsigma(r_{\perp})$ будет рассматриваться как одна из реализаций взволнованной морской поверхности, которая, очевидно, зависит от скорости приповерхностного ветра v . Плоскости $z = 0$ и $z = H$ совпадают с дном моря и верхней границей атмосферы соответственно. При попадании на плоскость $z = 0$ излучение испытывает диффузное (ламбертовское) отражение, которое будем характеризовать альбедо $A(r_{\perp})$. Попадая на поверхность раздела двух сред S излучение испытывает зеркальное отражение и преломление по закону Френеля с коэффициентом преломления воды относительно воздуха n . Обозначим через X фазовое пространство координат, направлений и времени: $X = R \times \Omega \times T = \{x = (r, \omega, t) : x, y \in (-\infty, +\infty), z \in [0, H]; \omega \in \Omega; t \in [0, T]; dx = dr d\omega dt\}$. Определим в этом пространстве функцию $f(x)$, являющуюся плотностью столкновений квантов излучения в рассеивающей и поглощающей среде и удовлетворяющую интегральному уравнению переноса

$$f(x) = \int_X k(x', x) f(x') dx' + \psi(x) \quad \text{или} \quad f = Kf + \psi, \quad (1)$$

где $\psi(x)$ — плотность первых столкновений. Обозначим через $I_{\varphi}(\varsigma)$ некоторый линейный функционал от решения уравнения (1) для заданной реализации случайной поверхности $\varsigma(r_{\perp})$: $I_{\varphi}(\varsigma) = (f(x|\varsigma), \varphi(x))$, где $\varphi(x) \geq 0$. Задача состоит в вычислении среднего по реализациям $\varsigma(r_{\perp})$ значения функционала $I_{\varphi}(\varsigma)$: $\bar{I}_{\varphi} = \langle I_{\varphi}(\varsigma) \rangle = \int [\int_X f(x|\varsigma) \varphi(x) dx] dP(\varsigma)$. Для завершения постановки задачи необходимо к уже названным входным параметрам h, H, n, v и $A(r_{\perp})$ добавить оптические характеристики рассеивающей среды $\sum(r)$ и $\sum_s(r)$ — пространственные распределения соответственно коэффициентов ослабления и рассеяния излучения, $g(r, \mu)$ — индикатрису рассеяния ($\mu = (\omega', \omega) \in [-1, 1]$) и определить оператор, описывающий в приближении лучевой оптики локальное воздействие взволнованной поверхности океана на излучение

$$\begin{aligned} I(r, \omega)|_{r \in S} = & \int_{\Omega} R(\omega', s(r_{\perp})) I((r_{\perp}, h + \varsigma(r_{\perp})), \omega') \delta(\omega' - \omega_{refl}(\omega, s(r_{\perp}))) d\omega' - \\ & - \frac{1}{n^2} \int_{\Omega} (1 - R(\omega', s(r_{\perp}))) I((r_{\perp}, h + \varsigma(r_{\perp})), \omega') \delta(\omega' - \omega_{refr}(\omega, s(r_{\perp}))) d\omega', \end{aligned} \quad (2)$$

где ω' — направление падения луча на поверхность S , $R(\omega, s)$ — коэффициент отражения Френеля, $s(r_{\perp}) = (k - e(r_{\perp}))/\sqrt{1 + |e(r_{\perp})|^2}$ — внешняя нормаль к поверхности S в точке $r = (r_{\perp}, h + \varsigma(r_{\perp}))$, $e(r_{\perp}) = \nabla_r \varsigma(r_{\perp})$, $\omega_{refl}(\omega, s) = \omega - 2(\omega, s)s$, $\omega_{refr}(\omega, s) = \gamma(\omega + \beta s)$, $\beta = (\omega', s) - \text{sign}(\omega', s) \sqrt{n^2 - 1 + (\omega', s)^2}$, $\gamma = \begin{cases} 1/n, & (\omega', s) \leq 0, \\ n, & (\omega', s) > 0. \end{cases}$

Аббревиатуры *refl* и *refr* означают соответственно отражение и преломление. В силу закона полного внутреннего отражения при $0 \leq (\omega', s) \leq \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n}$ полагаем $R(\omega', s) \equiv 1$.

2 Статистические модели радиационного поля и взволнованной морской поверхности

В [3] были получены точные выражения для ядра $k(x', x)$ уравнения (1), соответствующие стационарной задаче переноса оптического излучения в системе океан — атмосфера со случайно-неоднородной преломляющей и отражающей излучение поверхностью океана в приближении лучевой оптики в случае освещения системы бесконечно широким потоком солнечного излучения. Стационарный вариант уравнения переноса соответствует задаче пассивного оптического зондирования системы океан — атмосфера. В случае решения задачи активного лазерного зондирования системы океан — атмосфера нетрудно выписать выражение для ядра уравнения (1), соответствующее нестационарной постановке (см., например, [4]). Интегральное уравнение (1) с ядром из работы [3] и соотношением (2) полностью моделирует поле стационарного оптического

излучения в плоской системе океан — атмосфера с учетом всех оптических явлений, связанных с наличием случайно-неоднородной умеренно взволнованной поверхности океана — отражения, преломления, переотражения, затенения одних элементов поверхности другими, полного внутреннего отражения излучения под поверхностью океана. Точность данной модели ограничена только точностью задания входных параметров задачи — оптических характеристик среды и точностью статистического описания случайно-неоднородной поверхности океана. В теоретических работах, посвященных исследованию статистических свойств ветрового волнения морской поверхности, его, как правило, описывают либо в рамках упомянутой “фацетной” модели, либо однородным гауссовым случайным полем возвышений относительно среднего уровня. В первом случае поверхность раздела S представляет собой набор элементарных площадок с центрами в плоскости $z = h$, а внешние нормали к площадкам являются взаимонезависимыми единичными векторами $n = (n_x, n_y, n_z)$, плотность распределения которых к поверхности S определяется двумерной гауссовой плотностью распределения уклонов элементарных площадок с параметрами, зависящими от скорости ветра над поверхностью океана:

$$p(z_x, z_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x(v)\sigma_y(v)} \exp\left(-\left(\frac{z_x}{\sigma_x(v)}\right)^2 - \left(\frac{z_y}{\sigma_y(v)}\right)^2\right),$$

$$n_x = \frac{-z_x}{\sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}}, \quad n_y = \frac{-z_y}{\sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}}, \quad n_z = \frac{1}{\sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}},$$

v — скорость ветра. Во втором случае в дискретных моделях (например, в модели [3]) случайная поверхность задается совместной плотностью распределения возвышений $P_\zeta(\varsigma_1, \dots, \varsigma_m)$, $\varsigma_1 = \varsigma(r_\perp^{(1)}), \dots, \varsigma_m = \varsigma(r_\perp^{(m)})$, $m = 1, 2, \dots$, которая определяется ковариационной матрицей $\{K_{\zeta,ij}\sigma_\zeta^2\}$, $K_{\zeta,ij} = K_\zeta(\Delta r_{ij})$ — корреляционная функция возвышений, $\Delta r_{ij} = |r_\perp^{(i)} - r_\perp^{(j)}|$, σ_ζ^2 — дисперсия уклонения точек поверхности относительно среднего уровня. Таким образом, нормальное случайное поле возвышений полностью определяется корреляционной функцией $K_\zeta(\Delta r)$. В прикладных расчетах в качестве функции K_ζ часто используют функции $\exp\{-(\Delta r/\rho)^2\}$ и $\exp\{-(\Delta r/\rho)^2\} \cos(v\Delta r)$, где параметры ρ и v в совокупности с σ_ζ определяют балл и форму волнения. Для моделирования непрерывных реализаций случайной поверхности в большинстве случаев применяются спектральные модели, например, модели, определяемые “частотным” и “угловым” спектрами (см. [2]). В настоящих расчётах при моделировании случайных реализаций взволнованной поверхности океана использовалась приближённая модель

$$\zeta(x, y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}(r_{ij} \cos(x\rho_i \cos \theta_j + y\rho_i \sin \theta_j + \phi_{ij}) + r'_{ij} \cos(x\rho_i \cos \theta_j - y\rho_i \sin \theta_j + \phi'_{ij})). \quad (3)$$

Здесь ρ_i — случайные величины, распределённые с плотностью, пропорциональной

$$\Psi_\rho(\rho) = 0.5(g/\rho)^{1/2} S(\sqrt{g\rho}) \quad (4)$$

в соответствующих множествах A_i , $A_i = [\rho^*(i-1)/(m-1), \rho^*i/(m-1))$, $i = 1, \dots, m-1$, $A_m = [\rho^*, \infty)$, θ_j — случайные величины, распределённые в интервалах $B_j = [\pi(j-1)/2n, \pi j/2n]$ с плотностью, пропорциональной $Q = 2 \cos^2 \theta / \pi$, $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$, r_{ij} и r'_{ij} — случайные величины с распределением Рэлея, g — ускорение свободного падения, ϕ_{ij} и ϕ'_{ij} равномерно распределены на отрезке $[0, 2\pi]$.

$$a_{ij}^2 = \frac{2}{\pi} \int_{A_i} \int_{B_j} \cos^2 \theta \Psi_\rho(\rho) d\theta d\rho. \quad (5)$$

Функция $S()$ в формуле (4) представляет собой “частотный” спектр (см. [2]). Пример реализации взволнованной поверхности океана представлен на рис. 1.

При сильном волнении на поверхности океана возникает пена, диффузно отражающая излучение. Для учета пены в данной модели введем в рассмотрение величину $P(v)$, представляющую собой долю единицы водной поверхности, покрытой пеной в зависимости от скорости приповерхностного ветра v , а также альбедо пены A_f . Не представляет принципиальных трудностей наряду с пеной учет так называемых барашков, появляющихся на поверхности при сильном ветровом волнении.

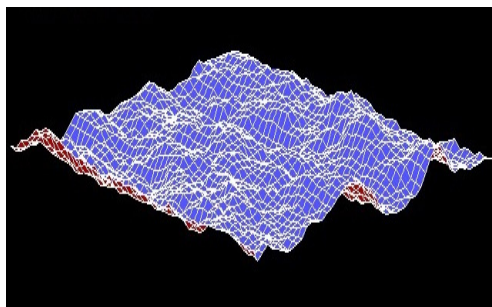


Рис. 1: Случайная реализация взволнованной поверхности океана

3 Некоторые результаты численного моделирования

В данных расчетах использованы алгоритмы метода Монте — Карло, подробное изложение которых для расчета поля интенсивности излучения в системе океан — атмосфера дано в [3, 4]. Отметим только, что в задаче пассивного зондирования были применены “локальная оценка по направлениям” и метод “коррелированной выборки” [4], а в задаче лазерного аэрокосмического зондирования использована модифицированная “локальная оценка” [6], учитывающая изменение интенсивности излучения, рассеянного толщей воды, после выхода из-под поверхности в результате преломления морской поверхностью. Данная локальная оценка позволяет выделить сигнал, пришедший с конкретной глубины, из общей интегральной по глубине информации о поле излучения, отраженного всей толщей воды. Это, в отличие от пассивных методов оптического зондирования океана, позволяет исследовать глубинную структуру тех или иных параметров океана. Указанные алгоритмы позволяют для заданного значения высоты Солнца Θ в задаче пассивного зондирования и заданных параметров лидара аэрокосмического базирования вычислять интенсивность $I(\theta)$ отраженного системой океан — атмосфера излучения на любой высоте над поверхностью океана одновременно для нескольких длин волн излучения λ , нескольких направлений визирования, нескольких значений v и различных концентраций гидрозоля, хлорофилла и желтого вещества в морской воде. Представленные ниже результаты получены со среднеквадратической погрешностью не более 5%. На рис. 2 приведены результаты расчетов интенсивности $I(\theta)$ наблюдаемого непосредственно над поверхностью океана излучения с длиной волны $\lambda = 0.5$ мкм, отраженного верхним слоем океана, в зависимости от угла наблюдения в плоскости солнечного вертикала и скорости приповерхностного ветра v при наличии и отсутствии пены. Относительное покрытие морской поверхности пеной $P(v)$ в зависимости от скорости ветра определялось из регрессионного соотношения $P(v) = 0.009v^3 - 0.3296v^2 + 4.5490v - 21.33$ ([7], стр. 68).

Для дисперсий уклонений точек морской поверхности относительно среднего уровня вдоль осей ОХ и ОУ были приняты значения $\sigma_x^2 = 3.16 \cdot 10^{-3}v$ и $\sigma_y^2 = 0.003 + 1.92 \cdot 10^{-3}v$, v — скорость ветра в м/с. Ось ОХ направлена вдоль направления ветра. Высотный ход аэрозольного и молекулярного рассеяния и поглощения излучения в атмосфере взят из модели [5]. Индикатриса аэрозольного рассеяния вычислена по формулам теории Ми для сферических частиц с комплексным показателем преломления $1.55 - 0.01i$. Все значения $I(\theta)$ приведены в относительных единицах. За единицу принято среднее значение интенсивности излучения, регистрируемого в интервале направлений, составляющих угол от 1° до 2° с направлением в зенит при скорости ветра $v = 0$ (штиль). Заметим, что представленные на рис. 2 кривые несут информацию о состоянии поверхностного волнения, но являются помехой (фоном) при активном дистанционном исследовании глубинной структуры океана.

На рис. 3 представлены результаты расчетов интенсивности отраженного верхним слоем океана солнечного излучения (зенитное расстояние 30°) на длине волны $\lambda = 0.5$ мкм, регистрируемого угловым приёмником, расположенным на борту низколетящего (высота 400 м) самолёта, в зависимости от угла раствора приёмника. Синяя кривая соответствует направлению ветра в плоскости солнечного вертикала, красная кривая соответствует перпендикулярному направлению. Скорость ветра — 7 м/с. Результаты приведены в относительных единицах. За единицу принято значение интенсивности излучения при растворе приёмника 60 мин на красной кривой.

На рис. 4 представлены результаты расчетов интенсивности солнечного излучения, регистрируемого узкоугольным приёмником (раствор приёмника $1'$), расположенным на спутнике на высоте 850 км, в зависимости от скорости приповерхностного ветра. Зенитное расстояние 30° . Результаты приведены отдельно для

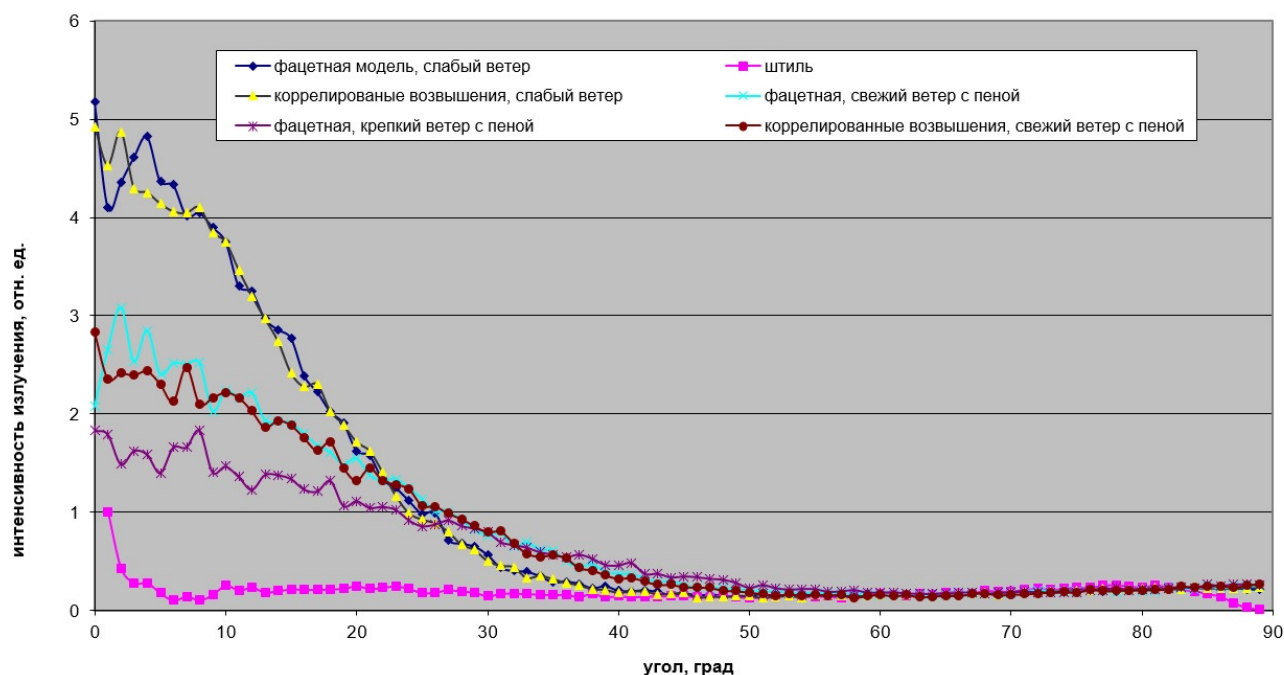


Рис. 2: Угловое распределение средней интенсивности излучения, отраженного верхним слоем океана в атмосферу в зависимости от скорости ветра для двух моделей ветрового волнения с учетом и без учета пены: слабый ветер — 5 м/с, свежий ветер — 10 м/с, крепкий ветер — 15 м/с, штиль — ветровое волнение отсутствует.

излучения, отражённого атмосферой (дымка), отражённого поверхностью океана и диффузного излучения, отражённого верхним слоем океана.

На рис. 5 представлены результаты расчётов интенсивности излучения, отражённого системой океан — атмосфера и зарегистрированного точечным приёмником с апертурой 1' на спутнике в зависимости от угла склонения Солнца для двух направлений движения ветра: синяя кривая — ветер в плоскости солнечного вертикала, красная кривая соответствует направлению ветра перпендикулярно плоскости солнечного вертикала.

В заключение отметим, что представленные на рис. 2–5 результаты расчётов свидетельствуют о весьма высокой чувствительности интенсивности излучения, регистрируемого как в самолётном, так и в спутниковом вариантах, к вариациям скорости приповерхностного ветра, а также к геометрическим условиям наблюдений. Это показывает, что указанные факторы необходимо принимать во внимание при решении практических задач аэрокосмического оптического зондирования верхнего слоя океана.

Список литературы

- [1] Plass G.N., Kattawar G.W. “Radiative Transfer in an Atmosphere-Ocean System”, Appl. Opt., Vol. 8, No. 2, pp. 455–466, 1969.
- [2] Kargin B.A., Prigarin S.M. “Numerical modeling of random fields in the problems of atmosphere-ocean optics”, Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, Vol. 11, No. 4, pp. 323–341, 1996.
- [3] Kargin B.A., Rakimgulov K.B. “A weighting Monte Carlo method for modelling the optical radiation field in the ocean-atmosphere system”, Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, Vol. 7, No. 3, pp. 221–240, 1992.
- [4] Marchuk G.I., Mikhailov G.A., Nazaraliev M.A., Darbinian R.A., Kargin B.A., Elepov B.S., Monte Carlo methods in atmospheric optics, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, p.286, 1980.
- [5] Elterman L. UV, Visible and IR attenuation for altitudes to 50 km, Bedford, Massachussets: Air Force Cambridge Research Laboratories, Report AFCRL-68-0153, p. 50, 1968.

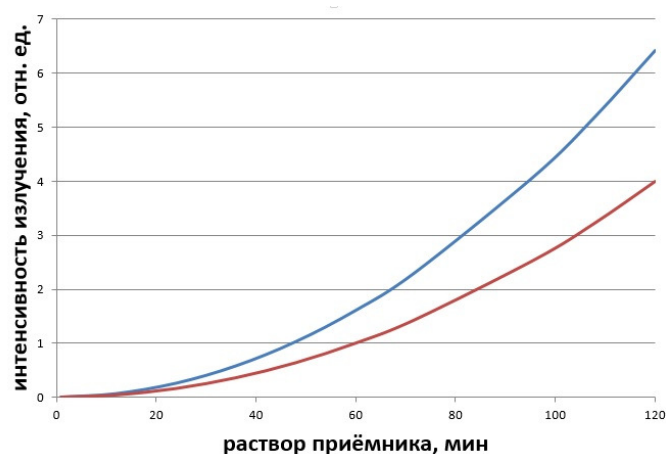


Рис. 3: Интенсивность отражённого излучения в зависимости от угла раствора приёмника («самолётный» вариант).

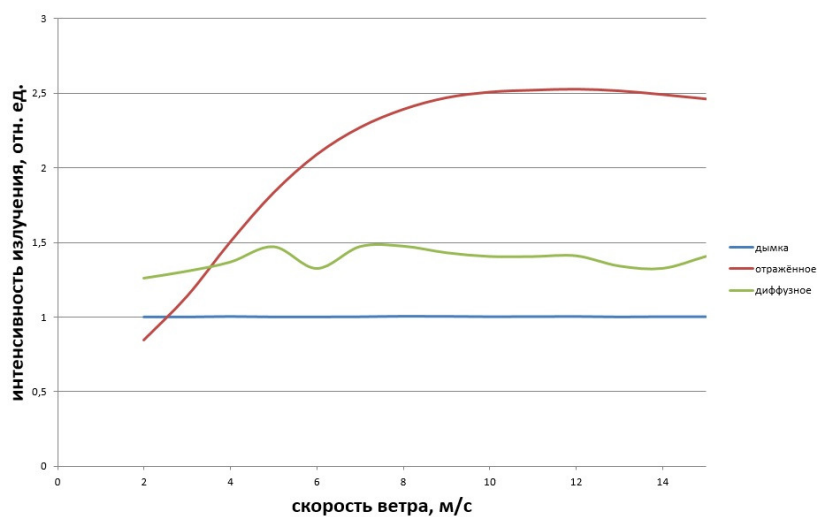


Рис. 4: Интенсивность излучения в зависимости от скорости ветра («спутниковый» вариант).

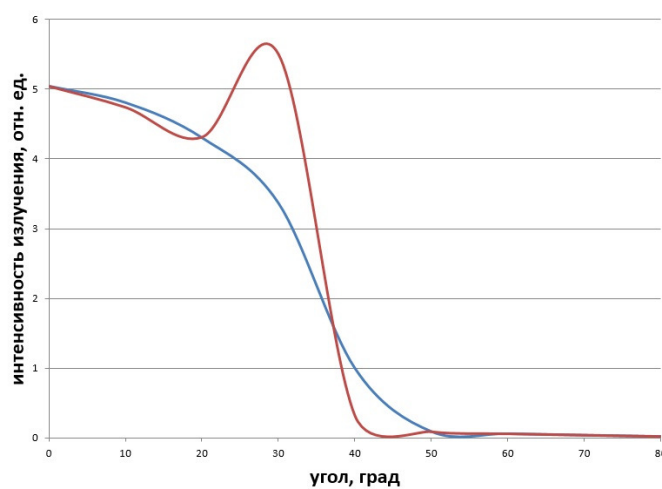


Рис. 5: Интенсивность излучения в зависимости от угла склонения Солнца («спутниковый вариант»).

- [6] Rakingulov K.B., Ukhinov S.A. “Local estimates in Monte Carlo method for the ocean-atmosphere system with a random interface”, Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, Vol. 9, No. 6, pp. 547–564, 1994.
- [7] Бортковский Р. С. Пространственно-временные характеристики барашков и пятен пены, образующихся при обрушении ветровых волн. Метеорология и гидрология №5, 1987.

*Арсений Борисович Каргин — ведущий инженер Института
вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
e-mail: arseny@academ.org;*

*Борис Александрович Каргин — д.ф.-м.н., зав. лабораторией Института вычислительной
математики и математической геофизики СО РАН; Новосибирский государственный университет;
e-mail: bkargin@osmf.sscs.ru;*

*Сергей Михайлович Пригарин — д.ф.-м.н., вед. науч. сотр. Института
вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
Новосибирский государственный университет;
e-mail: stp@osmf.sscs.ru.*

Дата поступления — 31 мая 2017 г.