

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 561.46

Б.А. Каргин, С.М. Пригарин

ИМИТАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ЕЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Построена численная модель поверхности морского ветрового волнения. Эта модель использована для исследования оптических характеристик морской поверхности методом Монте-Карло. Показано, что имитация поля возвышений морской поверхности дает возможность уточнить оптические характеристики морского волнения, учитывая эффекты переотражения и затенения излучения элементами поверхности.

1. Экспериментальные данные о статистических свойствах ветрового волнения водной поверхности свидетельствуют о том, что оно с высокой точностью может быть описано однородным гауссовским случайным полем возвышений относительно среднего уровня [1]. Статистические характеристики морского волнения определяются «частотным» спектром $S(\mu)$ и «угловым» спектром $Q(\mu, \theta)$. В качестве аппроксимации спектров рассмотрим следующие выражения (см., например, [1, 2]):

$$S(\mu) = \begin{cases} 6m_0 (\mu_{\max}/\mu)^5 \mu^{-1} \exp \{ -1, 2 [(\mu_{\max}/\mu)^5 - (\mu_{\max}/\mu_1)^5] \}, & \mu \in [0, \mu_1], \\ S(\mu_1) + (S(\mu_2) - S(\mu_1)) \frac{\mu - \mu_1}{\mu_2 - \mu_1}, & \mu \in (\mu_1, \mu_2), \\ 0,0078 g^2 \mu^{-5}, & \mu \in [\mu_2, \mu_3]. \end{cases} \quad (1)$$

$$Q(\mu, \theta) = 2 \cos^2 \theta / \pi, \quad \theta \in [-\pi/2, \pi/2]. \quad (2)$$

Здесь $\mu_3 \approx 30 \text{ с}^{-1}$ — верхняя граница частотного спектра гравитационных волн; μ_{\max} — частота спектрального максимума спектра S ; g — ускорение свободного падения,

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_1 &= 1,8 \mu_{\max} \tilde{\mu}^{-0,7}, \quad \mu_2 = 2,0 \mu_{\max} \tilde{\mu}^{-0,7}, \\ \tilde{\mu} &= v \mu_{\max} / g, \quad m_0 = 0,00127 g^{-2} v^4 \tilde{\mu}^{-3,19}, \end{aligned}$$

v — скорость ветра (м/с) на высоте 10 м над уровнем моря. Статистические свойства морского волнения в рамках модели (1), (2) определяются скоростью ветра v и частотой спектрального максимума μ_{\max} .

Пусть $w(x, y)$ — поле возвышений морского ветрового волнения относительно среднего уровня (в некоторый фиксированный момент времени) со спектральными характеристиками (1), (2). Тогда функцию $w(x, y)$ можно рассматривать как реализацию случайного гауссовского однородного поля со спектральной плотностью в полярных координатах ρ, θ :

$$\begin{aligned} S_{\rho\theta}(\rho, \theta) &= 2 \cos^2 \theta S_\rho(\rho) / \pi, \\ S_\rho(\rho) &= 0,5 (g/\rho)^{1/2} S((g\rho)^{1/2}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho > 0, \quad \theta \in [-\pi/2, \pi/2].$$

Корреляционная функция поля $w(x, y)$ равна

$$M w(0, 0) w(x, y) = \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \cos(\lambda x + \nu y) S_{\rho\theta}(\rho(\lambda, \nu), \theta(\lambda, \nu)) \rho^{-1}(\lambda, \nu) d\nu d\lambda,$$

где $\rho(\lambda, \nu) = (\lambda^2 + \nu^2)^{1/2}$, $\theta(\lambda, \nu) = \arg(\lambda + i\nu)$.

Численное моделирование поверхности морского волнения проводилось на основе метода рандомизации спектра [3]. Приведем выражение для приближенной модели $w^*(x, y)$ со спектральной плотностью (3), которое использовалось при расчетах

$$\omega^*(x, y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} [r_{ij} \cos(x\rho_i \cos \theta_j + y\rho_i \sin \theta_j + \varphi_{ij}) + r'_{ij} \cos(x\rho_i \cos \theta_j - y\rho_i \sin \theta_j + \varphi'_{ij})]. \quad (4)$$

Здесь ρ_i — случайные величины, распределенные с плотностью, пропорциональной S_ρ 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, распределенные в интервалах $B_j = [\pi(j-1)/(2n), \pi j/(2n))$ с плотностью, пропорциональной Q из (2), r_{ij} и r'_{ij} — случайные величины с распределением Рэля, φ_{ij} и φ'_{ij} — равномерно распределены на $[0, 2\pi]$.

$$a_{ij}^2 = \int_{A_i} \int_{B_j} S_{\rho\theta}(\rho, \theta) d\theta d\rho.$$

Случайные величины ρ_i моделировались методом обратной функций распределения, а θ_j — методом исключения (с линейной мажорантой при $j > n/2$, с постоянной мажорантой при $j \leq n/2$, n — четное). Результаты имитации (4) поверхности морского волнения представлены на рис. 1.

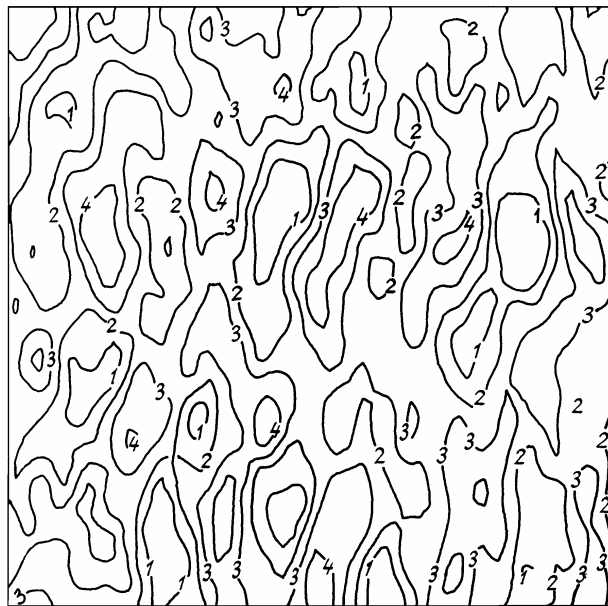


Рис. 1. Пример реализации рельефа взволнованной морской поверхности

Алгоритм моделирования определяется тремя параметрами: m , n и ρ^* , которые отвечают за точность приближения. Поле ω^* имеет требуемую спектральную плотность (3) и является асимптотически гауссовским при

$$\max(m, n) \rightarrow \infty, \rho^* \rightarrow \infty.$$

Эти условия достаточны и для слабой сходимости ω^* в пространстве непрерывно дифференцируемых функций [4].

2. Ниже рассматривается способ вычисления площади затенения морской поверхности, т. е. доли поверхности, экранируемой волнами от падающего потока параллельных лучей. Оценка площади затенения актуальна для решения задачи дистанционного зондирования океана и исследования его оптических свойств [5]. В [6] предложена методика оценки площади затенения на основе модели, где учитывается лишь распределение наклонов поверхности и не учитывается поле возвышений. Результаты теории выбросов случайных процессов применялись для оценки площади затенения в [7]. В [8] было предложено использовать методы приближенного моделирования случайных полей для исследования оптических характеристик морской поверхности. Этот подход лежит в основе рассматриваемого способа: строится приближенная численная модель поверхности морского волнения и затем для нее вычисляется площадь затенения.

Алгоритм оценки площади затенения состоит в следующем. На поверхности $\omega^*(x, y)$ выбирается произвольно точка $(x_0, y_0, z_0 = \omega^*(x_0, y_0))$. Из этой точки строится луч в заданном направлении, т. е. вычисляется последовательность точек (x_k, y_k, z_k) вдоль луча с малым шагом

$$h_k = [(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2]^{1/2}.$$

Если луч попадает под поверхность: $z_k < w^*(x_k, y_k)$, то считается, что точка (x_0, y_0, z_0) затенена. Площадь (вероятность) затенения оценивается усреднением числа точек, находящихся в затенении, по реализациям поверхности w^* .

Одна из основных вычислительных проблем — это настройка модели, т.е. выбор параметров m , n , ρ^* , от которых зависит, с одной, стороны, близость приближенной модели $w^*(x, y)$ к требуемому полю, а с другой стороны — трудоемкость алгоритма. Выбор параметров разумно считать удовлетворительным, если дальнейшее их уточнение не влияет на конечный результат в рамках допустимой погрешности. Анализ результатов вычислений площади затенения показал, что в основном удовлетворительным набором параметров является: $m = 11$, $n = 2$, $\rho^* = 4\rho_{\max}$, где $\rho_{\max} = \mu_{\max}/g$.

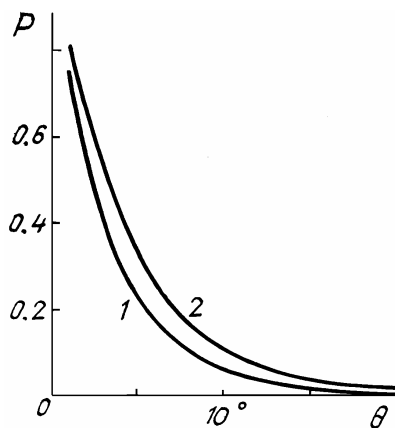


Рис. 2. Зависимость площади затенения от угла возвышения источника при $\mu_{\max} = 1,0 \text{ с}^{-1}$, $\theta = 0^\circ$; 1 — $v = 2 \text{ м/с}$, 2 — $v = 15 \text{ м/с}$

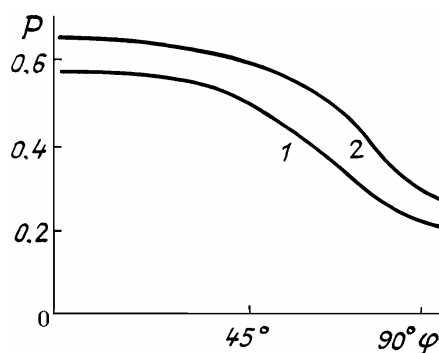


Рис. 3. Зависимость площади затенения от угла между направлением ветра и азимутальным направлением падающих лучей: $\mu_{\max} = 1,0 \text{ с}^{-1}$, $\theta = 0^\circ$; 1 — $v = 2 \text{ м/с}$, 2 — $v = 15 \text{ м/с}$

Площадь затенения P поверхности морского ветрового волнения зависит от четырех параметров: $P = P(v, \mu_{\max}, \phi, \theta)$, где v и μ_{\max} определяют статистические характеристики волнения, ϕ — угол между направлением ветра и азимутальным направлением падающих лучей, θ — угол возвышения источника излучения. На рис. 2–3 приведены вычисленные зависимости величины P от ϕ и θ .

Таблица 1

Вероятности затенения морской поверхности (в %). $\phi = 0^\circ$

$v, \text{ м/с}$	$\theta, \text{ град}$							
	1	2	4	6	8	10	14	20
2	75	57	30	16	11	7	3	1
	76	57	29	14	6	4	0	0
15	81	66	43	27	17	10	4	2
	88	78	59	44	32	23	10	2

Примечание. Верхняя строка — значения, полученные с использованием имитации морской поверхности по модели (1)–(4) при $\mu_{\max} = 1,0 \text{ с}^{-1}$, нижняя — по методике из [6].

В таблице приведены вероятности затенения, полученные с помощью имитации морской поверхности и с использованием методики из [6]. Для скорости ветра 2 м/с совпадение результатов хорошее, а для скорости ветра 15 м/с использование численного моделирования морской поверхности дает более низкие вероятности затенения, чем методика из [6].

3. В данном пункте имитация морской поверхности применяется для вычисления характеристик поля отраженного оптического излучения с учетом эффектов затенения и переотражения излучения элементами поверхности. Показывается, что в некоторых случаях результаты вычислений могут значительно отличаться от результатов, полученных на основе традиционной «факетной» модели [9, 10], в которой поле возвышений морского волнения не учитывается.

Предположим, что взаимодействие излучения с поверхностью моря происходит по законам лучевой оптики ([9], с. 299). Введем обозначения: $r_{\perp} = (x, y)$ — проекция радиус-вектора $r = (x, y, z)$ на горизонтальную плоскость; $z = w(r_{\perp})$ — уравнение взволнованной поверхности; $k = (0, 0, 1)$, Ω_+ и Ω_- — единичные полусферы направлений с $\langle \omega, k \rangle \in [0, 1]$ и $\langle \omega, k \rangle \in [-1, 0)$ соответственно. При взаимодействии луча, имеющего направление ω' , с поверхностью в точке $r = (r_{\perp}, w(r_{\perp}))$, с вероятностью $R(\omega', s)$ происходит зеркальное отражение в направлении $\omega = \omega' - 2\langle \omega', s \rangle s$, а с вероятностью $1 - R(\omega', s)$ — преломление. Здесь s — внешняя нормаль к поверхности в точке r , а $R(\omega, s)$ — френелевский коэффициент отражения, зависящий от локального угла падения [8]:

$$R(\omega, S) = (|A| - B)^2 (A^2 B^2 + C^2) (|A| + B)^{-2} (|A| B + C)^{-2},$$

где $A = \langle \omega, s \rangle$, $B = (n^2 - 1 + A^2)^{1/2}$, $C = 1 - A^2$, n — показатель преломления воды относительно воздуха (в расчетах $n = 1,33$). Нормаль к поверхности вычисляется по формулам

$$s_x = -w_x s_z, \quad s_y = -w_y s_z, \quad s_z = (1 + w_x^2 + w_y^2)^{-1/2},$$

где через w_x и w_y обозначены производные от функции $w(x, y)$ по x и y соответственно.

Рассмотрим слой $-H \leq z \leq H$ трехмерного пространства, и пусть $z = w(x, y)$ — некоторая реализация взволнованной поверхности такая, что $|w(x, y)| < H$. Граница слоя освещается параллельным потоком фотонов в направлении $\omega_0 \in \Omega_-$. Интенсивность излучения $I(r, \omega; w)$ в точке r в направлении ω при заданной реализации поверхности $w(x, y)$ удовлетворяет известным уравнениям [8]. В дальнейшем рассматривается лишь поле отраженного излучения (т. е. поглощение и рассеяние в среде не учитываются). Под отраженным излучением будем понимать излучение с интенсивностью $\langle I(r, \omega; w) \rangle = I(\omega)$, $\omega \in \Omega_+$, $z = H$, где осреднение произведено по реализациям поверхности (в силу предполагаемой статистической однородности взволнованной поверхности, зависимость от $r = (x, y, z)$, $z = H$ при осреднении пропадает). Задача состоит в оценке интегральных характеристик отраженного излучения:

$$J = \int_{\Omega_+} I(\omega) d\omega, \quad \Omega_1 \subset \Omega_+.$$

Рассмотрим траекторию $\{(r_0, \omega_0), (r_1, \omega_1), \dots, (r_m, \omega_m)\}$, где r_i — точка i -го пересечения луча с поверхностью $w(r_{\perp})$, ω_i — единичный вектор направления отраженного луча после i -го столкновения. Оценка искомого значения яркости получается путем осреднения по всем траекториям и реализациям случайного поля следующей случайной величины:

$$\xi(\Omega_1) = \begin{cases} \prod_{i=1}^m R(\omega_i, s_i) & \text{при } \omega_m \in \Omega_1, \\ 0 & \text{при } \omega_m \notin \Omega_1. \end{cases}$$

При построении траектории каждая последующая точка выбирается из условия

$$r_i = r_{i-1} + \Delta t \omega_{i-1} = (r_{\perp i}, w(r_{\perp i})). \quad (5)$$

Для определения значения $r_{\perp i}$ из точки r_{i-1} в направлении ω_{i-1} с шагом Δt проверялось соотношение

$$\langle k, r_{i-1} + \Delta t \omega_{i-1} \rangle < w((r_{i-1} + \Delta t \omega_{i-1})_{\perp}).$$

После того как будет найдена точка r'_{i-1} , в которой $z'_{i-1} < w(r'_{\perp i-1})$, методом деления пополам находится приближенное решение уравнения (5) с заданной точностью. Далее вычисляется вектор нормали s и

по приведенным выше формулам производится пересчет нового направления. Таким образом строится весь путь луча до выхода его за уровень H .

Для исследования поля оптического излучения, отраженного морской поверхностью, кроме поля возвышений $w(x, y)$ необходимо моделировать производные $w_x(x, y)$, $w_y(x, y)$. Так как для однородного гауссовского поля значения $w(x, y)$ и $(w_x(x, y), w_y(x, y))$ независимые, то полагаем

$$w_x(x, y) = \xi, \quad w_y(x, y) = \eta, \quad (6)$$

где (ξ, η) — гауссовские векторы с нулевым средним, и согласно [11]

$$D\xi = 0,003 + 0,00192 v, \quad D\eta = 0,00316 v, \quad M\xi\eta = 0, \quad (7)$$

при условии, что направление ветра совпадает с направлением оси OX .

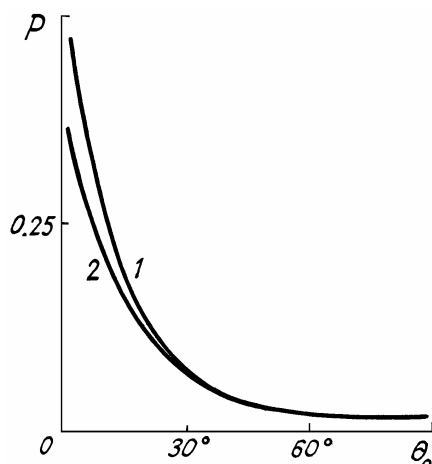


Рис. 4. Зависимость доли излучения, отраженного морской поверхностью, от угла возвышения источника: 1 — «фацетная» модель; 2 — модель (1)–(4), (6)–(7)

Обозначим через θ_0 угол возвышения источника над горизонтом, φ_0 — угол между азимутальным направлением падающих лучей и направлением ветра, θ — угол возвышения над горизонтом отраженного луча. Сравнение модели (1)–(4), (6), (7) с фацетной моделью (которая соответствует $w(x, y) \equiv 0$) показало, что при малых углах θ_0 фацетная модель заметно завышает долю отраженного морской поверхностью излучения (рис. 4), а также сильно искажает индикатрису отраженного излучения (рис. 5). Зависимость среднего числа переотражений от значения θ_0 представлена на рис. 6. (Результаты, представленные на рис. 4–6, получены по фацетной модели (6)–(7) и модели (1)–(4), (6)–(7) при $\varphi_0 = 0^\circ$, $v = 15$ м/с и параметрах $\mu_{\max} = 1,0$ с $^{-1}$, $m = 11$, $n = 2$, $\rho^* = 4\mu_{\max}/g$). Таким образом, хотя имитация поля возвышений морской поверхности усложняет модель, но в то же время дает возможность уточнить оптические характеристики морского волнения, учитывая эффекты переотражения и затенения излучения элементами поверхности.

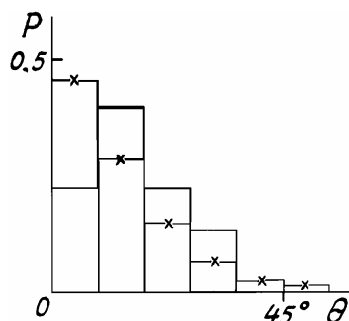


Рис. 5. Гистограмма индикатрисы отражения морской поверхностью при возвышении источника $\theta_0 = 10^\circ$: —x— — «фацетная» модель, — — модель (1)–(4), (6)–(7)

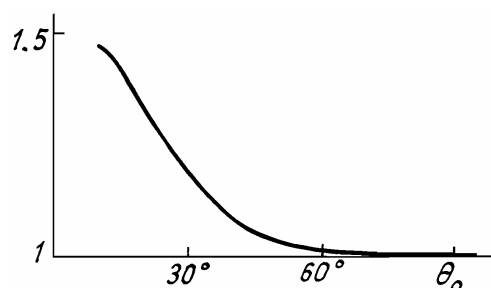


Рис. 6. Среднее число отражений луча на морской поверхности в зависимости от угла возвышения источника (модель (1)–(4), (6)–(7))

В заключение отметим, что предлагаемый подход к численному моделированию морского волнения может быть использован при решении различных оптических задач. В частности, модель водной поверхности с учетом изменения во времени

$$w_n(x, t) = \sum_{j=1}^n a_j r_j \cos(\langle \lambda_j, \mathbf{x} \rangle + \mu_j t + \varphi_j),$$

где μ_j связаны с λ_j дисперсионным соотношением, представляется перспективной для решения задач лазерного зондирования морской поверхности путем численной имитации.

1. Крылов Ю. М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Л.: Гидрометеониздат, 1966.
2. Давидан И. М., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеониздат, 1985.
3. Михайлов Г. А. Численное построение случайного поля с заданной спектральной плотностью // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. № 4. С. 793–795.
4. Пригарин С. М. Приближенное моделирование гауссовских однородных полей на основе спектрального представления. Новосибирск, 1989. 21 с. (Препринт/ Вычислительный центр СО АН СССР, № 876).
5. Белоусов Ю. И., Демидов Е. Ф. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1979. Т. 15. № 2. С. 202–214.
6. Saunders P. M. // J. of Geoph. Reserch. 1967. V. 72. № 18. P. 4643–4649.
7. Мулламаа Ю. - А. Р. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1968. Т. 4. № 7. С. 759–764.
8. Каргин Б. А. // Моделирование волновых полей (Математические проблемы геофизики). Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1983. С. 25–40.
9. Монин А. С., Красицкий В. П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 276 с.
10. Мулламаа Ю. - А. Р. Атлас оптических характеристик взволнованной поверхности моря. Тарту: Изд-во АН ЭССР, 1964.
11. Cox C., Munk W. // J. Opt. Soc. Amer. 1954. V. 44. № 11. P. 838–850.

Вычислительный центр СО РАН,
Новосибирск

Поступила в редакцию
19 октября 1991 г.

B. A. Kargin, S. M. Prigarin. Simulation of the Swell Surface and Study of its Optical Properties by Monte-Carlo Method.

A numerical model of the wind produced swell is constructed. This model is used for studying optical properties of the sea surface by Monte-Carlo method. It is shown that simulation of the field of the sea surface elevations makes it possible to determine more precisely the optical properties of the swell taking into account multiple reflections effects and radiation shading by the surface elements.