



СОДЕРЖАНИЕ

<i>Каган Б.А., Софьина Е.В., Рашиди Э.Х.А.</i> Чувствительность приливной динамики к пространственной изменчивости гидродинамической шероховатости дна на примере Печорского моря	4
<i>Мортиков Е.В.</i> Численное моделирование влияния стратификации на силу сопротивления при движении ледяного киля в двухслойной жидкости	12
<i>Шамин Р.В., Смирнова А.И., Юдин А.В.</i> Вопросы обнаружения и прогнозирования волн-убийц в вычислительных экспериментах	23
<i>Зимин А.В., Пикуль Т.А.</i> Использование вейвлет-преобразования для выделения характеристик внутренних волн	34
<i>Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Бураков В.А., Буркин В.В., Зыков Е.Н., Иценко А.Н., Родионов А.А., Симоненко В.Г., Хабибуллин М.В., Югов Н.Т.</i> Расчет высокоскоростного движения инерционной модели при входе в воду и ее взаимодействие с металлической преградой	43
<i>Мальшикин Г.С., Воронина Н.Г., Смирнов А.С., Тимофеев В.Н.</i> К вопросу об оптимизации параметров корабельных бортовых протяженных антенн при неравномерном распределении уровня помехи	56
<i>Голубев А.Г.</i> Об алгоритме квазисогласованной фильтрации тональных эхосигналов	69
<i>Левин И.М., Радомысльская Т.М., Савченко В.В.</i> Видимость нефтяных пленок на поверхности воды из космоса	75
Научные сообщения	
<i>Зимин А.В., Родионов А.А., Здоровеннов Р.Э., Романенков Д.А., Шевчук О.И., Родионов М.А., Жегулин Г.В.</i> Экспедиционные исследования короткопериодной изменчивости гидрофизических полей в Белом море в июле–августе 2012 г. с научно-исследовательского судна «Эколог»	85
<i>Тюгин Д.Ю., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Куркина О.Е.</i> Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel® Parallel Studio XE 2013	89
Рецензия на книгу	
<i>Галиев Ш.У.</i> Геофизические сообщения Чарльза Дарвина как модели теории катастрофических волн...	96
Из истории науки	
<i>Корчагин Н.Н.</i> Андрей Сергеевич Монин	97
Конференции	103
Поздравляем!	106
Хроника	107
Правила представления материалов в редакцию.....	109

CONTENTS

Articles

- Kagan B.A., Sofina E.V., Rashidi E.* Sensitivity of the Tidal Dynamics to the Spatial Variability of Hydrodynamic Roughness of the Bottom as Illustrated by the Pechora Sea Example 4

The results of investigation of the Pechora Sea tidal dynamics sensitivity to variations of the external governing parameters, obtained with the use of the 3D finite-element hydrostatic model QUODDY-4, are considered in this paper. It is shown that the tidal characteristics are weakly sensitive to variations of the critical depth separating the subdomains of rough and incompletely rough bottoms, and are strongly sensitive to variations of hydrodynamic roughness of the bottom.

Key words: hydrodynamically rough and incompletely rough bottoms, modeling, resistance laws, spatial inhomogeneity of the bottom roughness, the Pechora Sea.

- Mortikov E.V.* Numerical Simulation of the Stratification Effect on the Drag Coefficient of a Moving Ice Keel in a Two-Layer Fluid 12

This paper considers numerical simulation of a moving ice keel in a two-layer fluid. The immersed boundary method is used for modeling of the non-stationary complex geometry on the rectangular grids. The results of the drag force computations for various Froude numbers are presented in comparison with the laboratory experiments.

Key words: sea ice, two-layer fluid, drag coefficient, immersed boundary method, graphic processors.

- Shamin R.V., Smirnova A.I., Ydin A.V.* Questions of Detection and Forecasting of Waves-Killers in Numerical Experiments 23

Methods of forecasting and detection of rogue waves in numerical experiments are considered. Methods of operational forecast of freak waves, as well as the methods of remote sensing of the sea surface and application of computing experiments to validation of in-situ measurements, are suggested and analyzed.

Key words: rogue waves, computing experiments, mathematical simulations.

- Zimin A.V., Picul T.A.* Use of Wavelet Transformation for Detection of Internal Waves Characteristics 34

The presence of an internal tidal bar and intensive internal wave packets with the period of 10-20 minutes were detected from the in-situ data obtained on the White Sea shelf. Along with the standard methods the wavelet analysis was applied to describe the internal wave characteristics. A well-grounded choice of a wavelet basis and its construction method was carried out. Different options of wavelet transformation are shown while describing nonlinear waves.

Key words: internal waves, contact sensing, wavelet analysis, the White Sea shelf.

- Afanaseva S.A., Belov N.N., Burakov V.A., Burkin V.V., Zykov E.N., Ishchenko A.N., Rodionov A.A., Simonenko V.G., Khabibullin M.V., Yugov N.T.* Calculations of High-Speed Movement of the Inertial Model Entering the Water, and Its Interaction with the Metal Target 43

An initial stage of high-speed penetration of a needle-shaped metal body into the water and its interaction with the metal target are considered. The calculations are carried out in the frame of the continuum mechanics: for a solid body an elastic-plastic model, with allowance for destruction, is suggested, while for the water fluid mechanics equations are used. Over the considered range of speeds of 1.0–2.5 km/s, when the body is entering the water, a mode of developed cavitation occurs; the plastic deformation of the head part of the striker, and in some cases, its destruction, are observed, which leads to increase of the penetration resistance.

Key words: experimental, mathematical modeling, high-speed interaction, metal, water.

<i>Voronina N.G., Malyshkin G.S., Smirnov A.S., Timofeev V.N.</i> On the Issue of Optimization of Ship Broadside Extended Antennae Parameters, with Non- Uniform Distribution of Noise Level	56
--	----

The paper considers a way of weight coefficients optimization for a ship broadside extended multi-element antenna, with allowance for a number of requirements for its parameters, with the non- uniform noise level distribution over the antenna elements.

Key words: hydroacoustic, linear extended array-based antenna, broadsides antenna, not uniform noise, compromise optimization on the number of parameters.

<i>Golubev A.G.</i> On Algorithm of the Quasi-Matched Filtration of Tone Echo-Signals	69
---	----

For filtration of the tone echo-signals in the presence of reverberation interference, a narrow-band filter is synthesized, with the AFC being at a low level beyond the passband. The given property of the filter is reached due to introduction of a weighing window in the process of the spectral analysis. A traditional choice of a spectral decomposition interval, as well as the choice of the parameters of a specified window, results in the width of a filter passband being unmatched with duration of an echo-signal. The paper considers a problem of synthesis of an improved filter, with no defect described above.

Key words: filtration, reverberation, echo-signal, window, signal against noise ratio.

<i>Levin I.M., Radomyslskaya T.M., Savchenko V.V.</i> Visibility of Oil Films on the Water Surface From Space	75
---	----

Algorithms and results of the calculations of the apparent contrast of oil films on the sea surface are given for the case of observations from space in visual, ultraviolet and infrared spectral ranges (300–800 nm). The calculations were carried out for different water types and optical thicknesses of the maritime atmosphere and for various solar altitudes and wind velocities. It is shown that the oil films on the sea surface can be detected if the wind velocity ranges from 6 to 20 m/s and the solar zenith angle varies from 0 to 45 degrees. The greatest values of the contrast correspond to the highest wind velocities and solar zenith angle.

Key words: oil films, sea surface, contrast.

Scientific Messages

<i>Zimin A.V., Rodionov A.A., Zdorovenov R.E., Romanenkov D.A., Shevchuk O.I., Rodionov M.A., Zhegulin G.V.</i> Research of the Short-Term Variability of Hydrophysical Fields in the White Sea in July-August 2012 Onboard the Research Vessel "Ecology"	85
---	----

The information on the expedition of St. Petersburg branch of the Institute of Oceanology is provided. The purpose of work is accumulation of meteorological data to study variability of the local hydrophysical fields, produced by the tidal variations, in the White Sea areas differing in hydrological conditions.

Key words: internal waves, probing, satellite radar images, White Sea.

<i>Tyugin D., Kurkin A., Pelinovsky E., Kurkina O.</i> Increase of Productivity of the Program Complex for Modeling of Internal Gravity Waves IGW Research with the Help of Intel® Parallel Studio XE 2013	89
--	----

The new version of the program complex intended for numerical modeling of propagation and transformation of internal gravity waves in the ocean, with a finalized unit calculation of a ray of internal waves and with a paralleling of the program, which can significantly speed up the ongoing computation is presented. As a practical example of the proposed study additive properties of the shelf of the Baltic Sea from the point of view of long internal waves on the basis of the ray approach is offered. The values of the coefficient of capture are calculated and the corresponding maps are constructed.

Key words: numerical modeling, parallel algorithms, wave refraction.

УДК 551.465

© И.М.Левин, Т.М.Радомысльская, В.В.Савченко, 2012

Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им.П.П.Ширшова РАН
osopt@yandex.ru

ВИДИМОСТЬ НЕФТЯНЫХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ИЗ КОСМОСА

Приведены алгоритм и результаты расчета видимого контраста нефтяной пленки на поверхности моря при наблюдении из космоса в видимой, ультрафиолетовой и ближней инфракрасной областях спектра (300–800 нм). Расчеты проведены для различных типов вод и океанической атмосферы различной мутности при изменении высоты Солнца и скорости приводного ветра. Показано, что при использовании нескольких спектральных каналов возможно наблюдение нефтяных пленок на поверхности воды при скоростях ветра от 6 до 20 м/с и зенитных углах Солнца от 0 до 45 градусов. При этом наибольшие значения контраста соответствуют более высоким скоростям ветра и более высокому Солнцу.

Ключевые слова: нефтяные пленки. поверхность моря, контраст.

Проблема лидарного дистанционного зондирования нефтяных пленок на поверхности океана была всесторонне исследована в работах В.Ю.Осадчего, К.С.Шифрина и И.Я.Гуревич [1, 2]. Было показано, что при зондировании в надир эффект гашения волнения пленкой воды приводит к увеличению яркости пленки, так как в нефтяном слике больше перпендикулярных к излучению площадок, чем в незагрязненной поверхности. Соответственно контраст пленка–вода для лидарного наблюдения всегда положительный (коэффициент отражения нефти больше, чем воды).

В случае телевизионного или фотографического наблюдения пленок при естественном освещении картина существенно усложняется. В этом случае гашение волнения пленкой может как увеличить, так и уменьшить яркость отраженного от пленки излучения в зависимости от скорости ветра, зенитного угла Солнца и направления наблюдения. Соответственно контраст может быть как положительным, так и отрицательным. Поэтому важно проанализировать зависимость контраста от этих параметров, с тем чтобы получить возможность выбора оптимальной области спектра для наблюдения нефтяных пленок на поверхности при заданных условиях наблюдения.

Здесь будет рассмотрен видимый контраст пленки на фоне воды при телевизионных или фотографических наблюдениях из космоса в надир в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра для океанической атмосферы различной мутности и в различных типах океанских вод. В качестве исходных данных для расчета вклада в контраст яркости выходящего из воды обратно рассеянного излучения используются классические измерения Мореля и Прийера спектральных коэффициентов диффузного отражения (альбедо) воды $R(\lambda)$ в видимой области спектра в различных районах Мирового океана [3]. Пересчет этих данных на УФ и ИК области спектра проводился с использованием оптической модели океанской воды О.В.Копелевича.

На основании этих же спектров $R(\lambda)$ была оценена видимость нефтяных пленок с корабля или низколетящего авианосителя (без учета атмосферы) в работе [4].

Алгоритм расчета яркости восходящего излучения. Выразим контраст нефтяной пленки на поверхности воды в виде

$$C = \frac{L_t^f - L_t}{\max\{L_t^f, L_t\}},$$

где L_t^f – полная (total) яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы при визировании на пленку; L_t – полная яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы при визировании на чистую поверхность.

Видимая яркость L_t складывается из компонентов, определяемых светом, рассеянным назад толщей воды и ослабленным в атмосфере (L_w), светом, отраженным от поверхности и ослабленным в атмосфере (L_s), и светом, рассеянным назад в атмосфере без взаимодействия с поверхностью (L_A), а видимая яркость пленки L_t^f – той же величиной L_A и светом, отраженным от пленки (L_s^f): $L_t = L_A + L_s + L_w$, $L_t^f = L_A + L_s^f$.

При записи последней формулы предполагается, что нефтяная пленка непрозрачна для выходящего из толщи воды света. Это условие накладывает ограничения на толщину пленки. По данным работы [5], посвященной изучению оптических свойств нефти, в видимой области спектра для «типичной» нефти из Канибадамской скважины показатель поглощения a находится в пределах $(1-5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Отсюда следует, что условие непрозрачности пленки для восходящего излучения и результаты проведенных расчетов справедливы при толщине пленки, большей 10–20 мкм. При пленках меньшей толщины положительный контраст будет несколько больше, а отрицательный несколько меньше рассчитанного.

Рассмотрим последовательно каждую из составляющих яркости.

Яркость излучения, рассеянного назад толщей атмосферы. Для расчета составляющей L_A – яркости атмосферы с черным дном – мы используем известную формулу В.В.Соболева [6], которую мы уточнили с помощью эмпирических поправок (M_1 и M_2). Эти поправки, как показали расчеты методом Монте-Карло [7], повышают точность формулы Соболева с 15–20 до 1–2 %.

Для общего случая наблюдения в произвольном направлении уточненная формула Соболева имеет вид

$$\rho_A = M_1 \{ \rho_1^0 [P(\vartheta) - 3\mu_0^2 + x_1\mu_0] + [0.25(3 - x_1)T(\mu_0)\tau \exp(-\tau/\mu)] + [0.5(1 + 1.5\mu_0 - T(\mu_0)) - 0.75\mu T(\mu_0)][1 - \exp(-\tau/\mu)] \}, \quad (1)$$

где $\rho_A = \pi L_A / E_0$ – коэффициент яркости атмосферы, учитывающий многократное рассеяние; E_0 – облученность на верхней границе атмосферы; M_1 – эмпирический коэффициент (определяется ниже);

$$\rho_1^0 = \frac{1}{4(\mu_0 + \mu)} \{ 1 - \exp[-\tau(\mu_0^{-1} + \mu^{-1})] \} \quad (2)$$

– коэффициент яркости, определяемый только однократным рассеянием (при $P \equiv 1$); $P(\vartheta)$ – индикатриса рассеяния атмосферы, нормированная по условию

$$\int_0^\pi P(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta = 2 \quad (3)$$

и определяемая как аэрозольным, так и рэлеевским рассеянием; x_1 – первый член разложения индикатрисы $P(\vartheta)$ по полиномам Лежандра ($x_1 = 3\langle \cos \vartheta \rangle$, $\langle \cos \vartheta \rangle$ – средний косинус индикатрисы, ϑ – угол рассеяния, $\cos \vartheta = -\cos \theta_0 \cos \theta + \sin \theta_0 \sin \theta \cos \phi$, ϕ – азимутальный угол между солнечным вертикалом и вертикальной плоскостью, содержащей направление наблюдения, θ – угол наблюдения (сканирования), θ_0 – зенитный угол Солнца); $\mu_0 = \cos \theta_0$, $\mu = \cos \theta$; τ – общая оптическая толщина атмосферы;

$$T(\mu) = t(\mu) \cdot M_2(\tau_a, \mu), \quad T(\mu_0) = t(\mu_0) \cdot M_2(\tau_a, \mu_0), \quad (4)$$

$$t(\mu) = \frac{1 + 1.5\mu + (1 - 1.5\mu) \exp(-\tau/\mu)}{2 + 0.5(3 - x_1)\tau}. \quad (5)$$

Функции $T(\mu)$ и $T(\mu_0)$ описывают также ослабление яркости и облученности в атмосфере, т.е.

$$T(\mu) = L/L', \quad T(\mu_0) = E/E_0, \quad (6)$$

где L' – яркость изотропного излучателя на поверхности океана; L – видимая яркость этого излучателя в направлении μ , E – облученность на поверхности (без учета поглощения атмосферными газами).

Эмпирические коэффициенты M_1 и M_2 имеют следующий вид:

$$M_1(\tau_a, \mu_0) = 1 + 0.37(1 - \mu_0^3)\tau_a, \quad (7)$$

$$M_2(\tau_a, \mu) = \frac{1 + 0.715\tau_a(1 - \sqrt{\mu})}{1 + 0.12\tau_a}. \quad (8)$$

Монте-Карло-моделирование функций L_A/E_d и $T(\mu)$, на основании которого были найдены эти коэффициенты, проводилось для рэлеевского и аэрозольного рассеяния, экспоненциально уменьшающегося с высотой, и для аэрозольной индикатрисы рассеяния Хеньи–Гринштейна. Оптическая аэрозольная толщина τ_a менялась от 0.05 до 0.4 при зенитном угле Солнца θ_0 , равным от 0 до 60°. Рассматривался случай наблюдения в надири ($\mu = 1$). Поэтому коэффициенты M_1 и M_2 справедливы только для этих условий.

Как видно из (1)–(8), для расчета яркости излучения, рассеянного назад в толще атмосферы, при наблюдении в надири необходимо знать зенитный угол Солнца θ_0 , облученность на верхней границе атмосферы $E_0 = S \cos \theta_0$ (S – солнечная постоянная), индикатрису рассеяния атмосферы $P(\vartheta)$, ее полную τ и аэрозольную τ_a оптическую толщину. Подробные таблицы солнечной постоянной приведены в [8]. Спектральная оптическая толщина атмосферы представляется в виде суммы аэрозольной и рэлеевской составляющих $\tau(\lambda) = \tau_a(\lambda) + \tau_p(\lambda)$, где, согласно [8], $\tau_p(\lambda) = [115.64\lambda^4 - 1.335\lambda^2]^{-1}$ (длина волны λ в мкм), а $\tau_a(\lambda) = \tau_a(550) \left(\frac{550}{\lambda}\right)^m$.

Величину $\tau_a(550)$ для длины волны 550 нм и параметр Ангстрема m можно определить из оптической модели океанской атмосферы, построенной по данным многолетних измерений функций $\tau(\lambda)$, проведенных лабораторией оптики СПбФ ИО РАН в различных районах Мирового океана и обобщенных К.С. Шифриным [9] (табл.1).

**Значение аэрозольной оптической толщины $\tau_a(550)$
и параметра Ангстрема m в различных океанских районах**

Район	$\tau_a(550)$	m
Наиболее чистая океаническая атмосфера	0.05	0.35
Центрально-океанический район	0.07	0.40
Прибрежный район	0.2	0.90
«Море Мрака»	0.4	0.45

Индикатриса рассеяния атмосферы определяется как

$$P(\lambda, \vartheta) = (\tau_a(\lambda) / \tau(\lambda)) P_a(\vartheta) + (\tau_p(\lambda) / \tau(\lambda)) P_p(\vartheta),$$

где $P_p(\vartheta) = 0.75(1.017 + 0.948 \cos 2\vartheta)$ – рэлеевская индикатриса рассеяния. В качестве аэрозольной индикатрисы используем индикатрису Хенни–Гринштейна для морского аэрозоля, рекомендованную в [10, 11]:

$$\left. \begin{aligned} P_a(\vartheta) &= \alpha f(\vartheta, g_1) + (1 - \alpha) f(\vartheta, g_2) \\ f(\vartheta, g) &= \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \vartheta)^{3/2}} \end{aligned} \right\}$$

с параметрами $\alpha = 0.983$, $g_1 = 0.82$, $g_2 = -0.55$;

Величина x_1 для этой индикатрисы равна 2.39.

Яркость излучения, отраженного от чистой и покрытой пленкой поверхности моря. Для расчета составляющей L_s , яркости, обусловленной светом, отраженным от незагрязненной поверхности, мы используем соотношение, полученное в [12]:

$$L_s = \pi^{-1} E^{\text{dif}} \rho_s^{\text{dif}} T(\mu) + \pi^{-1} E^{\text{dir}} R_s^{\text{dir}} [T(\mu) - \exp(-\tau/\mu)] + \pi^{-1} E^{\text{dir}} \rho_s^{\text{dir}} \exp(-\tau/\mu), \quad (9)$$

где E^{dir} и E^{dif} – составляющие облученности поверхности, обусловленные прямой и диффузной радиацией; ρ_s^{dir} и ρ_s^{dif} – коэффициенты яркости поверхности для прямой и рассеянной радиации; R_s^{dir} – альbedo поверхности для прямой радиации. При выводе формулы (9) предполагалось, что все фотоны, достигшие приемника после отражения от поверхности, можно представить в виде суммы четырех частей: $L_s = L_{00} + L_{01} + L_{10} + L_{11}$. Первый индекс указывает судьбу фотонов на пути к поверхности, второй – на пути от поверхности к приемнику. Значение индекса 1 означает, что фотоны испытали хотя бы одно рассеяние, 0 – фотоны не рассеивались. В формуле (9) первое слагаемое соответствует составляющей яркости, обусловленной фотонами, которые рассеялись не менее одного раза на пути к поверхности ($L_{10} + L_{11}$), второе – фотонами, не рассеянными на пути к поверхности, но рассеянными на пути от поверхности к приемнику (L_{01}), третье – фотонами, дошедшими до приемника вообще без рассеяния (L_{11}). В этой формуле учтены неизотропный характер отражения света от поверхности океана и разное ослабление в атмосфере прямого и рассеянного света.

Учитывая (6) и введя обозначения для ослабления прямой радиации

$$T^{\text{dir}}(\mu) = \exp(-\tau/\mu)$$

и коэффициента яркости поверхности на верхней границе атмосферы

$$\rho_s^A = L_s \pi / E_0,$$

перепишем уравнение (9) в виде

$$L_s = \frac{E_0}{\pi} \rho_s^A; \rho_s^A = [T(\mu_0) - T^{\text{dir}}(\mu_0)]T(\mu)\rho_s^{\text{dif}} + [T(\mu) - T^{\text{dir}}(\mu)]T^{\text{dir}}(\mu_0)R_s^{\text{dir}} + T^{\text{dir}}(\mu)T^{\text{dir}}(\mu_0)\rho_s^{\text{dir}}. \quad (10)$$

Для чистой поверхности коэффициенты яркости и отражения в видимой области слабо зависят от длины волны и рассчитываются на основе распределения уклонов Кокса–Манка [13] по формулам Мулламаа [14], позволяющими определить ρ_s^{dir} для любых значений скорости ветра (V), зенитного угла Солнца (θ_0) и азимута ветра (ϕ_v). Для ряда фиксированных значений V , θ_0 и ϕ_v значения ρ_s^{dir} и R_s^{dir} приведены в книге [15]. Некоторые значения ρ_s^{dir} показаны в табл.2. Для не слишком больших зенитных углов $\theta_0 \leq 45^\circ$ и скорости ветра $V > 4$ м/с значения R_s^{dir} и ρ_s^{dif} меняются незначительно: $R_s^{\text{dir}} \cong 0.021 - 0.035$, $\rho_s^{\text{dif}} \cong 0.021$ [14].

Таблица 2

Коэффициенты яркости чистой поверхности ρ_s^{dir} (усредненные по азимуту ветра)

$\theta_0, ^\circ$	$V, \text{ м/с}$				
	2	5	10	15	20
0	0.42	0.20	0.10	0.072	0.054
20	0.036	0.064	0.061	0.051	0.043
45	0.0001	0.0016	0.008	0.014	0.018

Видимая яркость пленки на верхней границе атмосферы L_s^f выражается формулой (10) при замене L_s на L_s^f , ρ_s^A на ρ_f^A , R_s^{dir} на R_f^{dir} , ρ_s^{dif} на ρ_f^{dif} и ρ_s^{dir} на ρ_f^{dir} , где R_f^{dir} , ρ_f^{dif} , ρ_f^{dir} – коэффициенты отражения и яркости при прямом и диффузном освещении для поверхности, покрытой пленкой.

Френелевский коэффициент отражения толстой нефтяной пленки в видимой области спектра с точностью около 10 % не зависит от длины волны, и его среднее значение равно 0.04, в то время как для воды в видимой области спектра френелевский коэффициент отражения равен ≈ 0.02 . Известно также [1, 2], что загрязненная морская поверхность может рассматриваться как случайная поверхность, имеющая распределение уклонов Кокса–Манка, но с дисперсией, примерно в 3 раза меньшей, чем в распределении уклонов чистой поверхности. Это соответствует трехкратному уменьшению скорости ветра. Поэтому можно предположить, что

$$\left. \begin{aligned} R_f^{\text{dir}} &\approx 2R_s^{\text{dir}}(\theta_0, V/3) \\ \rho_f^{\text{dif}} &\approx 2\rho_s^{\text{dif}} = 0.042 \\ \rho_f^{\text{dir}} &\approx 2\rho_s^{\text{dir}}(\theta_0, V/3) \end{aligned} \right\}.$$

Яркость выходящего из моря излучения на верхней границе атмосферы. Яркость света, рассеянного назад толщей воды и ослабленного в атмосфере L_w , можно записать в виде

$$L_w = 0.533 \pi^{-1} \rho_w T(\mu) E,$$

где 0.533 – коэффициент, учитывающий изменение яркости на границе раздела вода/воздух; ρ_w – коэффициент яркости воды (под поверхностью).

Как показано в [16, 17], коэффициент яркости моря мало зависит от условий освещения и с точностью $\pm 5\%$ может быть принят равным

$$\rho_w = 0.275X, \quad (11)$$

где $X = b_b / (a + b_b)$, a и b_b – показатели поглощения и обратного рассеяния света в воде.

Расчет величины L_w ведется на базе экспериментальных данных Мореля и Приера по спектрам коэффициентов отражения толщи воды, представленных в [3], в виде зависимостей $R(\lambda)$ в видимой области спектра ($\lambda = 400\text{--}700$ нм) для нескольких типов вод: «голубых» (наиболее чистые воды открытого океана) и «зеленых» – типа 1 и типа 2 по классификации Мореля. Поэтому естественно принять используемую этими авторами модель

$$R = 0.33b_b / a \approx 0.33X. \quad (12)$$

Отсюда требуемая величина ρ_w может быть определена из (11) и (12) как

$$\rho_w = 0.83R. \quad (13)$$

Для расчета яркости L_w и контраста в ИК- и УФ-областях спектра мы экстраполировали на эту область экспериментальные данные Мореля и Приера по $R(\lambda)$, используя формулу (12). Для расчета показателей поглощения a и обратного рассеяния b_b используем модель Копелевича оптических свойств воды [18]:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_y(\lambda) + a_c(\lambda), \quad (14)$$

$$b_b(\lambda) = 0.5b_w(\lambda) + b_{bp}(\lambda), \quad (15)$$

где a_w , a_y , a_c (1/м) – показатели поглощения чистой воды, желтого вещества и хлорофилла соответственно; b_w – показатель рассеяния чистой воды, b_{bp} – показатель обратного рассеяния взвеси. Данные о $a_w(\lambda)$ и $b_w(\lambda)$ мы брали из работ [19, 20] соответственно. Остальные параметры рассчитывались по формулам [18, 21, 22]:

$$a_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \exp[-0.014(\lambda - \lambda_0)], \quad (16)$$

$$a_c(\lambda_0) = a_c(440\text{нм}) a_c^*(\lambda_0), \quad (17)$$

$$a_c(440) = \begin{cases} 0.018C (C < 1 \text{ мг/м}^3) \\ 0.07C (C > 1 \text{ мг/м}^3), \end{cases} \quad (18)$$

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) (\lambda_0 / \lambda), \quad (19)$$

где C – концентрация хлорофилла (в мг/м^3); безразмерные коэффициенты a_c^* для $\lambda = 400\text{--}700$ нм содержатся в таблицах [21]; $\lambda_0 = 400$ нм при экстраполяции на УФ-область и $\lambda_0 = 700$ нм при экстраполяции на ИК-область.

Для «зеленых» вод (типа 1 и 2 по классификации Мореля) экстраполяция производилась по следующему алгоритму: из [3] брали экспериментальные значения R

(400 нм), C , $a(400 \text{ нм})$ и $b_{bp}(400 \text{ нм})$ для различных станций. Далее, следуя [18], предполагали, что $a_c(300 < \lambda < 400) = a_c(400)$. После этого, пользуясь таблицами для $a_w(\lambda)$ [19] и $b_w(\lambda)$ [20] и для $a_c^*(\lambda)$ [21], а также формулами (12)–(19), получали значения R и ρ_w для УФ-области ($300 \text{ нм} < \lambda < 400 \text{ нм}$).

Для «голубых» (по классификации Мореля) вод алгоритм упрощается, так как в этом случае мы предполагаем, что $a_y = a_c = 0$.

Данные по R на ИК-область экстраполируются по тому же алгоритму с тем же предположением, что $a_y = a_c = 0$, но с той лишь разницей, что значение $\lambda_0 = 400 \text{ нм}$ заменяется на $\lambda_0 = 700 \text{ нм}$.

Результаты расчетов. Результаты расчетов контрастов в спектральном диапазоне 300–800 нм для различных типов вод, мутности атмосферы, высоты Солнца и скорости приводного ветра по приведенному выше алгоритму показаны на рис.1–6.

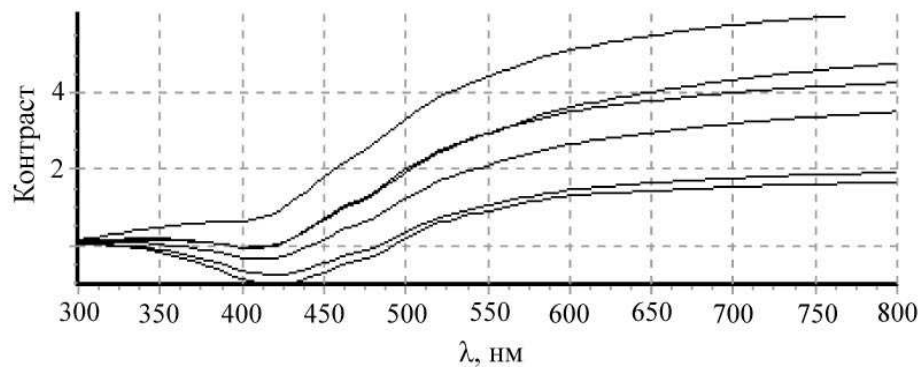


Рис.1. Спектральная зависимость контраста нефтяной пленки при наблюдении из космоса для «голубых» вод. Зенитный угол Солнца 45°.

Кривые сверху вниз (здесь и на рис.2–6) относятся к следующим значениям скорости ветра V и оптической плотности атмосферы τ_a : 1) $V = 6 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.4$; 2) $V = 10 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.4$; 3) $V = 20 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.4$; 4) $V = 6 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.07$; 5) $V = 10 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.07$; 6) $V = 20 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.07$.

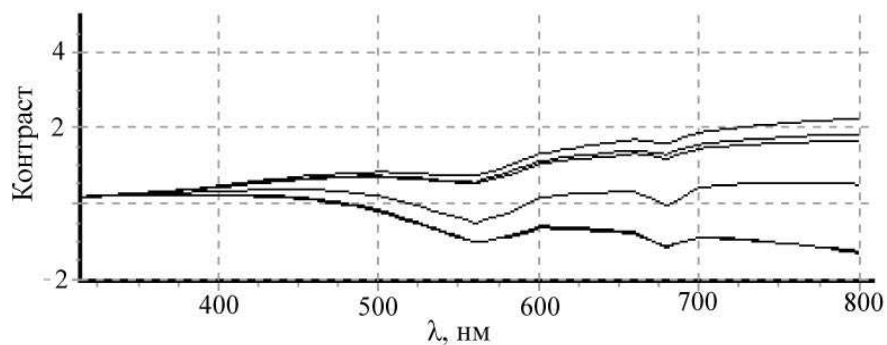


Рис.2. Спектральная зависимость контраста нефтяной пленки при наблюдении из космоса для «голубых» вод. Зенитный угол Солнца 20°.

1) $V = 20 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.07$; 2) $V = 20 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.4$; 3) $V = 10 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.07$; 4) $V = 10 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.4$; 5) $V = 6 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.4$; 6) $V = 6 \text{ м/с}$, $\tau_a = 0.07$.

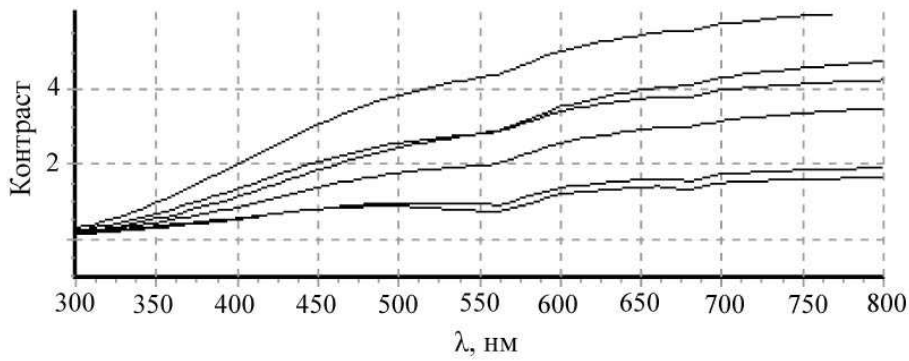


Рис.3. Спектральная зависимость контраста нефтяной пленки при наблюдении из космоса для «зеленых» вод «Case 1» по классификации Мореля и Приера. Зенитный угол Солнца 45°. 1) $V = 6$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 2) $V = 10$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 3) $V = 20$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 4) $V = 6$ м/с, $\tau_a = 0.07$; 5) $V = 10$ м/с, $\tau_a = 0.07$; 6) $V = 20$ м/с, $\tau_a = 0.07$.

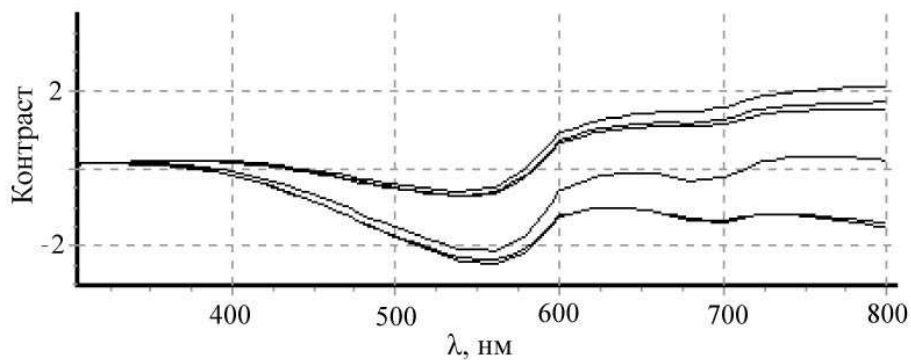


Рис.4. Спектральная зависимость контраста нефтяной пленки при наблюдении из космоса для «зеленых» вод «Case 1» по классификации Мореля и Приера. Зенитный угол Солнца 20°. 1) $V = 20$ м/с, $\tau_a = 0.07$; 2) $V = 20$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 3) $V = 10$ м/с, $\tau_a = 0.07$; 4) $V = 10$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 5) $V = 6$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 6) $V = 6$ м/с, $\tau_a = 0.07$.

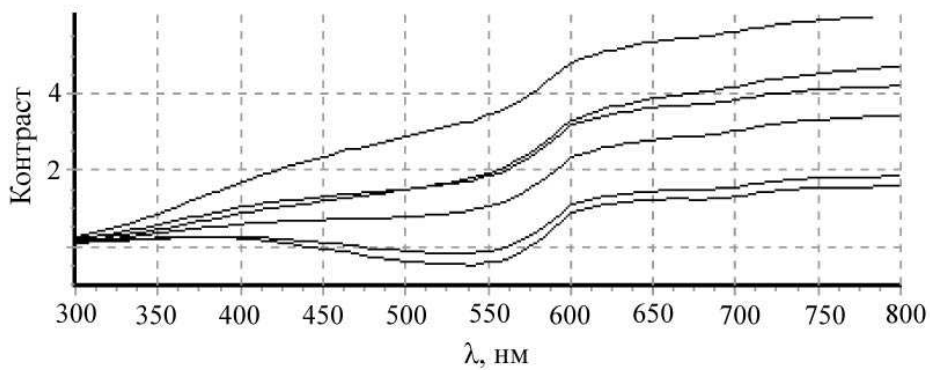


Рис.5. Спектральная зависимость контраста нефтяной пленки при наблюдении из космоса для «зеленых» вод «Case 2» по классификации Мореля и Приера. Зенитный угол Солнца 45°. 1) $V = 6$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 2) $V = 10$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 3) $V = 20$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 4) $V = 6$ м/с, $\tau_a = 0.07$; 5) $V = 10$ м/с, $\tau_a = 0.07$; 6) $V = 20$ м/с, $\tau_a = 0.07$.

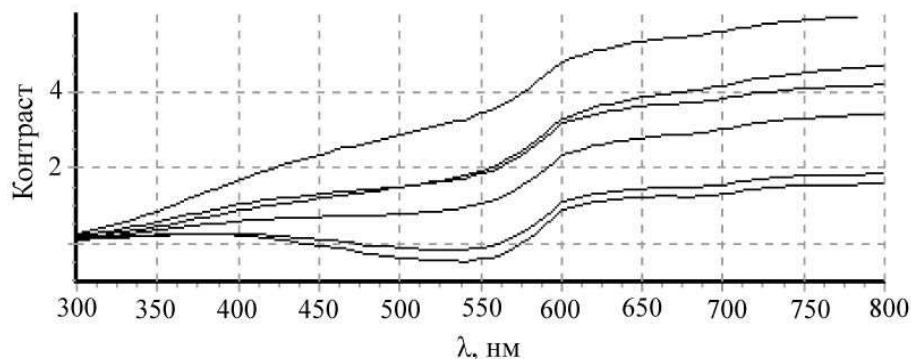


Рис.6. Спектральная зависимость контраста нефтяной пленки при наблюдении из космоса для «зеленых» вод типа «Case 2» по классификации Мореля и Приера. Зенитный угол Солнца 20° .

- 1) $V = 20$ м/с, $\tau_a = 0.07$; 2) $V = 20$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 3) $V = 10$ м/с, $\tau_a = 0.07$; 4) $V = 10$ м/с, $\tau_a = 0.4$;
5) $V = 6$ м/с, $\tau_a = 0.4$; 6) $V = 6$ м/с, $\tau_a = 0.07$.

Из рис.1–6 можно сделать следующие выводы.

1. Для всех типов вод контраст при уходе в УФ-область уменьшается и стремится к нулю при $\lambda \rightarrow 300$ нм. Причина этого очевидна: сильное возрастание атмосферной составляющей сигнала при уменьшении длины волны.
2. Максимальные значения контраста во всех случаях находятся в длинноволновой области спектра (600–700 нм), причем для зенитных углов Солнца 20° , как правило, контраст выше, чем для 45° .
3. При зенитных углах Солнца 45° изменение мутности аэрозольной атмосферы от $\tau_a = 0.07$ до 0.4 в длинноволновой области спектра приводит к изменению знака контраста, т.е. при некоторой мутности атмосферы контраст окажется равным нулю.

Результаты расчетов показали, что при наблюдении нефтяных загрязнений поверхности моря из космоса во всех случаях предпочтение следует отдавать наблюдению при высоком Солнце. Контраст пленка–вода меняет знак при изменении скорости ветра и при изменении мутности атмосферы либо в длинноволновой, либо в коротковолновой области спектра, но не одновременно по всему спектру. Поэтому во избежание нулевых контрастов необходимо проводить наблюдения на менее чем в двух областях, например при 600–700 и вокруг 450 нм. Абсолютная величина контрастов хотя бы в одном из участков спектра всегда достаточно велика, поэтому можно утверждать, что при использовании нескольких спектральных каналов возможно наблюдение нефтяных пленок на поверхности воды при скоростях ветра от 6 до 20 м/с и зенитных углах Солнца от 0 до 45° . При этом наибольшие значения контраста соответствуют более высоким скоростям ветра и более высокому Солнцу.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-05-00311.

Литература

1. Osadchy V.U., Shifrin K.S., Gurevich I.Ya. Remote sensing and measurement of the thickness of oil films on the sea surface using the reflectivity contrast// SPIE Proceed. Ocean Optics XII. 1994. V.2258. P.747–758.
2. Osadchy V.U., Shifrin K.S., Gurevich I.Ya. The airborne identification of oil films at the Caspian sea surface using CO₂ lidar //Oceanol. Acta. 1999. V.22, N 1. P.51–56.
3. Morel A., Prieur L. Analysis of variation in ocean color // Limnol. Oceanogr. 1977. V.22, N 4. P.709–722, 1977.

4. *Levin I.M.* Spectral contrast of oil films on the sea surface: influence of water type, wind velocity, and solar altitude // SPIE proceed. Ocean Optics XII. 1994. V.2258. P.759–767.
5. *Золотарев В., Китушина И., Сутовский С.* Оптические постоянные нефтей в диапазоне 0.4–15 мкм // Океанология. 1977. Т.17, № 6. С.1113–1117.
6. *Соболев В.В.* Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет. М.: ГИТТЛ, 1956.
7. *Levin I.M., Radomyslskaya T.M., Sheberstov S.V.* Simple optical model of atmosphere radiance for the problem of bottom imaging from air // Proc. of III International Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters». St. Petersburg, 2005. P.164–169.
8. *Gregg W.W., Carder K.L.* A simple spectral solar irradiance model for cloudless maritime atmospheres // Limnol. Oceanogr. 1990. V.35, N 8. P.1657–1675.
9. *Шифрин К.С.* Оптические свойства атмосферы над океаном // Рассеяние и поглощение света в природных и искусственных дисперсных средах. Минск, 1991. С.277–288.
10. *Gordon H.R., Castano D.J.* Aerosol analysis with the Coastal Zone Color Scanner: a simple method for including multiple scattering effects // Applied Optics. 1989. V.28, N 7. P.1320–1326.
11. *Ignatov A.* Estimation of the aerosol phase function from simultaneous satellite and sun-photometer measurements // J. Appl. Meteor. 1997. V.36, N 6. P.688–694.
12. *Левин И.М., Радомысльская Т.М., Шифрин К.С.* К расчету яркости системы океан–атмосфера при дистанционном зондировании // Исследования Земли из космоса. 1987. № 5. С.25–29
13. *Cox C., Munk W.H.* Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter // Scripps Inst. of Oceanogr. Bull. 1956. V.6, N 9. P.401–479.
14. *Мулламаа Ю.-А.Р.* Атлас оптических характеристик взволнованной поверхности моря. Тарту, 1964.
15. *Долин Л.С., Левин И.М.* Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеоздат, 1991.
16. *Левин И.М.* Коэффициент яркости моря: оценка точности квазиоднократного приближения // Океанология. 1998. Т.38, № 6. С.946–949.
17. *Dolin L., Gilbert G., Levin I., Luchinin A.* Theory of imaging through wavy sea surface. N.Novgorod: Institute of Applied Physics publ., 2006.
18. *Копелевич О.В.* Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. М.: Наука, 1983. С.208–236.
19. *Pope R.M., Fry E.S.* Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // Applied Optics. 1997. V.36, N 33. P.8710–8723.
20. *Smith R.C., Baker K.S.* Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // Appl. Opt. 1981.V.20, N 2. P.177–184.
21. *Prieur L., Sathyendranath S.* An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption of phytoplankton pigments, dissolved organic matter and other particulate materials // Limnol. and Oceanogr. 1981.V.26, N 4. P.671–689.
22. *Sathyendranath S., Prieur L., Morel A.* A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters // Int. J. Remote Sensing. 1989. V.10, N 8. P.1373–1394.

Статья поступила в редакцию 24.02.2012 г.

