

Н.Е.Лебедев

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРИВОДНОГО ВЕТРА
И СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ПО ИЗЛУЧЕНИЮ, РЕГИСТРИРУЕМОМУ СПУТНИКОВЫМИ
ОПТИЧЕСКИМИ СКАНЕРАМИ В ЗОНЕ СОЛНЕЧНОГО БЛИКА**

Проанализированы возможности расчета скорости приводного ветра и определения степени загрязненности участков морской поверхности в зоне солнечного блика по его оптическим спутниковым изображениям в ближнем ИК – диапазоне. Оценка точности скорости ветра наилучшая (на уровне 0,5 – 1 м/с) в области блика с границами яркости 0,7 – 0,8 от его максимума. Предложен новый способ количественной оценки загрязнений морской поверхности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *спутниковые измерения, солнечный блик, приводный ветер, загрязнения.*

Введение. В настоящее время по солнечно-синхронным орбитам движется несколько серий метеоспутников, регистрирующих восходящее излучение системы океан-атмосфера в видимом и ИК-диапазонах.

По данным их наблюдений в видимой части спектра восстанавливают цветность моря, содержание хлорофилла, оптическую толщину аэрозольного рассеяния. Эти измерения требуют достаточно высокой освещенности исследуемого участка акватории, каковая обеспечивается выбором местного времени пролета спутником экватора, близким к полудню. Но при этом на водной поверхности неизбежно присутствует зона солнечного блика шириной несколько сотен километров, где основным слагаемым, многократно превосходящим прочие составляющие суммарной яркости и крайне затрудняющим решение перечисленных задач, является отраженное от поверхности прямое солнечное излучение.

Яркость и ширина блика зависят от отражающих свойств поверхности и ее шероховатости. Отражающие свойства поверхности зависят от степени ее чистоты/загрязнения, шероховатость – от скорости приводного ветра и наличия загрязнений. Таким образом, яркость солнечного блика несет информацию о скорости приводного ветра и степени загрязненности морской поверхности. Количественному анализу возможностей их определения в зоне блика и посвящена данная работа.

В ней приняты следующие упрощения: атмосфера свободна от облачности; волнение ветровое; обрушения волн отсутствуют; не учитываются эффекты поляризации и излучение, рассеянное вверх водной толщей. Для минимизации влияния процессов обратного рассеяния излучения водной толщей используются данные излучения в ближнем ИК-диапазоне, где коэффициент поглощения воды на 2 – 3 порядка больше, чем в видимом [1].

Отражение излучения взволнованной водной поверхностью. Ее можно представить совокупностью зеркально отражающих элементарных площадок – фасетов различных ориентаций с весами, задаваемыми распре-

© Н.Е.Лебедев, 2013

делением уклонов фасетов и направлением визирования спутникового. Вследствие его ненулевого угла зрения и большой удаленности от моря, в фотоприемник попадает, суммируясь, излучение множества фасетов. В первом приближении плотность вероятности уклонов поверхности описывается изотропной гауссовой функцией распределения:

$$P(\theta_n, V) = \pi^{-1} \sigma^{-2}(V) \exp[-\tan^2(\theta_n)/\sigma^2(V)], \quad (1)$$

где θ_n – зенитный угол наклона нормали фасета $\mathbf{n}$, σ – среднеквадратичный уклон поверхности, который связан с $V_{12,5}$ – скоростью ветра (м/с) на 12,5-метровой высоте – эмпирическим соотношением [2]:

$$\sigma^2(V) = 0,003(0,008) + 0,00512(0,00156)V_{12,5}. \quad (2)$$

В скобках даны значения для искусственного слика (машинное масло, дизтопливо, рыбий жир в соотношении 4 : 4 : 2) толщиной около 2 мкм.

В [3] на основе анализа четырех серий натурных измерений разных авторов по чистой морской воде получена связь σ^2 с V_{10} (на высоте 10 м) вида:

$$\sigma^2(V) = 0,00534(0,00163)V_{10}. \quad (3)$$

В скобках приведен пересчитанный из (2) коэффициент пропорциональности для V_{10} при наличии загрязнений. В расчетах будем использовать (3), поскольку при $V_{12,5} < 1,4$ м/с, согласно (2), чистая поверхность оказывается выглаженной более загрязненной, что неверно.

Формирование излучения системы океан-атмосфера на уровне спутника. Основных слагаемых яркости I_{rTOA} (TOA: *top of atmosphere*) этого излучения всего четыре, они схематически представлены на рис. 1:

1) I_{rsTOA} – порожденное отражением в направлении $\mathbf{r}$ на спутник взволнованной поверхностью прямого солнечного излучения из направления $\mathbf{s}$, оно и формирует зону солнечного блика;

2) I_{rdTOA} – порожденное отражением на спутник взволнованной поверхностью рассеянного атмосферой в направлениях $\mathbf{d}$ солнечного излучения;

3) $I_{rr'sTOA}$ – порожденное отражением взволнованной поверхностью в направлениях $\mathbf{r}'$ прямого солнечного излучения, далее рассеянного атмосферой в сторону спутника;

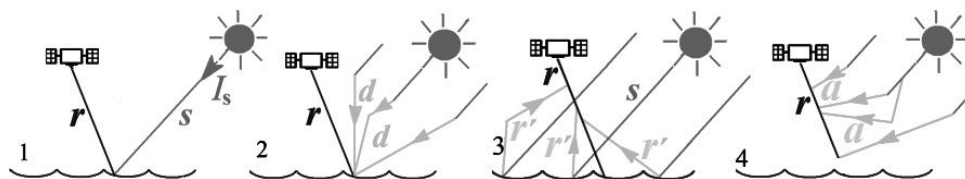
4) I_{raTOA} – порожденное рассеянием атмосферой вверх в сторону спутника солнечного излучения:

$$I_{rTOA} = I_{rsTOA} + I_{rdTOA} + I_{rr'sTOA} + I_{raTOA}. \quad (4)$$

Рассмотрим их аналитические выражения. Яркость отраженного фасетом из направления $\mathbf{d}$ в $\mathbf{r}$ излучения $I_r(\mathbf{r}, \mathbf{d})$ на уровне моря равно [2, 3]:

$$I_r(\mathbf{r}, \mathbf{d}) = (4\mu_r\mu_n^4)^{-1} P(\theta_n, V) \rho(\omega) dH_d(\mathbf{d}, \mathbf{s}) G(\theta_r, \theta_d), \quad (5)$$

где $\mu_x = \cos(\theta_x)$; $\theta_r, \theta_n, \theta_d, \theta_s$ – зенитные углы: восходящего излучения, норма-



Р и с . 1 . Схематическое представление: 1) I_{rsTOA} , 2) I_{rdTOA} , 3) $I_{rr'sTOA}$, 4) I_{raTOA} .

ли к фасету $\mathbf{n}$, нисходящего рассеянного излучения, солнца; $\rho(\omega)$ – френелевский коэффициент отражения поверхности для угла $\omega(\mathbf{r}, \mathbf{d})$ падения на фасет, рассчитываемый по значениям комплексного показателя преломления воды [1] или нефти [4], причем оптические свойства пленок нефти менее 100 мкм практически такие же, как у воды; $G(\theta_r, \theta_d)$ [3] – корректирующий множитель проявляющегося при $\theta_{r,d} = 80 - 90^\circ$ эффекта затенения (когда участки более далеких от наблюдателя волн перекрыты участками волн более близких) и преодолевающий сингулярность в (5) при $\theta_r \rightarrow 90^\circ$; $dH_d(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ – нисходящий в направлении $\mathbf{d}$ элемент спектральной освещенности, связанный с яркостью $I_d(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ соотношением:

$$dH_d(\mathbf{d}, \mathbf{s}) = I_d(\mathbf{d}, \mathbf{s})d\Omega_d, \quad d\Omega_d = daz_{rd}d\mu_d; \quad \text{при } \mathbf{d} = \mathbf{s}: H_d(\mathbf{d}, \mathbf{s}) = H_s(\mathbf{s}) = I_s(\mathbf{s})\Omega_s,$$

где Ω_s – телесный угол солнца; $H_s(\mathbf{s}) = E_0 \exp(-\tau_b \mu_s^{-1})$, E_0 – внеатмосферная спектральная солнечная постоянная, $\exp(-\tau_b \mu_s^{-1})$ – пропускание атмосферы в направлении $\mathbf{s}$, τ_b – суммарная (бугеровская) оптическая толщина атмосферы.

Из (5) получаются выражения для I_{rsTOA} , I_{rdTOA} , $I_{rr'sTOA}$:

$$\begin{aligned} I_{rsTOA}(\mathbf{r}) &= E_0 \exp[\tau_b(\mu_s^{-1} + \mu_r^{-1})](4\mu_r\mu_{ns}^4)^{-1}P(\theta_{ns}, V)\rho(\omega_s)G(\theta_r, \theta_s), \\ I_{rdTOA}(\mathbf{r}) &= \exp(-\tau_b\mu_r^{-1})\mu_r^{-1} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \mu_n^{-4} \cos(\omega)P(\theta_n, V)\rho(\omega)I_d(\mathbf{d}, \mathbf{s})G(\theta_r, \theta_d)d\alpha_{rn}d\mu_n, \\ I_{rr'sTOA}(\mathbf{r}) &= \int_0^1 \int_0^{2\pi} \exp(-\tau_b\mu_{r'}^{-1})\mu_{r'}^{-1}\mu_{n'}^{-4} \cos(\omega')P(\theta_{n'}, V)\rho(\omega')I_d(\mathbf{r}, \mathbf{r}')G(\theta_{r'}, \theta_s)d\alpha_{n's}d\mu_{n'}. \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{r}'$ суть направление отраженного излучения, по которому производится интегрирование, соответствующее нормали к фасету $\mathbf{n}'$; α_{xy} – угол между проекциями $\mathbf{x}$ и $\mathbf{y}$ на горизонтальную плоскость.

Величина I_{raTOA} получается заменой в $I_d(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ $\mathbf{d}$ на $\mathbf{r}$: $I_{raTOA} = I_d(\mathbf{r}, \mathbf{s})$.

Углы ω , ω_s , θ_{ns} , θ_r , θ_d определяются средствами сферической тригонометрии из известных θ_n , θ_r , θ_s , α_{rn} , $\alpha_{n's}$, Az_r , Az_s .

Расчет I_{rdTOA} , $I_{rr'sTOA}$, I_{raTOA} требует знания углового распределения рассеянного атмосферой солнечного излучения $I_d(\mathbf{d}, \mathbf{s})$. В целях данного исследования пригодны модели I_d Лифшица [5], Соколова [6], Соболева [7, 8]. Они выражены через суммарные индикатрисы рассеяния, оптические параметры атмосферы и альbedo подстилающей поверхности и учитывают как однократное, так и многократное рассеяние излучения в атмосфере. В большинстве ситуаций эти модели дают сходные результаты в пределах 20 - 40 %. Для краткости изложения вид $I_d(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ здесь не приводится.

Для вычислений I_d необходимо знание рэлеевской оптической толщи τ_R , оптической толщи озонового поглощения τ_{O3} , оптической толщи аэрозольного рассеяния τ_a , альbedo однократного рассеяния ω_1 , суммарной индикатрисы рассеяния Φ . Величины τ_R , τ_{O3} рассчитываются согласно [9], Φ – согласно [8]. Данные τ_a , ω_1 доступны из сети станций Aeronet [10], τ_a – также по спутниковым измерениям [11].

Алгоритмы определения V и степени загрязненности поверхности.

Авторы [12] решили задачу определения V в зоне блика по измерениям I_{rTOA} для двух точек спутникового снимка, находящихся на одной изобаре (соответственно, здесь необходима карта изобар), при нескольких упрощающих предположениях: 1) $I_{rTOA} = I_{rsTOA} + I_{raTOA}$, 2) I_{raTOA} для данной пары точек не-

изменна, 3) пропускание атмосферы в направлении от спутника на точки данной пары неизменно. Среднеквадратичное отклонение известной V от расчетной по 58 парам точек составило 0,5 м/с. Наша модель, позволяя проводить расчет V не по паре точек, а по одной, не использует такие упрощения и можно ожидать, что она будет более универсальной и не менее точной. Хотя в ее рамках вносящими некоторую неопределенность в результаты расчетов являются параметры атмосферы τ_{O3} , τ_a , ω_1 , Φ , которые не вполне известны (так, Φ задается модельно).

Прямая задача расчета I_{rTOA} многопараметрична – она производится при одновременном известных V , $\sigma(V)$ и $\rho(\omega)$, поэтому обратные задачи: расчета V , определения наличия загрязнений (по величине $\sigma(V)$) и их интенсивности (по величине $\rho(\omega)$) – невозможно решать все одновременно, т.е. возможен либо расчет V над априори чистой поверхностью, либо определение степени загрязнения при известной величине V .

Определение V над участком чистой водной поверхности сводится к нахождению такой ее величины, при которой I_{rTOA} (4) равна ее значению из массива спутниковых данных для этого участка. В дальнейшее развитие этого способа следует отнести привлечение анизотропной плотности вероятности ветровых уклонов [2] с замечаниями, изложенными в [13].

Предлагается определение степени загрязнения морской поверхности исходя из следующего. Нефтяные загрязнения понижают коэффициент поверхностного натяжения и выглаживают водную поверхность, так что вблизи центра блика они выглядят светлее фона, а на периферии – темнее. При этом в широком интервале толщин загрязнений коэффициент поверхностного натяжения меняется слабо [14] и можно положить, что $\sigma^2(V)$ имеет не зависящий от толщины загрязнения вид $\sigma^2(V) = 0,00163V_{10}$ (см. (3)).

Френелевский коэффициент отражения с достаточной точностью аппроксимируется выражением:

$$\rho(\omega) \approx \rho_a(\omega) = \rho_0 + (1 - \rho_0)[\exp(m\omega) - 1]/[\exp(m\pi/2) - 1], \quad (6)$$

где ρ_0 – коэффициент отражения для $\omega = 0$, m – параметр аппроксимации. В ближнем ИК-диапазоне (0,86 мкм 2-го канала спутников MODIS) для воды и нефти соответственно $\rho_0 = 0,02$ и $0,037$, $m = 6,25$ и $5,8$. Исходя из этого, степень загрязнения участка водной поверхности предлагается характеризовать такой величиной ρ_0 , при которой рассчитанная по (4) с привлечением (6) I_{rTOA} равна ее значению из массива спутниковых данных для этого участка: чем больше ρ_0 , тем больше степень его загрязнения. При этом величина V определяется по соседнему чистому участку поверхности либо берется из внешних источников – спутниковых скаттерометрических измерений, модельных расчетов. Параметр m (6) можно положить равным 6 – в этом случае его величина относительно заметно влияет на разность $\rho_a(\omega) - \rho(\omega)$ в диапазоне $\omega = 40 - 80^\circ$, малосущественном для конечного результата.

Участки блика и ситуации, благоприятные для определения V и степени загрязненности поверхности. Благоприятными являются участки, где $|dI_{rsTOA}/dV|$ и $|dI_{rsTOA}/d\rho_0|$ максимальны. Расчеты показали следующее.

Максимум $|dI_{rsTOA}/dV|$ находится в центральной части блика; с ростом V и углового расстояния между подспутниковой и подсолнечной точками β_{cs} он смещается в сторону подспутниковой точки, так что «подспутниковый»

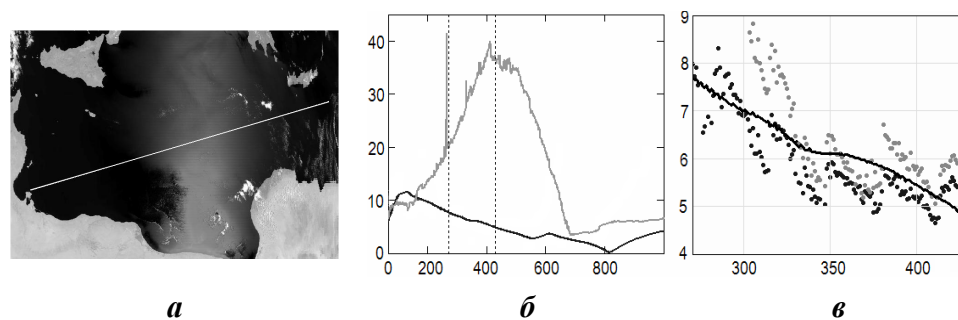
склон блика более благоприятен для определения V , чем «подсолнечный». Полуширина I_{rsTOA} больше, чем $|dI_{rsTOA}/dV|$, примерно в 1,7 раза, так что участком блика, благоприятным для определения V является участок с границами яркости 0,7 (ближе к подспутниковой точке) – 0,8 (ближе к подсолнечной точке) от максимума блика.

Угловой ход $|dI_{rsTOA}/d\rho_0|$ практически совпадает с ходом I_{rsTOA} , а ее величины достаточно велики для уверенного распознавания загрязнений на том участке блика, где $I_{rsTOA} > I_{raTOA}$.

С ростом V или β_{cs} происходят уширение бликовой составляющей и её производных наряду с уменьшением их абсолютных значений. Поэтому для Черного моря более благоприятными по времени ситуациями являются летние.

Предварительные результаты определения V по спутниковым данным. Тестирование предлагаемого способа определения V было проведено путем сопоставления величины V , полученной по спутниковым данным *MODIS-Terra* от 25 июля 2008 г. юго-восточной части Средиземного моря (с выраженной неоднородностью ω_1), с ветровыми данными, рассчитанными по модели *SKIRON*, для двух величин τ_a 0,1 и 0,2, между которыми, согласно [11], находится истинная величина τ_a . На «подспутниковом» (восточном) склоне блика получены значения V , отличающиеся от ветровых данных *SKIRON*, в среднем на 0,5 – 1 м/с (рис.2).

Выводы. Предложены способы расчета скорости приводного ветра и определения степени загрязненности участков морской поверхности в зоне солнечного блика по его оптическим спутниковым изображениям в ближнем ИК – диапазоне. Оценка точности скорости ветра наилучшая (в среднем на уровне 0,5 – 1 м/с) в области блика с границами яркости 0,7 – 0,8 от его максимума. Количественная оценка загрязнений морской поверхности возможна на всем участке блика, где $I_{rsTOA} > I_{raTOA}$.



Р и с . 2 . Фрагмент снимка спутника *MODIS-Terra* от 25 июля 2008 г. и разрез, вдоль которого производилось сопоставление рассчитанных по модели *SKIRON* и по спутниковым данным величин V , м с⁻¹ (а); спутниковые данные I_{rsTOA} , Вт м⁻²мкм⁻¹ср⁻¹ (серая кривая), V по *SKIRON* (черная кривая) (б); V по *SKIRON* (черная кривая), V по спутниковым данным при $\tau_a = 0,1$ (черные точки), то же при $\tau_a = 0,2$ (серые точки) для фрагмента разреза, выделенного на рис. б пунктирами (в). На осях абсцисс графиков отложены порядковые номера пикселей вдоль скана, возрастающие от востока на запад.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hale G.M., Query M.R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region // *Applied Optics*.– 1973.– v.12, № 3.– P.555-563.
2. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // *JOSA*.– 1954.– v.44, № 11.– P.838-850.
3. Nakajima T., Tanaka M. Effect of wind-generated waves on the transfer of solar radiation in the atmosphere – ocean system // *J. Quant. Spect. Rad. Trans.*– 1983.– v.29. – P.521-537.
4. Золотарева В.М., Китушина И.А., Сутовский С.М. Оптические характеристики нефтей в диапазоне 0,4 – 15 мкм // *Океанология*.– 1977.– т.17, № 6.– С.1113-1117.
5. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля.– Л.: Гидрометеоздат, 1987.– 182 с.
6. Соколов Б.З. Расчет спектральной яркости дневной атмосферы Земли // *Измерительная техника*.– 2001.– № 9.– С.40-43.
7. Соболев В.В. Рассеяние света в атмосферах планет.– М.: Наука, 1972.– 335 с.
8. Zibordi G., Voss K.J. Geometrical and spectral distribution of sky radiance - Comparison between simulations and field measurements // *Remote Sensing of Environment*.– 1989– v.27.– P.343-358.
9. Woźniak B., Krężel A., Darecki M., et al. Algorithm for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 1: Mathematical apparatus // *Oceanologia*.– 2008.– v.50, № 4.– P.451-508.
10. http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/type_one_station_opera_v2_new
11. http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=MODIS_DAILY_L3
12. Wald L., Monget J.M. Sea surface winds from sun glitter observations // *J. Geophys. Res.*– 1983.– v.88, C4.– P.2547-2555.
13. Запєвалов А.С., Пустовойтенко В.В. Моделирование плотности вероятности уклонов морской поверхности в задачах рассеяния радиоволн // *Известия вузов. Радиофизика*.– 2010.– т.53, № 1.– С.1-12.
14. Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Гуцин Л.А. Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* / Ред. Е.А.Лупян, О.Ю.Лаврова.– М.: ООО “Азбука-2000”, 2006.– т.2, вып.3.– С.86-98.

Матеріал надійшов в редакцію 16.07.2013 г.

АНОТАЦІЯ Проаналізовано можливості розрахунку швидкості приводного вітру і визначення ступеня забрудненості ділянок морської поверхні в зоні сонячного відблиску за його оптичним супутникових зображень в ближньому ІЧ-діапазоні. Оцінка точності швидкості вітру найкраща (на рівні 0,5 – 1 м/с) в області відблиску з межами яскравості 0,7 – 0,8 від його максимуму. Запропоновано новий спосіб кількісної оцінки забруднень морської поверхні.

ABSTRACT The possibilities of calculating the wind speed and the extent of contamination of areas of the sea surface in the solar flare zone are analysed on its optical satellite imagery in the near infrared range. The assessment of wind velocity accuracy (at 0,5 – 1 m/s) at the boundaries of highlight luminance 0,7 – 0,8 of its maximum is the best. A new method for quantification of pollution of the sea surface is proposed.