Новый критерий выбора методов дистанционного зондирования растворенных органических веществ в береговых водах

A new criterion for selecting methods of remote sensing of organic substances in coastal waters

Асадов / Asadov H.
Хикмет Гамид оглы
(asadzade@rambler.ru)
доктор технических наук, профессор.
НИИ Аэрокосмической информатики
Национального аэрокосмического агентства,
начальник отдела.
г. Баку

Абдуллаева / Abdullaeva L.
Латифа Джафарага гызы
(latifa.abdullayeva@mail.ru)
НИИ Аэрокосмической информатики
Национального аэрокосмического агентства,
ведущий научный сотрудник.
г. Баку

Ключевые слова: растворенные органические вещества – dissolved organic substances; отраженная радиация – reflected radiation; дистанционное зондирование – remote sensing; оптимизация – optimization; функционал – functions.

Статья посвящена разработке нового критерия выбора методов дистанционного зондирования растворенных органических веществ в береговых водах. Показан экстремальный характер отраженной от дна оптической радиации в береговых зонах в зависимости от расстояния до берега. Дана среднеинтегральная оценка отраженной от дна оптической радиации в береговых зонах. Предложен модифицированный критерий выбора методов дистанционного зондирования растворенных органических веществ в береговых зонах морей.

This article is devoted to the development of a new criterion for selecting methods of remote sensing of organic substances in coastal waters. The authors show an extreme behavior of the optical radiation reflected from the seabed in coastal waters depending on the distance to the coast, and deliver an average integrated evaluation of the optical radiation reflected from the seabed in coastal waters. The authors represent a modified criterion for selecting methods of remote sensing of organic substances in sea coastal waters.

Введение

Как отмечено в работе [1], окрашенные растворенные органические вещества (CDOM) определяются в качестве фотоактивных фракций растворенных органических веществ в воде. Коэффициент поглощения оптических лучей у этих веществ высок в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне и уменьшается до нуля в красной зоне электромагнитного спектра [2]. По этой причине для дистанционного зондирования CDOM часто используется длина волны 440 нм [1, 3, 4]. Концентрацию CDOM часто представляют в качестве показателя распространения органического углерода в водной среде, следовательно дистанционное зондирование CDOM важно для изучения цикла круговорота углерода в пространстве взаимодействия водной и земляной среды.

Основной проблемой при осуществлении дистанционного зондирования CDOM в неглубоких участках береговых вод и рек является влияние отражения зондирующего луча от дна водоема [5, 6]. Это обстоятельство диктует необходимость соответствующего учета отраженной от дна оптического излучения при дистанционном зондировании неглубоких береговых зон водоемов.

Вместе с тем известны специальные методы и алгоритмы проведения дистанционного зондирования как на глубоководных участках, так и на береговых неглубоководных зонах. Известен специальный показатель, названный коэффициентом влияния дна (*bottom effect index* – сокращенно BEI), который позволяет с определенной точностью определить оптически глубокие воды от оптически неглубоких [7]. Однако, как показывают проведенные исследования, при практическом использовании данного показателя обнаруживается большой разброс его значений, что создает неопределенность при выборе методов дистанционного зондирования в одной среде.

Настоящая статья посвящена разработке новых модифицированных коэффициентов влияния дна, позволяющих уменьшить вышеуказанную неопределенность.

Конкретно методы дистанционного зондирования CDOM в глубоких и неглубоких водах в настоящей статье не рассматриваются. Эти методы подробно изложены в работах [3–7].

3 2018.indd 111 26.09.2018 10:05:04

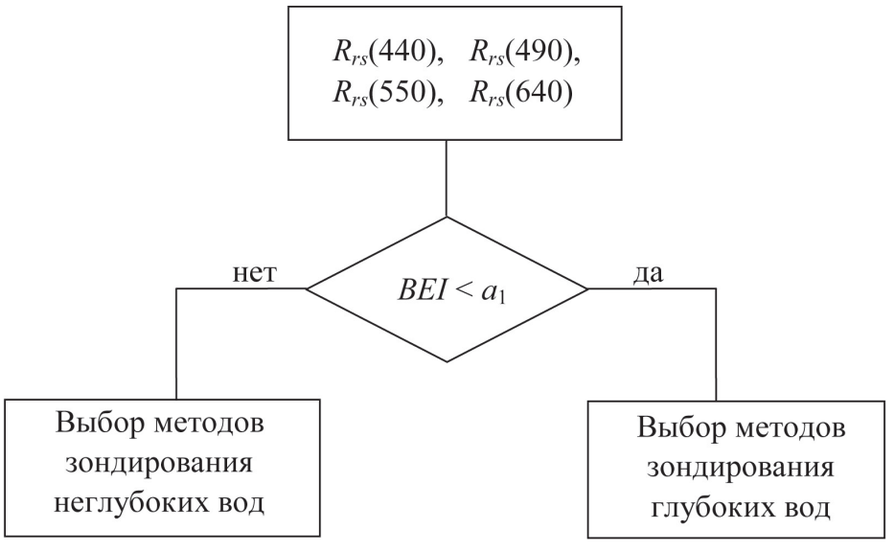

Рис. 1. Блок-схема алгоритма выбора методов дистанционного зондирования CDOM в водной среде, a_1 – условная пороговая величина, используемая для принятия решения

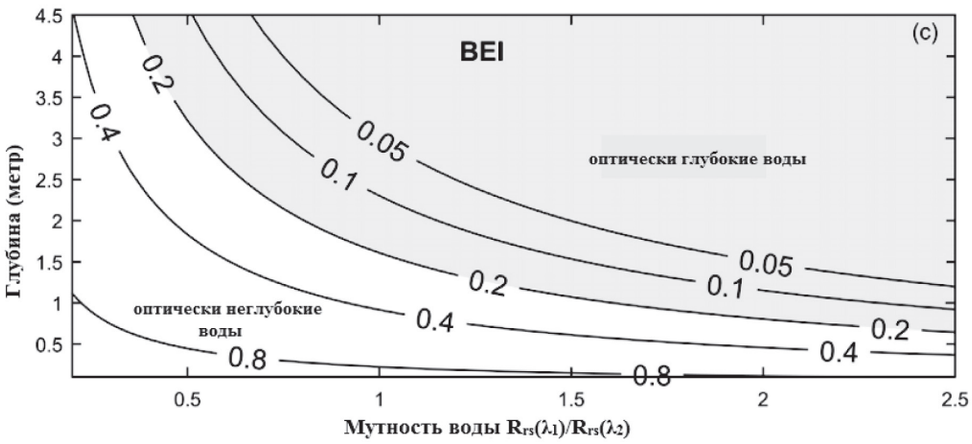

Рис. 2. Графическое отображение разделения водной среды на «оптически глубокие» и «оптически неглубокие» зоны

3 2018.indd 112 26.09.2018 10:05:05

Предлагаемый метод

Согласно [7], коэффициент влияния дна (BEI) определяется как

$$BEI = \exp\left[-\left(\frac{R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2)}\right)\cdot H\right] \quad (1)$$

где: H – глубина воды; $R_{rs}(\lambda)$ – отраженное от водной среды оптическое излучение; $\lambda_1 = 690$ нм; $\lambda_2 = 555$ нм.

Согласно [8, 9] отношение $R_{rs}(690)/R_{rs}(555)$ является показателем мутности водной среды.

Согласно [7], выбор того или другого метода дистанционного зондирования CDOM определяется на базе отсчетов $R_{rs}(440)$, $R_{rs}(490)$, $R_{rs}(550)$, $R_{rs}(640)$, а также вычисленного значения *BEI* по алгоритму, показанному на рис. 1.

Порядок выбора того или другого метода дистанционного зондирования водной среды с учетом или без учета отражения от дна иллюстрируется на рис. 2 [7].

Согласно [7], показатель $a_1 = 0{,}2$. Однако условность такого выбора a_1 вполне очевидна по следующим причинам. Как указывается в работе [10], более 90% общей отраженной оптической радиации при дистанционном зондировании неглубокой водной среды составляет отраженное от дна излучение и отраженная от водной толщины оптическая радиация.

Вышеуказанная первая составляющая определяется по следующей формуле [10]:

$$R_{rs}^{b} \approx 0{,}17\cdot\rho\cdot\exp\left[-(1{,}5+(D_d))\alpha\cdot H\right] \quad (2)$$

где: ρ – коэффициент отражения (альбедо) дна; D_d – функция распределения светового поля в направлении вниз; α – общий коэффициент поглощения; H – высота водного слоя.

Вышеуказанная вторая составляющая определяется по формуле

$$R_{rs}^{w} = \frac{0{,}176}{\alpha}\left[\frac{b_{bm}}{Q_m} + X\cdot\left(\frac{400}{\lambda}\right)^{y}\right] \quad (2)$$

где: b_{bm} – коэффициент обратного рассеяния молекул; $Q_m \approx 3{,}3$; x и y – спектральные константы.

Основная доля неопределенности вычисления значения пороговой величине a_1 связана с зависимостью значения ρ от расстояния до береговой линии.

Изменение величины ρ от расстояния до берега хорошо иллюстрируется графиками, показанными на рис. 3[10].

Зависимость значения ρ от расстояния до берега также отмечена в работе [11]. Согласно [11], однообразие типа дна в береговой зоне не соответствует действительности, что объясняется комплексным характером осадков и океанографических образцов на береговых участках водоемов.

Вместе с тем очевидно, что с увеличением расстояния до берега глубина морских вод будет расти. Таким образом, выражение (2) можно переписать как

$$R_{rs}^{b} \approx 0{,}17\cdot\rho(l)\cdot\exp\left[-(1{,}5+(D_d)\cdot\alpha\cdot H(l))\right] \quad (4)$$

Исследуем выражение (4) на экстремум. Для упрощения вычислений примем линейные аппроксимации ρ (l) и $H(l)$:

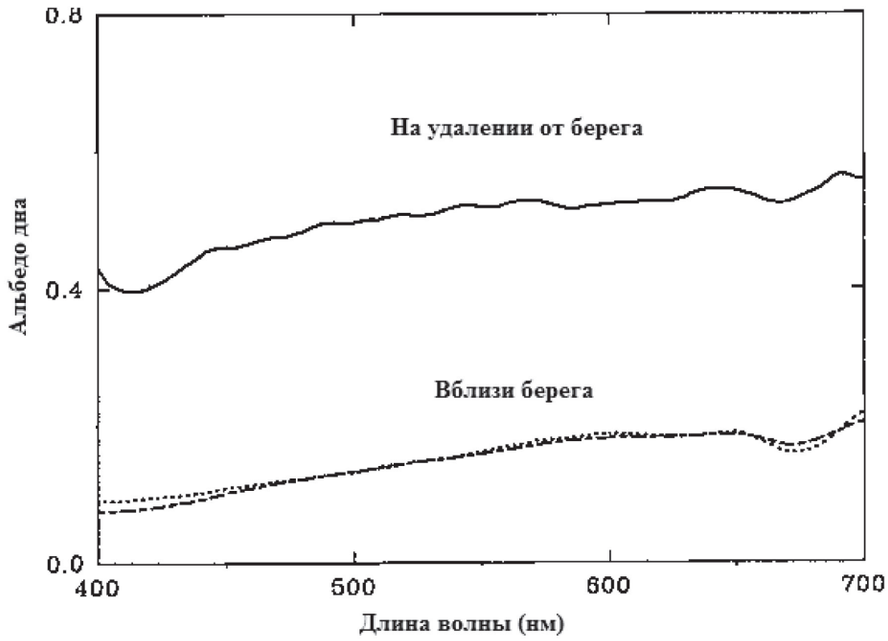

Рис. 3. Графики зависимости альбедо дна от длины волны при разных расстояниях до берега [10]

3 2018.indd 113 26.09.2018 10:05:06

$$\rho(l) = \rho_0 + \rho'_l \cdot l \quad (5)$$

$$H(l) = H_0 + H'_l \cdot l \quad (6)$$

С учетом (5) и (6) выражение (4) приобретает следующий вид:

$$R^b_{rs} \approx 0{,}17 \cdot (\rho + \rho'_l \cdot l) \cdot \\ \cdot \exp\left[-(1{,}5 + D_d \cdot \alpha \cdot (H_0 + H'_l(l))\right] \quad (7)$$

Исследуя выражение (5) на экстремум от l методом анализа производных получим:

$$\rho'_l = D_d \cdot \alpha \cdot H'_l \cdot (\rho_0 + \rho'_l \cdot l) \quad (8)$$

Из выражения (9) находим

$$(\rho_0 + \rho'_l \cdot l) = \frac{\rho'_l}{D_d \cdot \alpha \cdot H'_l} \quad (9)$$

или

$$l_{\text{экс.}} = \frac{1}{D_d \cdot \alpha \cdot H'_l} - \frac{\rho_0}{\rho} \quad (10)$$

Таким образом, на дистанции $l_{\text{экс}}$ от берега можно ожидать экстремум в значении R^b_{rs}. При этом согласно (1) эти экстремумы будут разнесены по длине волны, что внесет немалую неопределенность в результат вычисления показателя *BEI*.

Следует отметить, что обнаруженный экстремальный характер значения отраженной от дна радиации также подтверждается результатами экспериментальных исследований, проведенных в [10]. Соответствующие результаты приведены в таблице 1.

Как видно из данных, приведенных в табл. 1, при некотором удалении станции наблюдения от берега, т.е. у станции St_2 обнаруживается максимум R^b_{rs} / R_{rs} на обеих длинах волн.

Проанализируем пути минимизации влияния экстремального характера отраженной от дна радиации на показатель *BEI*. Задача исследования формулируется следующим образом: при каком виде функции

$$H = H(\rho) \quad (11)$$

вклад R^b_{rs} в суммарном отраженном сигнале может стать минимальным. Заметим, что физическое существование функции (9) не вызывает сомнений, т.к. H и ρ являются функциями параметра l.

Для решения поставленной задачи рассмотрим упрощенный случай, когда правомерно использовать дуальную модель функции $H(\rho)$ в виде

$$H = H'_\rho \cdot \rho \quad (12)$$

$$H = H(\rho)_{\max} - H'_\rho \cdot \rho \quad (13)$$

С учетом бинарной модели (10), (11), сформируем следующее ограничительное условие применительно к функции $H = H(\rho)$

$$F_1 = \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} H(\rho) d\rho = c \quad (14)$$

Далее, применительно к неглубокому участку береговых вод сформируем следующую среднеинтегральную оценку отраженной от дна радиации

$$F_2 = \frac{1}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} 0{,}17 \cdot \rho \cdot \exp\left[-(1{,}5 + (D_j) \cdot \alpha \cdot H(\rho))\right] d\rho \quad (15)$$

Следует вычислить такую функциональную зависимость $H(\rho)$, при которой F_2 достиг бы минимального значения. Вышеуказанная задача может быть решена методом безусловной вариационной оптимизации, для чего формируется следующий функционал цели:

$$F_3 = \frac{1}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} 0{,}17 \cdot \rho \cdot \exp\left[-(1{,}5 + D_j \cdot \alpha \cdot H(\rho))\right] d\rho + \\ + \lambda \left[\int_{\rho_{\min}}^{\rho_{\max}} H(\rho) d\rho - c \right] \quad (16)$$

где: λ – множитель Лагранжа.

Решение оптимизационной задачи по методу Эйлера – Лагранжа дало следующее выражение, при котором F_3 достигает минимума

Таблица 1

Станция наблюдения в море с ростом удаленности от берега	R^b_{rs} / R_{rs}	
	440 нм	550 нм
St_1	0,02	0,10
St_2	0,04	0,12
St_3	0,02	0,04

3 2018.indd 114 26.09.2018 10:05:08

$$H(\rho)_{opt} = \frac{\ln\left[\frac{0{,}17 \cdot \rho \cdot D_d \cdot \alpha}{\lambda_0(\rho_{\max} - \rho_{\min})}\right] - 1{,}5}{D_d \cdot \alpha} \quad (17)$$

где: λ_0 – постоянная величина, значение λ, вычисленное с учетом условия (12) и производной интегранта функционала (14), приравненной к нулю.

Таким образом, как следует из вышеизложенного, для минимизации вклада R_{rs}^b в R_{rs} необходимо провести измерения в тех точках береговой неглубокой зоны моря, где соблюдается логарифмическая зависимость H от ρ, и далее усреднить полученные значения измеренных величин по количеству проведенных измерений. Такая минимизация R_{rs}^b позволит более точно определить величину *BEI*, являющегося критерием классификации морской береговой зоны на глубинные и неглубинные участки. С учетом вышеизложенного, индекс *BEI* может быть модифицирован и записан в следующем виде

$$BEI_{mod} = \exp\left[\frac{-\left(R_{rs}^w(\lambda_1) + R_{rs.\min}^b(\lambda_1)\right)}{\left(R_{rs}^w(\lambda_2) + R_{rs.\min}^b(\lambda_2)\right)}\right] \quad (18)$$

где: $R_{rs\ \min}^b(\lambda_i) = F_{3\min}(\lambda_i); \quad i = \overline{1,2}$

где: $F_{3\min}(\lambda_i)$ – минимальное значение F_3, вычисляемое с учетом функции (15).

Заключение

Суммируя вышеизложенное, можно заключить, что предлагаемая модификация индекса влияния дна моря в отраженную оптическую радиацию позволяет уточнить критерий раздела береговой зоны на мелководные и глубоководные участки путем использования минимизированной, за счет проведения специально упорядоченных измерений в особо выбранных точках, оптической радиации. Такое уточнение критерия выбора зон берегового участка, в свою очередь позволит уточнить результаты измерений CDOM в прибрежных зонах, что открывает дальнейшие возможности для исследования круговорота углерода в водобассейнах.

Выводы

Основные выводы проведенного исследования можно сформулировать следующим образом:

1. Показан экстремальный характер отраженной от дна оптической радиации в береговых зонах в зависимости от расстояния до берега.

2. Дана среднеинтегральная оценка отраженной от дна оптической радиации в береговых зонах.

3. Предложен модифицированный критерий выбора методов дистанционного зондирования растворенных органических веществ в береговых зонах морей.

Литература

1. Brando, V. E. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality / V.E. Brando, A.G. Dekker // Geosci. Remote Sens., IEEE Trans. – 2003. – Vol. 41. – P. 1378–1387.

2. Markager, S.Spectral light attenuation and the absorption of UV and blue light in natural waters / S. Markager, W.F. Vincent // Limnol. Oceanogr. – 2000. – Vol. 45. – P. 642–650.

3. Estimating absorption coefficients of colored dissolved organic matter (CDOM) using a semi-analytical algorithm for southern Beaufort Seawaters: application to deriving concentrations of dissolved organic carbon from space / A. Matsuoka [et al.] // Biogeosciences. – 2013. – No. 10. – P. 917–927.

4. Parametrization and calibration of a quasi-analytical algorithm for tropical eutrophic waters / F. Watanabe [et al.] // ISPRS J. Photogram. Remote Sens. – 2016. – Vol. 121. – P. 28–47.

5. A physics based retrieval and quality assessment of bathymetry from suboptimal hyperspectral data / V.E. Brado [et al.] // Remote Sens. Environ. – 2009. – Vol. 113. – P. 755–770.

6. Remote sensing of euphotic depth in shallow tropical in land waters of Lake Naivasha using MERIS data / N.P. Majozi [et al.] // Remote Sens. Environ. – 2014. – Vol. 148. – P. 178–189.

7. Remote Sensing estimation of colored dissolved organic matter(CDOM) in optically shallow waters / J. Li [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2017. – Vol. 128. – P. 98–110.

8. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS forest imaging chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands / G. Dall' Olmo [et al.] // Remote Sens Environ. – 2005. – Vol. 96. – P. 176–187.

9. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters / A. Dogliotti [et al.] // Remote Sens. Environ. – 2015. – Vol. 156. – P. 157–168.

10. Model for the interpretation of hyperspectral remote – sensing reflectance / Zh. Lee [et al.] // Applied Optics. –1994. – Vol. 33, No. 24. – P. 5721–5731.

11. Spatial Prediction of Coastal Bathymetry Based on Multispectral Satellite Imagery and Multibeam Data / X. Monteys [et al.] // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7. – P. 13782–13806.

3 2018.indd 115 26.09.2018 10:05:09