

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗВЕСИ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ ПО ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© В.М. Кушнир, С.В. Бердников, 2010

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь
Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону*

Suspension characteristics in the Kerch strait were studied on the basis of remote sensing measurements of the optical characteristics by MODIS scanners in the red and IR spectrum as well as on the basis of the contact measurements of the suspension concentration in separate points. Functional dependence of this parameter on the colour index for waves of 0,645 and 0,8585 microns is received. This dependence is used for definition of concentration of the small ($0,01 \leq r \leq 1$ microns) and large ($1 \leq r \leq 10$ microns) particles of the suspension, parameters of the probability distributions and number of these particles in volume unit. Comparison of the received optical parameters with the characteristic data for the Azov – Black Sea basin has shown satisfactory conformity of these values.

Keywords: suspension, sensing measurements, color index.

Введение. Взвесь оказывает сильное влияние на оптические и биологические параметры морской среды, а ее концентрация характеризует интенсивность литодинамических процессов, связанных с эрозией дна или образованием отмелей. Значение таких исследований в Керченском проливе определяется следующими основными факторами.

1. Сооружение дамбы от Таманского полуострова в направлении о-ва Коса Тузла и искусственное углубление протока между оконечностью дамбы и восточной частью этого острова привели к интенсификация процессов размыва. Так, на протяжении 2005 – первой половины 2006 гг. площадь острова уменьшилась на 30 га. Огромные объемы смываемого донного материала оседают в некоторых, пока неизвестных районах Керченского пролива, что создает потенциальные угрозы для навигации и нарушения естественной экологии района.
2. Керченский пролив всегда был одним из главных районов Азово-Черноморского рыболовства. Косяки сельди, хамсы и другой рыбы дважды в год кочуют через пролив из Черного моря в Азовское и обратно. Интенсификация литодинамических процессов приводит к изменению рельефа дна и, следовательно, изменяет структуру поля течений и гидрологические характеристики водной среды (температуру, соленость, кислородный режим). Эти изменения могут оказать существенное влияние на рыбный промысел.
3. При сложных навигационных условиях Керченский пролив – район интенсивного судоходства. Для обеспечения безопасности навигации остро необходимы данные о литодинамических процессах и возможных изменениях рельефа дна в проливе.

Интенсивность процессов эрозии грунта резко усиливается при штормах. Вместе с тем особенностью литодинамических процессов вблизи морского дна является интегральный эффект постепенного развития эрозии донного материала при умеренных гидрометеорологических условиях [1–21].

Традиционные методы литодинамических исследований эрозии и аккумуляции донного материала включают в себя повторяющиеся батиметрические съемки и геологические анализы характеристик донного материала. Практическая реализация указанных методов связана с проведением больших объемов регулярных натурных измерений, что требует значительных финансовых и временных затрат, а возможность выполнения таких измерений сильно зависит от погодных условий. Это определяет ограниченность традиционных методов и очень редкое их использование в полном объеме, несмотря на высокую практическую необходимость проведения исследований для защиты морских берегов и пляжей, в том числе в Керченском проливе, гидротехнических сооружений на морском дне.

Возможная альтернатива указанных традиционных методов связана с применением методов дистанционного зондирования, а именно оптических сканеров, измеряющих восходящее излучение в оптическом (400–700 нм) и ИК диапазонах [22]. Эти возможности использованы ниже для обоснования метода определения концентрации взвеси по данным космических съемок и вероятностных распределений частиц по их размерам. На такой основе может быть построена базовая технология мониторинга литодинамических процессов в Керченском проливе, что в конечном итоге позволит разработать рекомендации

по выполнению берегоукрепительных работ (в том числе предотвращения размыва о-ва Коса Тузла), обеспечения безопасной навигации, экологии, рыбного промысла и освоения энергетических ресурсов.

Материалы и методы. В настоящей работе использованы результаты непосредственных измерений концентрации взвеси (C_s , г/м³) и глубины видимости белого диска (Z_d , м), полученные в Керченском проливе 6–7 октября 2008 г. и 18 апреля 2009 г. экспедициями Южного научного центра (ЮНЦ) РАН.

Пробы воды из поверхностного горизонта (0–0,3 м) отбирали стеклянным сосудом, переносили в фильтровальную установку из поликарбонатного пластика фирмы “Сарториус” (ФРГ) и фильтровали при пониженном давлении через стекловолоконные фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0,7 мкм. Фильтры предварительно прокаливали в муфельной печи 8 ч при температуре 450 °С, высушивали до постоянной массы, взвешивание проводили на электронных аналитических весах (САРТОГОСМ ЛВ210-А).

Были использованы также данные первого уровня обработки оптического сканера системы MODIS с пространственным разрешением 250 м для ближайших дат при отсутствии облачности. Как известно, такие данные свободно распространяются NASA по сети INTERNET (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>). Первичная обработка, выполненная на основе программы Beam VISAT 2,3, включала отбор двух каналов, соответствующих длинам волн 0,645 и 0,8585 мкм, выделение области, содержащей Керченский пролив, оцифровку данных в единицах яркости (Вт · м⁻² · стр⁻¹ · мкм⁻¹), привязку каждого пиксела к географическим координатам. Были выбраны изображения, соответствующие безоблачным условиям, и обработаны два мультиспектральных снимка, относящихся к указанным датам. Для этих же условий была определена скорость ветра по данным спутника QuikScat: 6–7 октября 2008 г. преобладал ветер северного, северо-восточного направлений со средней скоростью 10,5 м/с, в апреле 2009 г. при таком же направлении ветра его скорость составляла 5–7 м/с.

В качестве информативного параметра для расчетов глубины видимости белого диска и концентрации взвеси использован индекс цвета, который определяется как комбинация данных оптических каналов с различными длинами волн [23–29]. Одна из таких комбинаций представляет собой отношение нормализованной яркости $L_{wn}(\lambda)$ в двух спектральных участках, т. е.

$$I_{wn}(\lambda_1/\lambda_2) = L_{wn}(\lambda_1)/L_{wn}(\lambda_2). \quad (1)$$

Использованы длины волн $\lambda_1 = 0,645$ и $\lambda_2 = 0,8585$ мкм, соответствующие максимальному пространственному разрешению 250 м.

Вычисление нормализованной яркости восходящего излучения морской поверхности на указанных длинах волн основано на упрощенном соотношении атмосферной коррекции вида

$$L_t(\lambda) = L_A(\lambda) + L_R(\lambda) + L_W(\lambda)t(\lambda), \quad (2)$$

где $L_t(\lambda)$ – яркость излучения, измеряемая бортовым фотометром на длине волны λ ; $L_W(\lambda)$ – яркость восходящего излучения морской поверхности; $L_A(\lambda)$, $L_R(\lambda)$ – величины яркости, обусловленные аэрозольным и молекулярным (рэлеевским) рассеянием в атмосфере; $t(\lambda)$ – коэффициент пропускания атмосферы, равный $\exp\{-[0,5\tau_R(\lambda) + \tau_{Oz}(\lambda)](\cos\theta_V)^{-1}\}$, $\tau_R(\lambda)$ – оптическая толщина слоя молекулярного рассеяния [λ] мкм; τ_{Oz} – оптическая толщина озонового слоя; θ_V – зенитный угол бортового фотометра.

Атмосферная коррекция яркости в рассматриваемом случае основана на анализе измеренных сигналов, относящихся к области относительно прозрачных вод Черного моря, примыкающей к Керченскому проливу. Для таких вод интенсивность восходящего излучения на длинах волн 0,645 и 0,8585 мкм пренебрежимо мала. Поэтому минимальные сигналы яркости, измеренные фотометром спутника, соответствуют яркости атмосферных сигналов. Предположив, что масштаб изменчивости атмосферных характеристик значительно превышает расстояние от Керченского пролива до ближайшего глубоководного района Черного моря, можно записать следующее соотношение для индекса цвета:

$$I_{wn}(0,645/0,8585) = \frac{L_t(0,645) - \min[L_t(0,645)]}{L_t(0,8585) - \min[L_t(0,8585)]} P(0,645/0,8585), \quad (3)$$

где $\min[L_t(0,645)]$, $\min[L_t(0,8585)]$ – минимальные величины измеренных сигналов на указанных длинах волн, относящиеся к прозрачным водам глубоководной части Черного моря;

$$P(0,645/0,8585) = \exp\left\{\left[\frac{\tau_R(0,645) - \tau_R(0,8585)}{2} + \tau_{Oz}(0,645) - \tau_{Oz}(0,8585)\right]\left[\frac{1}{\cos\theta_V} + \frac{1}{\cos\theta_S}\right]\right\} -$$

поправочный множитель, учитывающий пропускание атмосферы и пересчет яркости восходящего излучения в яркость нормализованного восходящего излучения. В диапазоне изменения зенитных углов спутника θ_V и Солнца θ_S от 0 до 60° относительные изменения поправочного множителя не превышают $\pm 6\%$.

Для длины волны 0,645 мкм величины τ_R , τ_{Oz} равны соответственно 0,0504 и 0,0219, для 0,8585 мкм – 0,0162 и 0,00154.

Полученные распределения $I_{wn}(0,645/0,8585)$, в дальнейшем будет использоваться обозначение

I_{wn} , связаны с глубиной видимости белого диска Z_d и концентрацией взвешенного вещества C_S в приповерхностном слое моря [30, 31].

Результаты измерений. Поля течений и поверхностных волн в Керченском проливе формируются под действием ветра и перепада уровня между Азовским и Черным морями и в то же время в значительной мере определяются сложным рельефом дна района. Параметры полей влияют на придонные турбулентные напряжения и профили взвешенных частиц донного материала. Значительное разнообразие этого материала (песок, ил, водоросли) отражается на распределении взвеси на морской поверхности. Сложные и нетипичные условия формирования прозрачности (глубины видимости белого диска Z_d , м) и концентрации взвеси C_S (г/м³) в Керченском проливе необходимо учитывать при использовании данных космических съемок для расчетов пространственных распределений указанных параметров. В настоящей работе для решения рассматриваемой проблемы использованы данные непосредственных измерений глубины видимости белого диска и концентрации взвеси в восьми точках Керченского пролива (табл. 1).

Как известно, существует высокая корреляция между концентрацией взвеси C_S и глубиной видимости белого диска Z_d [31]. Эта зависимость не является универсальной, и, как правило, такое функциональное соотношение имеет хорошо выраженный региональный характер, что подтверждается приведенными выше данными измерений в Керченском проливе. Регрессионная зависимость $C_S = f(I_{wn})$ по данным непосредственных измерений в проливе имеет следующий вид: $C_S = 13,56 \cdot Z_d^{-1,33}$; $R^2 = 0,952$. Близкая формула получена в ЮНЦ РАН ($C_S = 13,4 \cdot Z_d^{-1,29}$; $R^2 = 0,94$) по данным измерений, выполненных в Азовском и Черном морях в 2008–2009 гг.

Данные оптического сканера MODIS/Terra для Керченского пролива были получены для наиболее близких условий проведения экспедиционных работ ЮНЦ РАН при отсутствии облачности, т. е. 05.10.2008 г. (10,55 GMT) и 19.04.2009 г. (10,30 GMT). По данным съемок были вычислены пространственные распределения индекса цвета I_{wn} , которые использованы для определения эмпирической зависимости $C_S = f(I_{wn})$. С этой целью

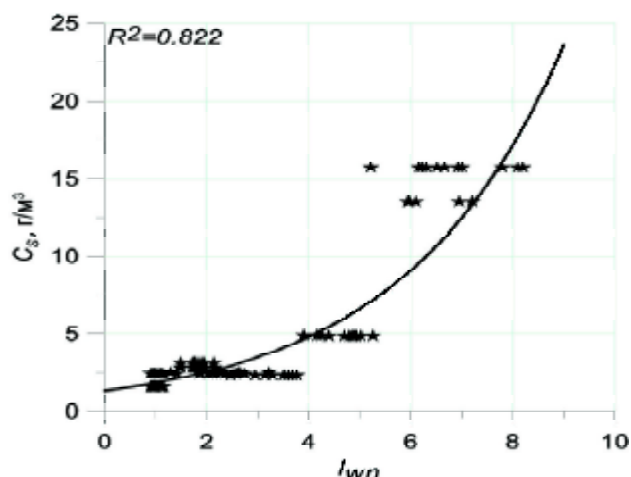


Рис. 1. Зависимость $C_S = f(I_{wn})$: $C_S = 1,3326 \cdot \exp(0,3194I_{wn})$; $R^2 = 0,822$ – достоверность аппроксимации

10–15 значений индекса цвета I_{wn} отбирались таким образом, чтобы расстояние до точки прямых измерений не превышало 0,5–1 км (рис. 1).

Значительный разброс экспериментальных значений относительно линии регрессии на рис. 1 объясняется неточным совпадением времени прямых измерений и космических съемок, резкими градиентами естественной изменчивости оптических характеристик, допущениями при расчете I_{wn} и погрешностями дистанционного зондирования. Тем не менее степень достоверности аппроксимации экспериментальных данных оказалась достаточно высокой, что позволяет использовать полученные эмпирические зависимости для расчетов полей прозрачности (глубины видимости белого диска) и концентрации взвеси при рассматриваемых условиях. С учетом высокой корреляции между глубиной видимости белого диска и концентрацией взвеси [31] эмпирическая зависимость между этими величинами имеет следующий вид: $Z_d = 5,722 \cdot \exp(-0,24I_{wn})$.

Пространственные распределения концентрации взвеси для указанных условий представлены на рис. 2, 3. На всех распределениях выделяются локальные области высокой концентрации взвеси в Керченском проливе.

Как известно, концентрация взвеси в Азовском море сильно зависит от скорости ветра [28]. Для уточнения такой зависимости были дополнительно отобраны и обработаны данные космических съемок Керченского пролива при различных

Таблица 1. Данные прямых измерений C_S и Z_d в Керченском проливе

Номер станции	Год	Дата	Время	Широта, град.	Долгота, град.	Z_d , м	C_S , г · м ⁻³
27	2009	18.04	14.30	45,44	36,72	3,25	3,10
29	2009	18.04	15.42	45,31	36,54	2,50	3,15
31	2009	18.04	17.15	45,22	36,49	3,75	–
24	2008	07.10	12.53	45,11	36,60	3,5	2,43
20	2008	06.10	20.03	45,51	36,69	–	2,40
21	2008	07.10	08.49	45,37	36,67	–	13,5
23	2008	07.10	12.00	45,18	36,50	2,5	4,87
22	2008	07.10	10.31	45,26	36,49	0,9	15,7

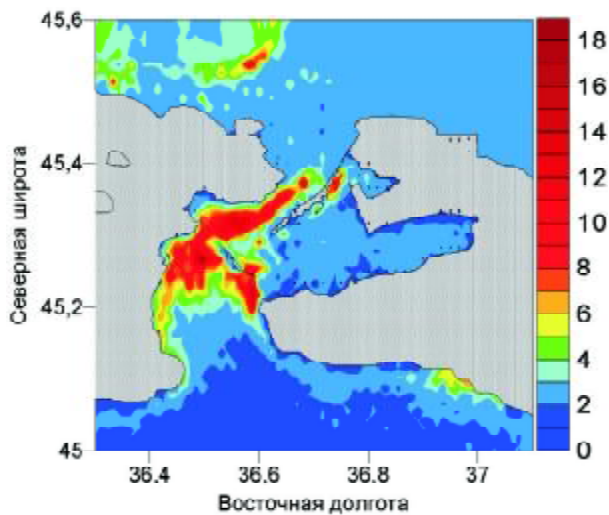


Рис. 2. Пространственное распределение концентрации взвеси по данным космической съемки 05.10.2008 г. Средняя скорость ветра 10,4 м/с. Цветовая шкала справа соответствует концентрации взвеси на морской поверхности в г/м³

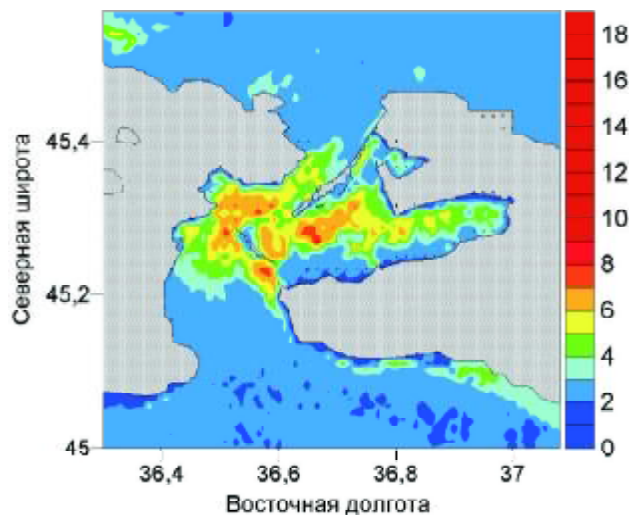


Рис. 3. Пространственное распределение концентрации взвеси по данным космической съемки 19.04.2009 г. Средняя скорость ветра 6 м/с. Цветовая шкала справа соответствует концентрации взвеси на морской поверхности в г/м³

значениях скорости ветра, по этим данным построена зависимость средней концентрации взвеси в Керченском проливе от скорости ветра (рис. 4). Видно, что между рассматриваемыми величинами существует высокая корреляция. Это позволяет использовать скорость ветра как прогностический параметр для предварительных оценок изменения оптических характеристик в анализируемом районе.

Анализ данных. В результате анализа данных с использованием модели Копелевича для показателя обратного рассеяния $b_b(\lambda)$ [32], учетом ее развития в [33] и связи между концентрацией мелких P_s и крупных P_l частиц взвеси (г/м⁻³), а также концентрацией хлорофилла a C_{Chl} (мг/м⁻³) [34] получены аппроксимационные соотношения

$$\begin{aligned} P_s &= 0,0246 C_{Chl}^{0,8734} (R^2 = 0,997); \\ P_l &= 0,4756 C_{Chl}^{0,7447} (R^2 = 1), \end{aligned} \quad (4)$$

где R^2 – достоверность аппроксимации.

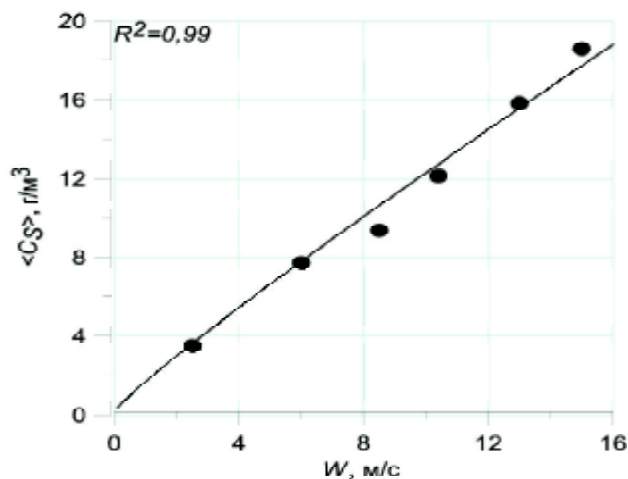


Рис. 4. Зависимость средней концентрации взвеси от скорости ветра и регрессионная зависимость $\langle CS \rangle = 1,4727 W^{0,9142}$

В свою очередь, концентрация хлорофилла a связана с величиной индекса цвета $I_{wn}(0,469/0,555)$ для длин волн 0,469 и 0,555 мкм. Эта взаимосвязь может быть представлена в виде соотношения: $C_{Chl} = 3 \cdot [I_{wn}(0,469/0,555)]^{-1,61}$ [35, 36]. Анализ показал, что индекс цвета для указанных длин волн связан с индексом цвета для рассматриваемых длин волн 0,645 и 0,8585 мкм следующим соотношением: $I_{wn}(0,469/0,555) = 2,31 [I_{wn}(0,645/0,8585)]^{-0,42} = 2,31 I_{wn}^{-0,42}$. После его подстановки в (4) эмпирические зависимости имеют вид

$$P_s = 0,0196 I_{wn}^{0,5922}; \quad P_l = 0,395 I_{wn}^{0,504}. \quad (5)$$

Представляет интерес сопоставление соотношений (5) и приведенных выше ($Z_d = 5,722 \cdot \exp(-0,24I_{wn})$; $C_s = 1,333 \cdot \exp(-0,319I_{wn})$) с данными независимых оценок для условий Азово-Черноморского бассейна. Для этого можно использовать зависимости $C_s = f(Z_d)$, полученные в результате обработки приведенных выше экспериментальных данных и аналогичную зависимость из справочника “Гидрооптические характеристики Черного моря” [37]. В настоящей работе такая зависимость имеет вид: $C_s = 13,56 Z_d^{-1,33}$, в [37] – $C_s = 14,87 Z_d^{-1,29}$. Для диапазона $1 \leq Z_d \leq 5$ относительное расхождение оценки C_s составляет 25–30 %, что является вполне удовлетворительным с учетом различных условий получения эмпирических соотношений.

Оценки концентрации мелких P_s и крупных P_l частиц взвеси по соотношениям (5) для условий воды с высокой мутностью ($I_{wn} = 1$) сопоставлены с оценками аналогичных величин на основе данных о показателе рассеяния в направлении углов 1°, 6° и 45° также для условий высокой мутности. По соотношениям (5) указанные оценки равны соответственно 0,064 и 0,48 г/м³, по данным [37] – 0,069 и 0,41 г/м³.

Таким образом, рассмотренным методом можно определить соотношение концентрации мелких и крупных частиц взвеси и получить такие характеристики водной среды, как спектры показателей поглощения и рассеяния в направлении различных углов, спектр показателя ослабления направленного света и др.

Полученные данные использованы для определения вероятностных распределений частиц взвеси по их размерам и массе. При этом отдельно рассмотрим мелкую взвесь минерального происхождения с размерами меньше 1 мкм и крупную взвесь, главным образом органического происхождения. В настоящее время предложено много соотношений для аппроксимации плотности распределения вероятностей частиц взвеси по их размерам, в том числе относительно простое распределение Юнге и более сложные формы [34, 38]. В качестве наиболее точной модели в [39] рекомендуется использовать “гамма-распределение” для каждой группы частиц ($0,01 \leq r \leq 1$ и $1 \leq r \leq 10$ мкм):

$$W(r) = Cr^2 \exp(-Ar^\gamma), \quad (6)$$

где C , A , γ – параметры распределения, которые определяются отдельно для мелкой и крупной взвеси. На рис. 5 показана характерная гистограмма такого распределения для мелкой взвеси [38]. Среднее значение $\langle r \rangle$, медиана r_m и условие нормировки $\int_0^\infty W(r) dr = 1$ распределения (6) зависят от параметров распределения следующим образом:

$$\langle r \rangle = \frac{C \Gamma(4/\gamma)}{\gamma A^{4/\gamma}}, \quad r_m = \left(\frac{2}{\gamma A}\right)^{1/\gamma}, \quad \frac{C \Gamma(3/\gamma)}{\gamma A^{3/\gamma}} = 1, \quad (7)$$

где $\Gamma(z)$ – гамма-функция; C – параметр, связанный с количеством частиц в единице объема.

В то же время среднее значение $\langle r \rangle$ и медиана r_m определяются непосредственно по гистограмме распределения и могут быть использованы

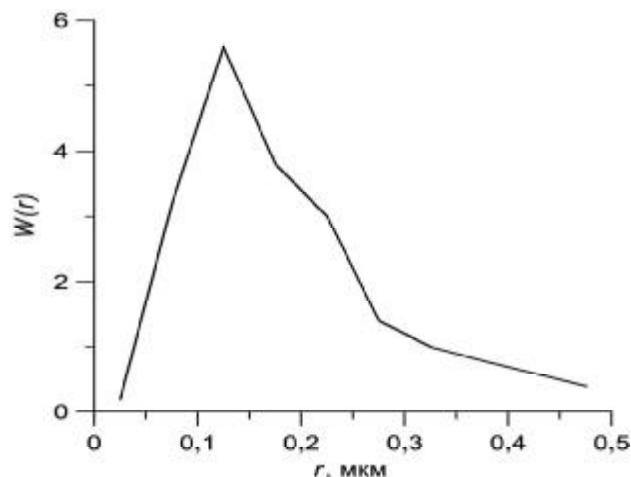


Рис. 5. Характерная гистограмма вероятностного распределения частиц мелкой взвеси

ны для определения параметров модельного распределения вероятностей (6) по соотношениям

$$\begin{aligned} \frac{\langle r \rangle}{r_m} &= \\ &= \frac{(2/\gamma)^{-1/\gamma} [(4-\gamma)/(3-\gamma)]^{0.5} [(4-\gamma)/\gamma]^{(4-\gamma)/\gamma} \cdot \exp(-1/\gamma)}{[(3-\gamma)/\gamma]^{(3-\gamma)/\gamma}}, \\ A &= 2\gamma^{-1} r_m^{-\gamma}, \quad C = \gamma \cdot A^{3/\gamma} / \Gamma(3/\gamma). \end{aligned} \quad (8)$$

Для рассмотренного выше распределения мелких частиц вычисления по этим соотношениям дают оценки: $\gamma = 1,14$; $A = 18,88$. Данные о распределении по размерам крупных частиц органического происхождения приведены в [40]. Среднее значение и мода распределения таких частиц равны соответственно $\langle r \rangle = 4,32$ мкм, $r_m = 1,5$ мкм; параметры вероятностного распределения – $\gamma = 0,4713$, $A = 3,5$.

Масса частицы m и ее размер (средний радиус) r связаны соотношением $m = \pi \rho r^3 / 6$. Плотность распределения частиц по их массам находится на основе правил вычисления нелинейных преобразований случайных величин. Опустив промежуточные преобразования, имеем:

$$W(m) = \frac{2C}{\pi \rho} \exp\left[-A \left(\frac{6}{\pi \rho}\right)^{\gamma/3} \cdot m^{\gamma/3}\right]. \quad (9)$$

Среднее количество мелких и крупных частиц в единице объема (N_s , N_l) определяется с учетом (5) по соотношениям

$$N_s = \frac{P_s}{\langle m_s \rangle} = \frac{0,384 I_{wn}}{\pi \rho (\langle r_s \rangle)^3}; \quad N_l = \frac{P_l}{\langle m_l \rangle} = \frac{6,48 I_{wn}}{\pi \rho (\langle r_l \rangle)^3}, \quad (10)$$

где $\rho_s \approx 2,6 \cdot 10^6$ г/м³; $\rho_l \approx 1,1 \cdot 10^6$ г/м³ – соответственно средняя плотность мелких и крупных частиц [31]. При $\langle r_s \rangle = 0,2$ мкм $N_s = 5,87 \cdot 10^{12} \cdot I_{wn}^{-1,41}$ част/м³; при $\langle r_l \rangle = 4,32$ мкм $N_l = 2,33 \cdot 10^{10} \cdot I_{wn}^{-1,2}$ част/м³. Независимые оценки [37] среднего количества мелких и крупных частиц в единице объема для условий вод высокой мутности дают следующие значения: $N_s = 5 \cdot 10^{11}$ част/м³; на основе изложенного метода при $I_{wn} = 2$ $N_s = 2,2 \cdot 10^{12}$ част/м³; для крупных частиц при $I_{wn} = 2$ $N_l = 1,1 \cdot 10^{10}$ част/м³, по данным независимых оценок $N_l = 1,09 \cdot 10^{10}$ част/м³.

Таким образом, параметры, характеризующие концентрацию мелких и крупных частиц взвеси, а также численность этих частиц, соответствуют независимым оценкам аналогичных параметров.

Обсуждение результатов. Основная задача настоящей работы – обоснование схемы обработки данных цветковых сканеров, позволяющей даже по относительно небольшому количеству контактных измерений оптических параметров получить распределение концентрации взвеси для анализируемого района. В этом случае учитываются региональные особенности оптических свойств, и вычисленные распределения по всему району мо-

гут быть эффективно использованы для решения прикладных проблем. Применительно к Керченскому проливу к наиболее острым таким проблемам относятся литодинамические процессы размыва и аккумуляции донных наносов (это имеет большое значение для безопасной навигации, строительства береговых защитных сооружений, динамики пляжей), контроль динамики концентрации хлорофилла a как одного из наиболее важных параметров продуктивности водной среды.

Выводы.

1. Изложенная методика оценки индекса цвета I_{wn} для длин волн 0,645 и 0,8585 мкм на основе упрощенного уравнения атмосферной коррекции позволяет определить величины, которые характеризуются высокой корреляцией с общей концентрацией взвеси C_S .
 2. Полученные функциональные зависимости $Z_d = f_1(I_{wn})$, $C_S = f_2(I_{wn})$ учитывают региональные особенности оптических характеристик вод Керченского пролива. Они могут быть использованы для определения концентрации мелких ($0,01 \leq r \leq 1$ мкм) и крупных ($1 \leq r \leq 10$ мкм) частиц взвеси, параметров вероятностных распределений и численности этих частиц в единице объема, а также для расчетов основных оптических характеристик водной среды.
 3. Сопоставление вычисленных оптических параметров со справочными данными для Азово-Черноморского бассейна показало удовлетворительное их соответствие.
 4. Полученные данные подтвердили установленную ранее общую зависимость оптических характеристик Азовского моря от скорости ветра.
1. Добротворский А.Н., Дружевский С.А., Кушнир В.М., Петренко Л.А. Диагностическая модель деформаций дна под действием гидрометеорологических факторов // Навигация и гидрография. – 2001. – № 1. – С. 94–103.
 2. Иванов В.А., Михинов А.Е. Прогноз динамики наносов в прибрежных зонах моря (Практические рекомендации и примеры). – Севастополь, 1991. – 52 с. – (Препр. / НАН Украины. Мор. гидрофиз. ин-т).
 3. Михинов А.Е. Баланс энергии возмущенного движения в русловых потоках // Метеорология и гидрология. – 1987. – № 9. – С. 86–95.
 4. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. – М: Изд-во иностр. лит., 1949. – 520 с.
 5. Breusers H., Raudkivi A. Scouring. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1991. – 143 p.
 6. Engelund F., Fredsue J. A sediment transport model for straight alluvial channels // Nordic Hydrol. – 1976. – 7. – P. 293–306.
 7. Hsu T.-W., Lin H.-Y. Application of a $k-\epsilon$ Model to Instantaneous Sediment Concentration and Turbulent Boundary Layers of wave-Induced Shelf Flow / Flow Modeling and turbulent Measurements VII. Oct. 5–8. – Tainan, Taiwan, 1998. – P. 27–37.
 8. Jia Y., Xu Y., Wang S.S.Y. Numerical Simulation of Local Scouring around a Cylindrical Pier // Proc. of the The First

- Int. Conf. on Scour of Foundations. Nov. 17–20, 2002, Texas. – Texas: A&M Univ., College Station, USA, 2002. – P. 1181–1187.
9. Li F., Cheng L. Numerical Simulation of Pipeline Local Scour with Les-Wake Effects // Offshore and Polar Engineer. – 2000. – 10, № 3. – P. 195–199.
10. Link O., Zanke U. On the Prediction of the Maximum Depth of a Scour Hole Around Cylindrical Bridge Piers in Non Cohesive Soils // Proc. of The First Int. Conf. on Scour of Foundations. Nov. 17–20, 2002. – Texas: A&M Univ. College Station, USA, 2002. – P. 1160–1165.
11. Miles J.W. Surface-Wave Damping in Closed Basins // Proc. Roy. Soc. – 1967. – A 297. – P. 459–475.
12. Rankin K.L., Hires R.I. Laboratory measurement of bottom shear stress on a movable bed // J. Geophys. Res. – 2000. – 105, C7. – P. 17011–17019.
13. Roulund A., Sumer B.M., Fredsoe J., Michelsen J. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile // J. Fluid Mech. 2005. – 534. – P. 351–401.
14. Tolman H.L. Wind Waves and Moveble-Bed Bottom Friction // J. Phys. Oceanogr. – 1994. – 24. – P. 994–1009.
15. Vanoni V.A. Sedimentation Engineering. – New York: ASCE, 1977.
16. Van Rijn L.C. Sediment Transport, Part 1. Bedload Transport // J. Hydraul. Eng. – 1984. – 110, N 10. – P. 1431–1456.
17. Van Rijn L.C. Sediment transport. Part 3. Saspended load transport // Ibid. – 1984. – 110, N 11. – P. 1631–1641.
18. Van Rijn. Mathematical Modeling of Suspended Sediment in Nonuniform Flows // Ibid. – 1986. 112, N 6. – P. 433–455.
19. Van Oord. Scour Prediction Event ICSF-1 // Proc. of 1st Int. conf. on Scour of Foundations. Nov, 17–20, 2002, Texas. – Texas: A&M Univ. Collage Station, USA, 2002. – P. 1–11.
20. Кушнир В.М. Структура волнового придонного пограничного слоя над ровным и неровным дном // Мор. гидрофиз. журн. – 2005. – № 6. – С. 54–67.
21. Кушнир В.М., Душко В.Р., Федоров С.В. и др. Расчет воздействия морской среды на океанотехнические установки // Мор. испытания. – 2007. – № 3. – С. 32–41.
22. Кушнир В.М., Федоров С.В., Душко В.Р. и др. Оперативный контроль гидродинамических нагрузок на морские океанотехнические системы по данным спутниковых измерений // Тр. VI Рос. науч.-техн. конф. “Современное состояние и проблемы навигации и океанографии”, НО-2007. 23–25 мая 2007 г., Санкт-Петербург, РФ. – СПб., 2007. – С. 568–574.
23. Маньковский В.И. Основы оптики океана. Методическое пособие. – Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т, 1996. – 120 с.
24. Jerlov N.G. Marine Optics. – Amsterdam: Elsevier, 1976.
25. Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы. Т. 2, ч. 2 / Ред. В.А. Урденко, Г. Циммерман. – Москва; Берлин; Севастополь: Ин-т космич. исследований АН ГДР, 1987. – 197 с.
26. Неуймин Г.Г., Кушнир В.М., Владимиров В.Л., и др. Пространственное распределение, структура и характеристики “пятен” контрастных вод в северо-западной части Тропической Атлантики / Мор. гидрофиз.

- ин-т АН УССР. — Севастополь, 1985. — 12 с. Деп. в ВИНТИ, № 5043.
27. Кушнир В.М. Оценка характеристик взвешенных наносов по данным оптических сканеров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь, 2008. — Вып. 16. — С. 224–235.
 28. Кушнир В.М. Характеристики приповерхностного слоя Азовского моря по данным оптических сканеров системы MODIS // Исследование Земли из космоса. — 2009. — № 3. — С. 35–46.
 29. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 2. — М.: Сов. радио, 1960. — 503 с.
 30. Маньковский В.И. Связь глубины видимости белого диска с биооптическими характеристиками вод Черного моря // Мор. гидрофиз. журн. — 1999. — № 5. — С. 78–80.
 31. Витюк Д.М. Взвешенное вещество и его биогенные компоненты. — Киев: Наук. думка, 1983. — 168 с.
 32. Копелевич О.В., Межеричер Э.М. Расчет спектральных характеристик рассеяния света в морской воде // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1983. — 19, № 2. — С. 195–202.
 33. Haltrin V.I., Kattawar G. Light fields with Raman scattering and fluorescence in sea water. — Texas: A&M Univ., College Station. Tech. Rept., Dept. of Physics, 1991. — 74 p.
 34. Mobley C.D. Light and water. — CD format, 2004. — 604 p.
 35. Кушнир В.М., Станичный С.В. Индекс цвета в северо-западной части Черного моря по данным сканера MODIS // Исследование Земли из космоса. — 2007. — № 4. — С. 62–73.
 36. O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchel B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Gardner S.A., Kahru M., McClain C.R. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // J. Geophys. Res. — 1998. — 103 с. — P. 24937–24953.
 37. Маньковский В.И., Маньковская Е.В., Соловьев М.В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. — Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2009. — 90 с.
 38. Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Моница. — М.: Наука, 1983. — 372 с.
 39. Risovic D. Two-component model of sea particle size distribution // Deep-Sea Res. — 1993. — 1, N 7. — P. 1453–1473.
 40. Рубцова И. Общее количество нефтяных углеводородов и нефтеокисляющих механизмов в морской воде в присутствии взвеси // Экология моря. — 2000. — Вып. 52. — С. 75–78.

Поступила в редакцию 23.02.2010 г.

В.М. Кушнир, С.В. Бердников

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗВЕСИ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ ПО ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Характеристики взвеси в Керченском проливе изучались на основе дистанционных измерений оптических характеристик сканерами системы MODIS в красной и инфракрасной частях спектра, а также контактных измерений концентрации взвеси в отдельных точках. Полученная функциональная зависимость указанного параметра от индекса цвета для длин волн 0,645 и 0,8585 мкм использована для определения концентрации мелких ($0,01 \leq r \leq 1$ мкм) и крупных ($1 \leq r \leq 10$ мкм) частиц взвеси, параметров вероятностных распределений и численности этих частиц в единице объема. Сопоставление вычисленных оптических параметров со справочными данными для Азово-Черноморского бассейна показало удовлетворительное их соответствие.

Ключевые слова: взвесь, дистанционные измерения, индекс цвета.

В.М. Кушнір, С.В. Бердніков

ХАРАКТЕРИСТИКИ СУСПЕНЗІЇ В КЕРЧЕНСЬКІЙ ПРОТОЦІ ЗА ДАНИМИ КОНТАКТНИХ І ДИСТАНЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Характеристики суспензії в Керченській протоці вивчено на основі дистанційних вимірювань оптичних характеристик сканерами системи MODIS у червоній та інфрачервоній частинах спектра, а також контактних вимірювань концентрації суспензії в окремих пунктах. Отриману функціональну залежність цього параметра від індексу кольору для довжин хвиль 0,645 і 0,8585 мкм використано для визначення концентрації дрібних ($0,01 \leq r \leq 1$ мкм) і великих ($1 \leq r \leq 10$ мкм) часточок суспензії, параметрів імовірнісних розподілів і чисельності цих часточок в одиниці об'єму. Зіставлення обчислених оптичних параметрів з довідковими даними для Азово-Черноморського басейну показало задовільну їх відповідність.

Ключові слова: суспензія, дистанційні вимірювання, індекс кольору.