

В.М.Кушнир*, С.В.Бердников**

**Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

***Южный научный центр РАН, г.Ростов на Дону*

ВЗВЕШЕННОЕ ВЕЩЕСТВО И ХЛОРОФИЛЛ-а В АЗОВСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Рассмотрен метод расчета концентрации взвеси и хлорофилла-а в Азовском море на основе использования данных измерений оптическими сканерами системы MODIS. Выполнены конкретные расчеты для различных гидрометеорологических условий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *оптический сканер, индекс цвета, концентрация взвеси и хлорофилла-а.*

Азовское море играет важную роль в экономическом комплексе Украины и России как район активного промысла рыбы, добычи полезных ископаемых, в том числе углеводородных энергоресурсов, транспортных магистралей, зон рекреации – на побережье расположены многочисленные санатории и курорты. Между тем, в последние годы появились многочисленные данные о значительном ухудшении экологии Азовского моря, в том числе о массовых выбросах мертвой рыбы, о закрытии пляжей в Мариуполе и других населенных пунктах из-за обнаружения в воде повышенной концентрации аммиака и кишечной палочки, о значительных количествах загрязнений попадающих в море.

В результате геолого-геофизических исследований акватории Азовского моря к настоящему времени обнаружено примерно 120 локальных структур, перспективных для разработки месторождений нефти и газа. Открыто 7 нефтегазовых месторождений. Только в пределах российской части моря ресурсы составляют примерно 50 млн. т нефти и 150 – 200 млрд. м³ газа. Для освоения этих и еще не открытых энергетических ресурсов Азовского моря остро необходимы данные постоянного мониторинга оптико-биологических и литодинамических процессов в указанном бассейне.

Особую важность такой мониторинг приобретает в связи с возможностью жестоких штормов, как это произошло 10 – 11 ноября 2007 г. Как известно, в этот период в Керченском проливе из-за сильного шторма затонули сухогрузы «Вольногорск», «Нахичевань», «Ковель», «Хачь Измаил», танкер «Волгонефть-139» раскололся на две части, в море попало около 1300 т мазута и 6800 т серы [1, 2]. Всего сигналы SOS передали 20 судов.

Подобные природные явления происходят в Азово-черноморском бассейне каждые несколько лет, и они сопровождаются резкой интенсификацией литодинамических процессов, связанных с размывом и аккумуляцией донного материала. Создание системы постоянного мониторинга оптико-биологических характеристик и концентрации взвеси (в том числе загрязнений) этого района имеет большое значение для минимизации негативных последствий таких явлений. Целью настоящей работы является обсуждение

одного из возможных путей создания такой системы мониторинга на основе данных космических съемок современными оптическими сканерами.

Материалы и методы. В настоящей работе использованы результаты непосредственных измерений концентрации хлорофилла-а (C_{chl} , мг/м³), взвеси (C_S , г/м³) и глубины видимости белого диска (Z_d , м), полученные в Азовском море в 2008 – 2010 гг. экспедициями Южного научного центра РАН (рис.1). Пробы воды из

поверхностного горизонта (0 – 0,3 м) отбирались стеклянным сосудом, переносились в фильтровальную установку из поликарбонатного пластика фирмы Сарториус (ФРГ) и фильтровались при пониженном давлении через стекловолоконные фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0,7 мкм. Фильтры предварительно прокачивали в муфельной печи 8 ч при температуре 450 °С, высушивали их до постоянного веса. Взвешивание проводилось на электронных аналитических весах (САРТОГОСМ ЛВ210-А) [3].

Определение концентрации хлорофилла-а и других фитопигментов проводилось в соответствии с ГОСТ 17.1.04.02.-90 [4] стандартным спектрофотометрическим методом. Углекислый барий или магний в работе не использовались. До обработки в лабораторных условиях фильтры хранились в эксикаторе с силикагелем при температуре от – 4 до – 18 °С не более месяца. Измерение оптической плотности экстрактов проводилось на двухлучевом спектрофотометре *Thermo Evolution 300*.

Предварительно, по данным прямых измерений были определены количественные связи между измеренными параметрами. На рис.2 показана одна из таких зависимостей для концентрации взвеси C_S и глубины видимости белого диска Z_d . Там же приведена оценка уровня достоверности аппроксимации R^2 и регрессионная зависимость $\log C_S = f(\log Z_d)$.

По данным квазисинхронных измерений концентрации хлорофилла-а и взвеси на нескольких станциях в Азовском море (главным образом, это Таганрогский залив) была получена следующая регрессионная зависимость:

$$C_S = 0,251 \cdot C_{chl}^{1,578}, \quad R^2 = 0,755. \quad (1)$$

Рис. 2. Зависимость концентрации взвешенного вещества на поверхности моря от глубины видимости белого диска и линия регрессии $\log C_S = 1,1707 - 1,3843 \log Z_d$, R^2 – достоверность аппроксимации.

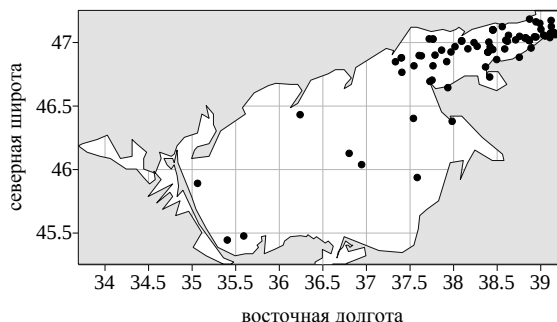
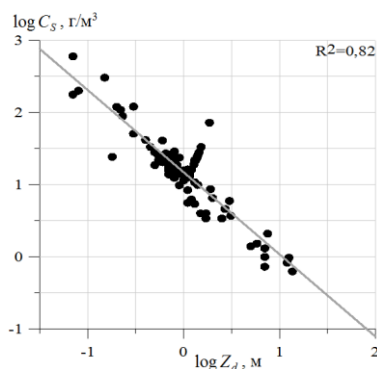


Рис. 1. Расположение станций, на которых проводилось измерения концентрации хлорофилла-а, взвешенного вещества и глубины видимости белого диска.



Указанные зависимости были использованы при дальнейшей обработке данных оптических сканеров.

Результаты космических съемок Азовского моря были представлены данными первого уровня обработки оптического сканера системы MODIS с пространственным разрешением 0,5 и 1 км для ближайших дат выполнения прямых измерений при отсутствии облачности. Как известно, такие данные свободно распространяются NASA по сети Internet (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>). Первичная обработка выполнена на основе программы Beam VISAT 2,3 и включала отбор каналов, соответствующих длинам волн 0,469; 0,555; 0,645; 0,8585; 1,24; 1,64 и 2,13 мкм, выделение области, содержащей Азовское море, оцифровку данных в единицах яркости ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{стр}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$), привязку каждого пикселя к географическим координатам. Были выбраны изображения, соответствующие безоблачным условиям и обработаны мультиспектральные снимки, относящиеся к указанным датам.

В качестве информативного параметра для оценивания оптико-биологических характеристик верхнего слоя Азовского моря использован индекс цвета, который определяется как комбинация данных оптических каналов с различными длинами волн [5, 6]. Одна из таких комбинаций представляет собой отношение нормализованной яркости $L_{WN}(\lambda)$ в двух спектральных участках, т.е.

$$I_{WN}(\lambda_1 / \lambda_2) = L_{WN}(\lambda_1) / L_{WN}(\lambda_2). \quad (2)$$

Использованы длины волн $\lambda_1 = 0,469$ мкм и $\lambda_2 = 0,555$ мкм, так как такая комбинация обеспечивает наибольшие контрасты оптических характеристик по отношению к концентрации хлорофилла-а, и, кроме этого, известны эмпирические зависимости между пространственными распределениями $I_{WN}(\lambda_1, \lambda_2)$ и концентрацией минеральной и органической взвеси, глубиной видимости белого диска, показателем ослабления света в приповерхностном слое и другие. Соответствующие эмпирические соотношения получены по результатам прямых измерений в различных районах Мирового океана и в том числе во многих районах прибрежных вод с высокой мутностью [7, 8].

Вычисление нормализованной яркости восходящего излучения морской поверхности основано на упрощенном уравнении атмосферной коррекции следующего вида:

$$L_T(\lambda) = L_A(\lambda) + L_R(\lambda) + L_W(\lambda)t(\lambda), \quad (3)$$

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 (релеевским) 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, $[\lambda] = \text{мкм}$, τ_{Oz} – оптическая толщина озонового слоя, θ_v – зенитный угол бортового фотометра.

Атмосферная коррекция данных измерений яркости основана на анализе измеренных сигналов в ИК области спектра, где из-за сильного поглощения восходящее излучение морской поверхности практически отсутствует и поэтому $L_T(\lambda_*) = L_A(\lambda_*) + L_R(\lambda_*)$.

Величину $L_T(\lambda_*)$ можно представить в виде следующего соотношения:

$$L_T(\lambda_*) = F_0' (a\lambda_*^{-n} + r\lambda_*^{-4}), \quad (4)$$

где n – показатель Ангстрема, a , r – весовые множители пропорциональные величинам аэрозольного и молекулярного рассеяния, $F_0'(\lambda_*) = F_0(\lambda_*) \exp[-(\cos\theta_V^{-1} + \cos\theta_S^{-1})\tau_{Oz}(\lambda_*)]$, $F_0(\lambda_*)$ – солнечная облученность на верхней границе атмосферы.

В табл.1 представлены величины τ_R , τ_{Oz} и F_0 для различных длин волн в видимой и ИК частях спектра по данным различных источников.

Таким образом, для выполнения атмосферной коррекции необходимо определить минимальную длину волны λ_* в красной или ИК области спектра и параметры a , r , n . Определение длины волны λ_* может быть выполнено на основе соотношения $R[L_w(\lambda) \cdot L_T(\lambda_*)] = 0$, которое соответствует отсутствию корреляции между яркостью восходящего излучения морской поверхности $L_w(\lambda)$ в видимой части спектра и показаниями спектрофотометра $L_T(\lambda_*)$ в красной или ИК части спектра. Это условие предполагает, что сигнал $L_w(\lambda)$ определяется оптической структурой верхнего слоя моря, а сигнал $L_T(\lambda_*)$ – исключительно характеристиками атмосферы. Для условий Азовского моря $\lambda_* = 0,8585$ мкм [8].

Величины n , a , r определяются по спектральной зависимости $L_T(\lambda_{*i})$ длинноволновой части спектра ($\lambda_* \geq 0,8585$ мкм) для каждого пикселя анализируемой акватории. Для этого используется статистический метод макси-

Т а б л и ц а 1. Оптические толщины слоев молекулярного рассеяния τ_R , озонового слоя τ_{Oz} и облученности на верхней границе атмосферы F_0 при различных длинах волн λ .

λ , мкм	τ_R	τ_{Oz}	F_0 , Вт·м ⁻² ·стр ⁻¹ ·мкм ⁻¹
0,412	0,3167	0,000485	170,57
0,443	0,2377	0,00126	186,50
0,469	0,190	0,0032	192,17
0,488	0,161	0,0073	191,82
0,531	0,1135	0,0217	188,57
0,551	0,0999	0,0274	187,16
0,555	0,0953	0,0274	180,92
0,645	0,0504	0,0219	162,70
0,667	0,0446	0,0161	154,15
0,678	0,0417	0,0132	149,88
0,748	0,0286	0,00397	128,07
0,8585	0,0162	0,00154	104
0,869	0,0156	0,00123	97,3
1,24	0,0036	$3 \cdot 10^{-5}$	51,85
1,64	0,0011	$5 \cdot 10^{-7}$	25
2,13	0,0004	$2,3 \cdot 10^{-9}$	10,22

мального правдоподобия [10]. Функция правдоподобия записывается следующим образом:

$$L(\lambda_{*1}, \lambda_{*2}, \dots, \lambda_{*q}; A, m) = \prod_{i=1}^{i=q} p(\lambda_{*i}; A, m), \quad (5)$$

где $p(\lambda_{*i}; A, m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\lambda} \exp\left(-\frac{(q_i - \ln A + m \ln \lambda_{*i})^2}{2\sigma_\lambda^2}\right)$ – плотность распределения

вероятностей отклонения $\Delta_i = \ln\left(\frac{L_T(\lambda_{*i})}{F_0(\lambda_{*i})} - (\ln A - m \ln \lambda_{*i})\right)$.

Система уравнений правдоподобия для рассматриваемого случая имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial A} = 0, \quad \frac{\partial \ln L}{\partial m} = 0. \quad (6)$$

Опуская преобразования, находим

$$m = \frac{\langle q \ln \lambda_* \rangle - \langle q \rangle \langle \ln \lambda_* \rangle}{\langle \ln \lambda_* \rangle^2 - \langle \ln^2 \lambda_* \rangle}, \quad A = \exp(\langle q \rangle + m \langle \ln \lambda_* \rangle), \quad (7)$$

где $\langle z \rangle$ – среднее значение z .

Учитывая, что $A = a + r$ и $a(\lambda_*^{-n} - \lambda_*^{-4}) = A(\lambda_*^{-m} - \lambda_*^{-4})$ и, вводя обозначения $C_{12} = \frac{\lambda_{*1}^{-m} - \lambda_{*1}^{-4}}{\lambda_{*2}^{-m} - \lambda_{*2}^{-4}}$, $Q_{12} = \lambda_{*1}^{-4} - C_{12}\lambda_{*2}^{-4}$, $\lambda_{*1} = 0,8585$ мкм, $\lambda_{*2} = 2,13$ мкм (границы диапазона), получаем следующее нелинейное уравнение для параметра Ангстрема n :

$$\lambda_1^{-n} - C_{12}\lambda_2^{-n} = Q_{12}. \quad (8)$$

Полагая среднее значение параметра Ангстрема $n_0 = 1,5$, используя разложение показательных функций в степенные ряды и ограничиваясь второй степенью, находим:

$$\lambda_1^{-n_0} [1 + (n - n_0) \ln \lambda_1 + 0,5(n - n_0)^2 (\ln \lambda_1)^2] - C_{12}\lambda_2^{-n_0} [1 + (n - n_0) \ln \lambda_2 + 0,5(n - n_0)^2 (\ln \lambda_2)^2] = Q_{12}. \quad (9)$$

На основе преобразования уравнения (9) для указанных значений λ_1, λ_2 получаем квадратное уравнение для величины $\Delta = n - n_0$:

$$\Delta^2 + \frac{0,4865C_{12} - 0,3837}{0,02927 - 0,1839C_{12}} \Delta + \frac{2,5143 - 0,6434C_{12} - 2Q_{12}}{0,02927 - 0,1839C_{12}} = 0. \quad (10)$$

Параметры a и r в (3) определяются по следующим соотношениям:

$$a = \frac{(\lambda_{1,2})^{-m} - (\lambda_{1,2})^{-4}}{(\lambda_{1,2})^{-n} - (\lambda_{1,2})^{-4}} \cdot A, \quad r = A - a. \quad (11)$$

С учетом (3) – (11), индекс цвета $I_{WN}(\lambda_1, \lambda_2) = I_{WN}(0,469/0,555)$ для длин волн 0,469 и 0,555 мкм вычисляется для каждого пикселя следующим образом:

$$I_{wn}(0,469/0,555) = \frac{L_T(0,469) - F_0'(0,469)[a(0,469)^{-n} + r(0,469)^{-4}]}{L_T(0,555) - F_0'(0,555)[a(0,555)^{-n} + r(0,555)^{-4}]} \times \quad (12)$$

$$\times P(0,469/0,555)$$

где $P(0,469/0,555) = \exp\left\{\left[\frac{\tau_R(0,469) - \tau_R(0,555)}{2} + \tau_{Oz}(0,469) - \tau_{Oz}(0,555)\right] \times\right.$

$\times \left(\frac{1}{\cos\theta_V} + \frac{1}{\cos\theta_S}\right)\}$ – 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 $\pm 2\%$.

Пример распределения $I_{wn}(0,469/0,555)$, в дальнейшем будет использоваться обозначение I_{wn} , по данным космической съемки 6 мая 2010 г. приведен на рис.3.

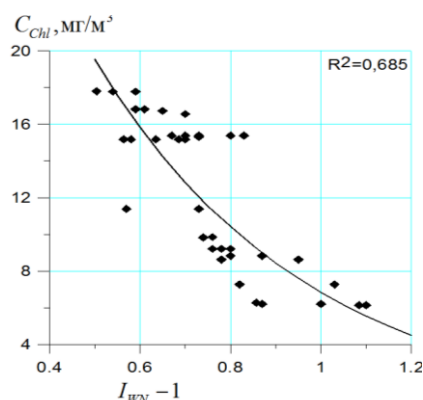
Видно, что оптическая структура восходящего излучения верхнего слоя Азовского моря характеризуется значительной неоднородностью. Воды с относительно высокой мутностью наблюдаются в западной части моря и в северной зоне Таганрогского залива. В центральной части моря вода характеризуется более высокой прозрачностью.

Результаты. Используя данные прямых измерений концентрации хлорофилла-а и пространственное распределение индекса цвета, выполнен анализ взаимосвязи этих величин. Для этой цели использованы данные экспедиции ЮНЦ РАН, выполненной 5 – 7 мая 2010 г. в Таганрогском заливе, воды которого характеризуются высокой мутностью (рис.4, 5).

Пространственное распределение концентрации взвеси (C_s , г/м³) и глубины видимости белого диска (Z_d , м) в Азовском море вычислены на основе приведенных выше регрессионных зависимостей $C_s = f(C_{chl})$ и $C_s = f(Z_d)$ (рис.6, 7).

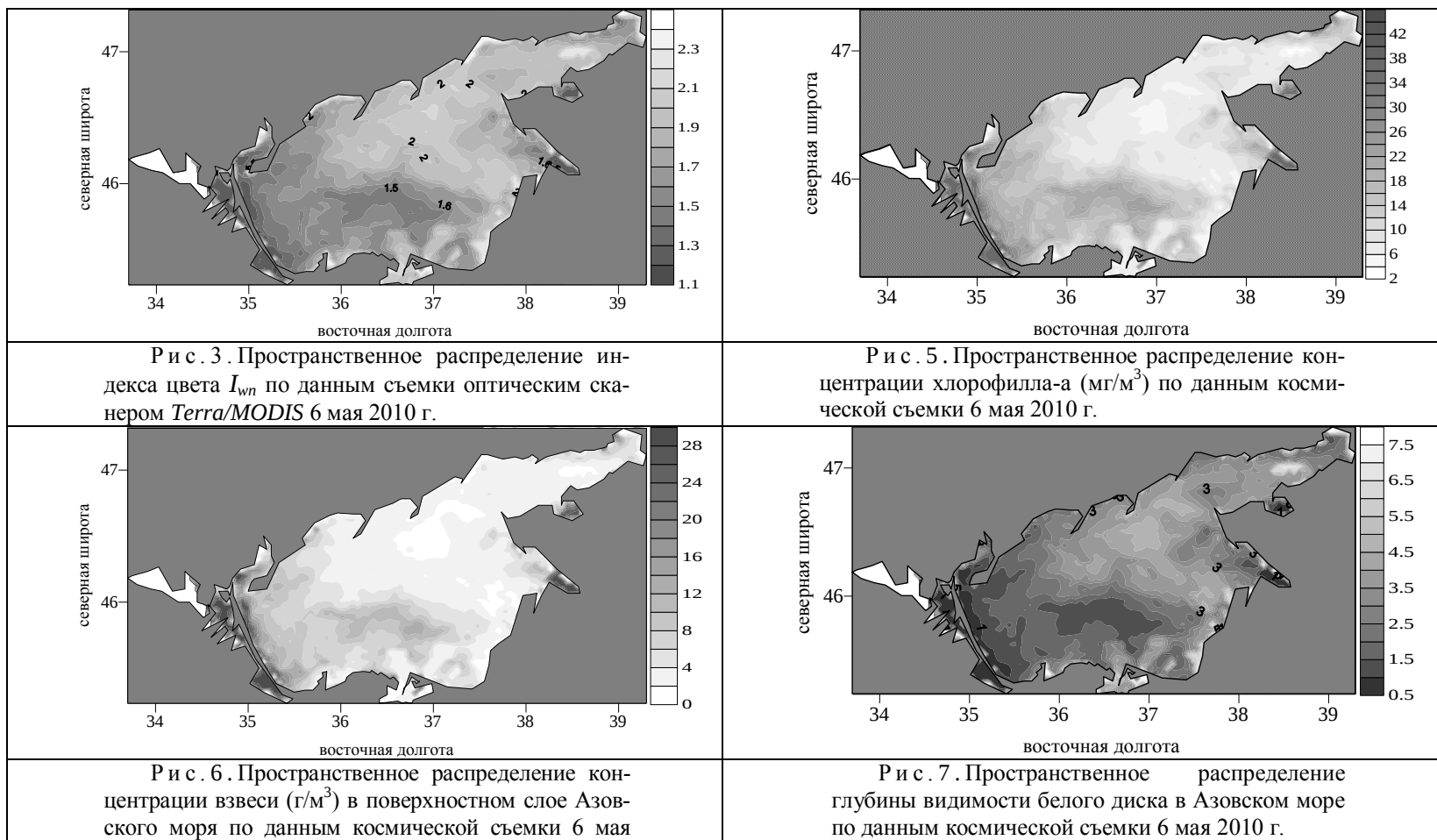
Можно отметить значительную пространственную неоднородность анализируемых параметров и их аномальные значения в Таганрогском заливе и в юго-западной части моря.

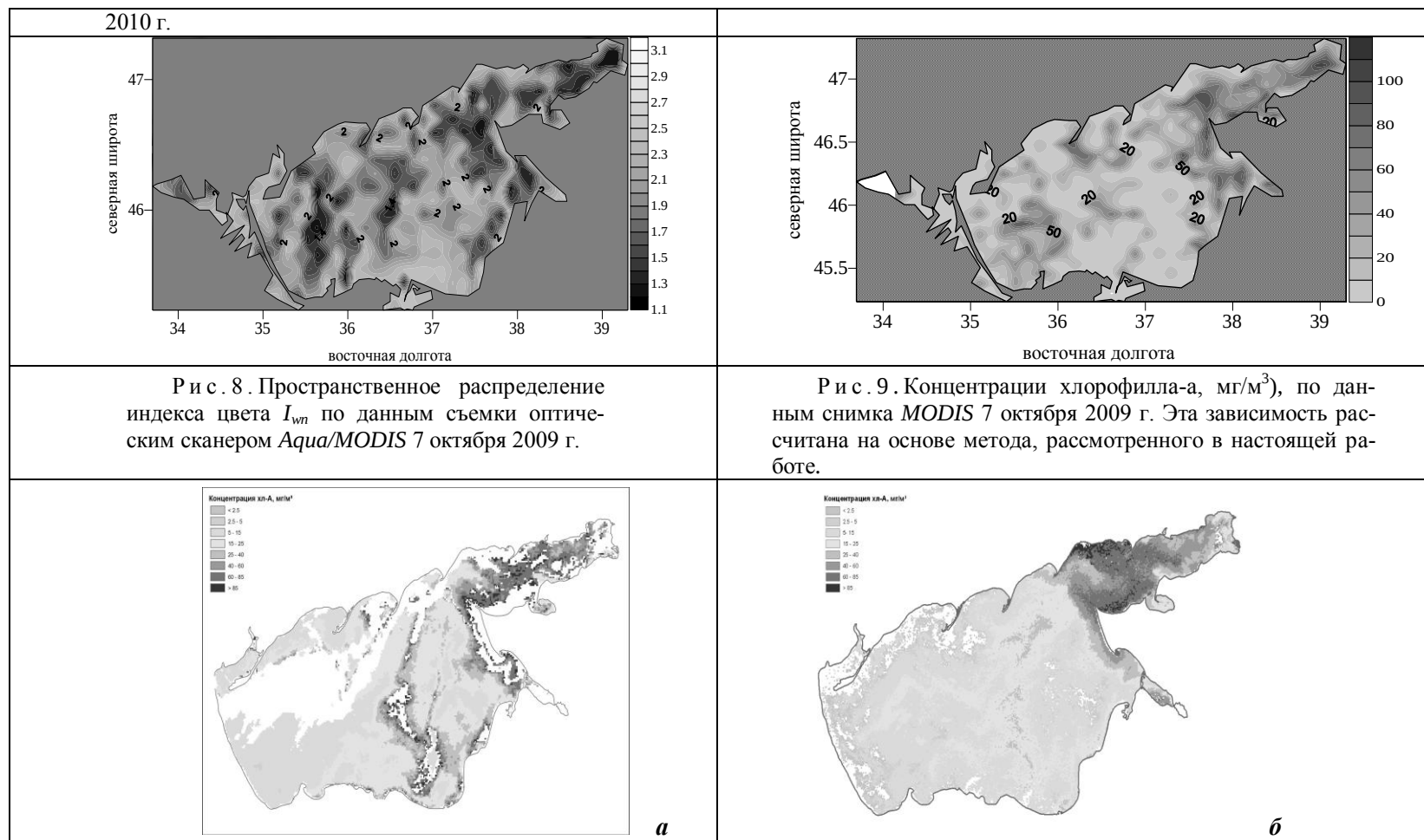
На рис.8 и 9 показаны пространственные распределения индекса цвета и концентрации хлорофилла-а по данным съемки сканером MODIS 7 октября



2009 г. Для полученных пространственных распределений характерна хорошо выраженная ячеистая структура, на фоне которой видны следующие особенности: высокая концентрация хлорофилла-а до 80 – 100 мг/м³ в Таганрогском за-

Р и с . 4 . Корреляционная зависимость индекса цвета и концентрации хлорофилла-а по данным прямых измерений и космической съемки в мае 2010 г. Уравнение регрессии: $C_{chl} = 55,719 \cdot \exp[-2,097(I_{wn} - 1)]$.





Р и с . 1 0 . Концентрации хлорофилла-а, рассчитанные *NASA* по снимку *MODIS* (*а*) и по алгоритму [10 – 12] на основе снимка *MERIS* (*б*) 6 октября 2009 г.

ливне с границей раздела вдоль северо-восточного берега Азовского моря, область относительно прозрачных вод в центральной части моря и увеличение C_{chl} в юго-западной части моря.

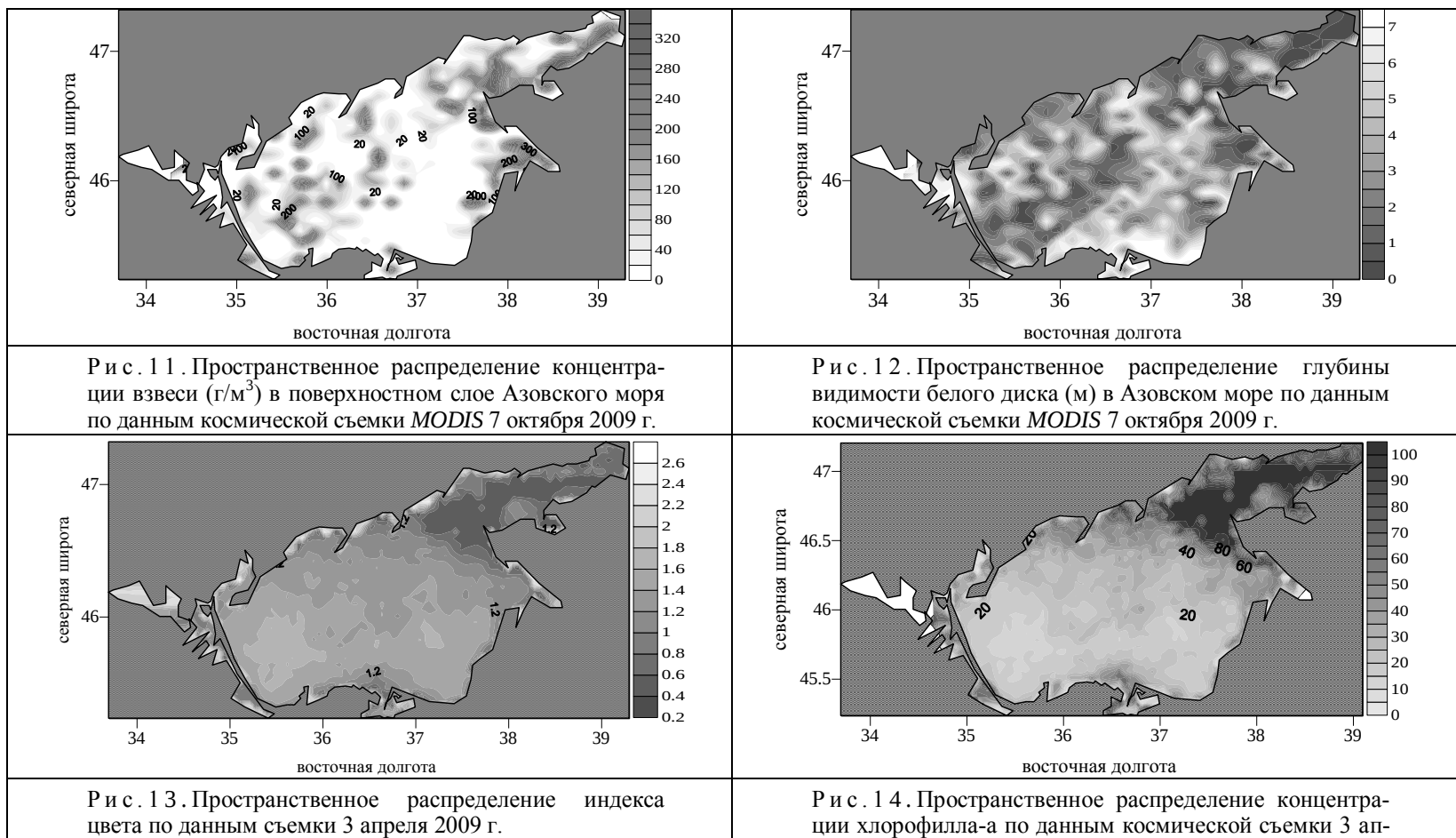
Для сравнения на рис.10 приведено пространственное распределение концентрации хлорофилла-а, рассчитанное на основе снимка *MODIS* 6 октября 2009 г. по алгоритму *NASA* (рис.10, а) и на основе снимка *MERIS* 6 октября 2009 г. (рис.10, б) по алгоритму, предложенному А.Гительсоном в [10 – 12]. По этим данным высокая концентрация хлорофилла-а наблюдается в Таганрогском заливе (свыше 85 мг/м³) с границей раздела вдоль северо-восточного берега, уменьшение этого параметра в центральной части моря и увеличение в южной, юго-западной части, что в целом совпадает с нашими оценками. Основное различие заключается в том, что по нашим данным присутствует хорошо выраженная ячеистая структура, которая не проявилась на рис.10. Возможное объяснение этого различия состоит в том, что при обработке данных по алгоритмам *NASA* и А.Гительсона использовалось пространственное сглаживание неоднородностей концентраций хлорофилла-а, которое мы не применяли. Заметим также, что разница в концентрации хлорофилла-а между данными *NASA* и А.Гительсона достигает ± 50 мг/м³ при характерном значении этой разницы в 20 – 30 мг/м³.

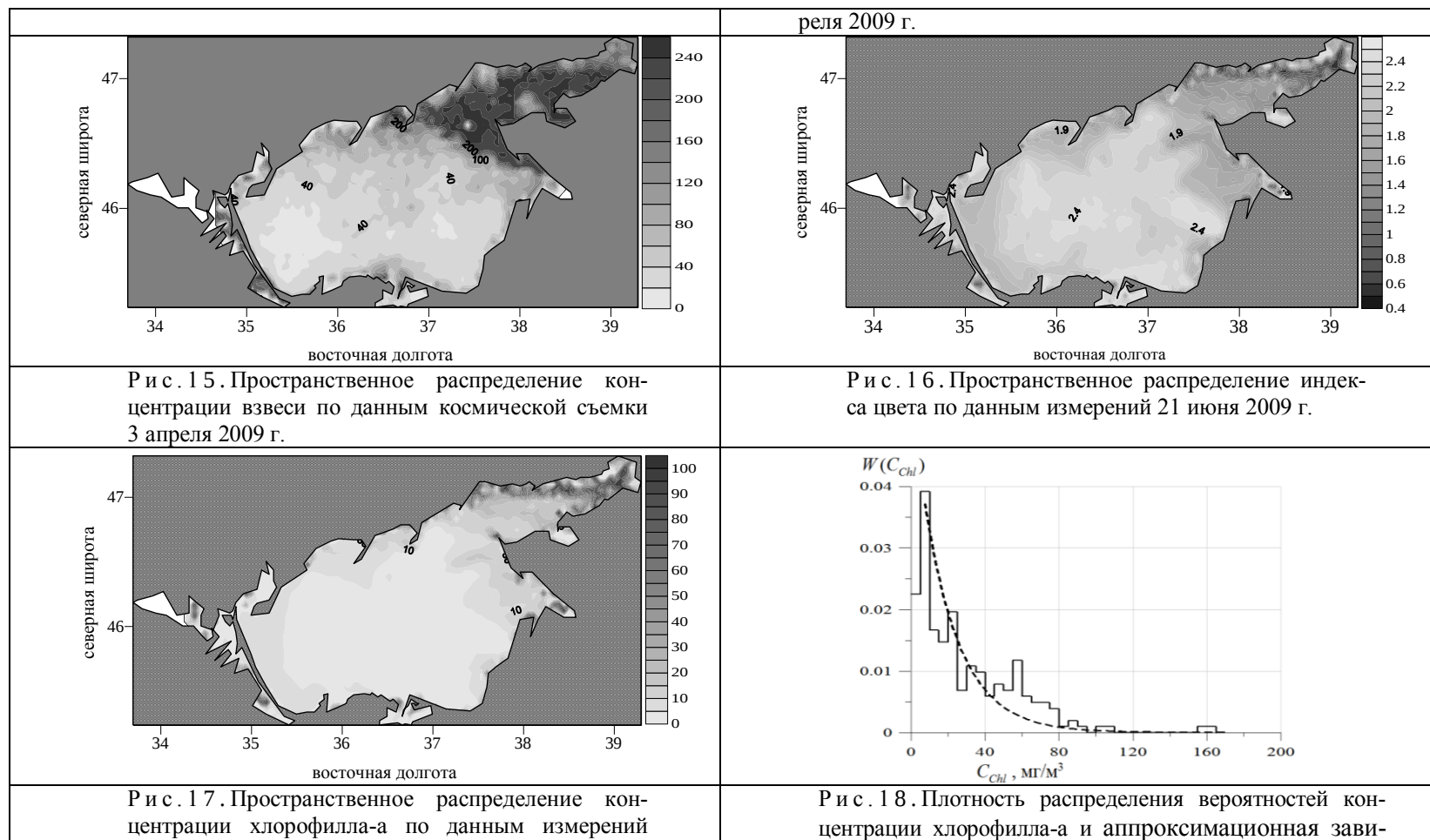
Отмеченная ячеистая структура, возможно, обусловлена значительной изменчивостью поля ветра в период с 4 по 8 октября 2009 г. За этот период времени ветер менялся с северо-западного на южный, на юго-восточный и затем на северо-западный со скоростями от 12 до 5 – 7 м/с. Такие изменения скорости и направления ветра в условиях мелководного Азовского моря приводят к относительно быстрым изменениям поля течений и обменных процессов, что в свою очередь может формировать отмеченную ячеистую структуру оптических контрастов на морской поверхности.

На рис.11 показано пространственное распределение концентрации взвеси на поверхности моря, на рис.12 – глубина видимости белого диска. По этим данным в отдельных зонах Таганрогского залива концентрация взвеси достигает 300 – 340 г/м³.

Распределение глубины видимости белого диска по своим структурным особенностям соответствует распределения концентрации хлорофилла-а и взвеси: низкая прозрачность в Таганрогском заливе, в граничной зоне вдоль северо-восточного берега и в юго-западной части моря.

С целью изучения особенностей пространственной структуры концентраций хлорофилла-а и взвеси в условиях высокой мутности вод в Таганрогском заливе были обработаны космические снимки в те периоды времени, когда по данным прямых измерений были обнаружены высокие концентрации хлорофилла-а. Распределение индекса цвета для таких условий показано на рис.13, концентрации хлорофилла-а – на рис.14, взвеси – на рис.15. Видно, что в центральной части Таганрогского залива концентрация хлорофилла-а достигает 100 мг/м³. По данным контактных измерений в отдельных точках Таганрогского залива в это период времени концентрация хлорофилла-а достигала 75 – 90 мг/м³, взвеси – свыше 200 г/м³. Характерной чертой распределения этих параметров является резкая граница раздела между Таганрогским заливом и центральной частью моря. Такая граница раздела сфор-





21 июня 2009 г.	симось $W(C_{chl}) = 0,0548 \cdot \exp(-0,0519 \cdot C_{chl})$, $R^2 = 0,684$.
-----------------	--

мировалась в условиях слабого северного ветра со скоростью 2 – 4 м/с, когда интенсивность обменных процессов в море находится на низком уровне.

Аналогичный космический снимок был обработан для условий выполнения прямых измерений концентрации хлорофилла 17 – 21 июня 2009 г. Скорость ветра в этот период времени изменялась от 2 – 4 до 10 – 12 м/с, направление от северного до восточного. Данные сканера *MODIS* были получены 21 июня, т.е. в 172 день. Распределение индекса цвета для этих условий показано на рис.16, распределение концентрации хлорофилла-а – на рис.17. По данным прямых измерений в Таганрогском заливе концентрация хлорофилла-а достигала в этот период времени 75 – 76 мг/м³. Особенностью пространственной структуры этого пигмента является резкое увеличение его концентрации в Таганрогском заливе до 80 – 90 мг/м³, что соответствует результатам прямых измерений. В центральной части моря наблюдается обширная область вод с относительно низким содержанием хлорофилла-а.

Данные прямых измерений концентрации хлорофилла-а были использованы для расчета плотности распределения вероятностей и некоторых статистических параметров C_{Chl} . На рис.18 представлена гистограмма этого распределения $W(Chl)$ и аппроксимация в виде экспоненты $W(C_{Chl}) = 0,0548 \cdot \exp(-0,0519 \cdot C_{Chl})$. По этим данным определены среднее значение концентрации хлорофилла-а, $\langle C_{Chl} \rangle = 29,63$ мг/м³ и стандартное отклонение $\sigma_{Chl} = 26,85$ мг/м³. Если обратиться к пространственным распределениям C_{Chl} по данным космических съемок, можно отметить, на большей части Азовского моря величины концентрации примерно равные среднему значению $\langle C_{Chl} \rangle$ и в тоже время с вероятностью около 1 % возможны высокие концентрации, равные $\langle C_{Chl} \rangle + 3\sigma_{Chl}$, т.е. 110 мг/м³.

Выполненный анализ послужил основанием для следующих **выводов**.

1. Разработанная модель расчета индекса цвета для спектральных составляющих восходящего излучения на длинах волн 0,469 и 0,555 мкм позволяет получить оптические контрасты, имеющие высокую корреляцию с концентрацией хлорофилла-а для вод центральной части Азовского моря и Таганрогского залива с низкой прозрачностью.

2. Пространственная структура концентрации хлорофилла-а и взвеси характеризуются значительной неоднородностью. Наибольшие перепады этих параметров наблюдаются на границе Таганрогского залива и вдоль северо-восточного берега Азовского моря. Увеличение перепадов указанных параметров наблюдается при штилевых условиях, когда снижается интенсивность обменных процессов между водами Таганрогского залива и центральной частью моря.

3. Плотность распределения вероятностей концентрации хлорофилла-а по данным непосредственных измерений соответствует экспоненциальному распределению вероятностей со средним значением 29,63 мг/м³ и стандартным отклонением 26,85 мг/м³. Распределения концентрации хлорофилла-а по данным космических съемок с этими оценками согласуются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кушнир В.М., Федоров С.В., Петренко Л.А. Реакция Азово-Черноморского бассейна на интенсивный циклон 10-11 ноября 2007 г по данным дистанционного

- зондирования // Морские испытания.– 2008.– № 1.– С.62-81.
2. Матишов Г.Г., Савицкий Р.М., Ижебейкин Ю.И. Условия и последствия аварий судов в Керченском проливе во время шторма 11 ноября 2007 г. // Вестник Юного научного центра РАН.– 2008.– т.4, № 3.– С.54-63.
 3. Кушнир В.М., Бердников С.В. Характеристики взвеси в Керченском проливе по данным контактных и дистанционных измерений // Геоинформатика.– 2010.– № 2.– С.61-67.
 4. ГОСТ 17.1.04.02.-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а.– М.: Изд-во стандартов, 1990.– 16 с.
 5. Jerlov N.G. Marine optics.–Amsterdam: Elsevier, 1976.– 356 p.
 6. Урденок В.А., Циммерман Г. Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы. Т.2, часть 2.– Москва-Берлин-Севастополь: Изд. Института космических исследований АН ГДР, 1987.– 197 с.
 7. 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.– Севастополь: МГИ АН УССР, 1985.– 12 с. Деп. в ВИНТИ, 5043-85.
 8. 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.
 9. Кушнир В.М. Характеристики приповерхностного слоя Азовского моря по данным оптических сканеров системы MODIS // Исследование Земли из космоса.– 2009.– № 3.– С.35-46.
 10. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн.2.– М.: Советское радио, 1960.– 503 с.
 11. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Povazhnyy V. Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS. The Azov Sea case study, // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.– 2009.– v.6, № 4.– P.845-849.
 12. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Povazhnyy V. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data – successes and challenges // Environ. Res. Lett.– 2009.– 4.– P.045005-045012.
 13. Матишов Г.Г., Поважный В.В., Бердников С.В., Мозес В.Дж. Гительсон А.А. Оценки концентрации хлорофилла а и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных // Докл. академии наук.– 2010.– т.432, № 4.– С.563-566.

Материал поступил в редакцию 11.10.2010 г.