

УДК 551.46.08

В. М. Кушнир<sup>1</sup>, С. В. Станичный<sup>1</sup>, Т. Я. Чурилова<sup>2</sup><sup>1</sup>Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, Севастополь<sup>2</sup>Институт биологии южных морей Национальной академии наук Украины

## Использование мультиспектральных космических изображений для изучения экологического состояния северо-западной части Черного моря

*Представлено 25.06.07*

Описується метод і результати визначення індексу кольору  $I_t(\lambda_1, \lambda_2)$  для довжини хвиль  $\lambda_1 = 469$  нм,  $\lambda_2 = 555$  нм за даними вимірювань яскравості випромінювання кольоровим космічним сканером типу MODIS/TERRA. Індекс кольору використано для обчислення просторових розподілів концентрації хлорофілу-а, кольору морської води та її прозорості. Просторова структура і значення концентрації хлорофілу-а за даними дистанційного зондування відповідають результатам синхронних контактних вимірів у цьому ж районі моря.

Многочисленные спутниковые измерения восходящего излучения цветовыми сканерами SeaWiFS, (1994); MODIS, (1998); MERIS, (1998) и другими дали значительные объемы информации об оптико-биологических параметрах приповерхностных слоев водной среды. Наиболее сложной и изменчивой пространственно-временная структура спутниковых данных оказалась в прибрежных зонах с высоким насыщением промышленными и сельскохозяйственными производствами, в устьях рек с выносом больших объемов минеральной взвеси, биогенных элементов, различных загрязнений. Эти условия характерны для северо-западной части Черного моря, экосистема которого находится в состоянии, близком к критическому. Главная проблема здесь состоит в чрезвычайно большом притоке биогенных элементов и загрязнений при низкой интенсивности вентиляции водной среды. При этих условиях морская экосистема становится нестабильной вследствие загрязнений, эвтрофикации, эрозии берегов, а также других природных и антропогенных воздействий. В связи с этим существует острая проблема регулярного контроля параметров морской среды для адекватной реакции на возможные неблагоприятные последствия. Такой регулярный контроль экологического состояния морской среды в виде пространственно распределенных данных невозможен без применения методов дистанционного зондирования, в частности съемок морской

поверхности цветовыми сканерами. Однако потенциальные возможности таких методов пока широко не используются. Стандартные методы НАСА для обработки оптико-биологических данных Черного моря непригодны, так как в алгоритмах не учитываются региональные особенности черноморских вод.

При дистанционном зондировании морской поверхности к числу наиболее информативных параметров относится индекс цвета, который определяется как комбинация данных оптических каналов с различными длинами волн. Одной из таких комбинаций является отношение нормализованной яркости в двух спектральных участках:  $I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2) = L_{wn}(\lambda_1)/L_{wn}(\lambda_2)$ . При вычислении индекса цвета  $I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2)$  происходит компенсация мультипликативных погрешностей измерения и в значительной степени ослабляется влияние таких факторов, как зенитные углы Солнца и бортового спектрофотометра, освещенность морской поверхности, цвет неба. Эти особенности индекса цвета являются принципиальной предпосылкой его использования для изучения экологического состояния морской среды. Величина  $I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2)$  связана с такими параметрами, как концентрация кремния и хлорофилла, соленость, цвет воды, глубина видимости стандартного белого диска, показатель ослабления, концентрация взвеси и другими. Соответствующие эм-

пирические соотношения получены по результатам судовых измерений в различных районах Мирового океана [1, 3]. С целью изучения возможности использования индекса цвета для экологического контроля в настоящей работе выполнен расчет  $I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2)$  для северо-западной части Черного моря на основе данных измерений восходящего излучения морской поверхности цветовыми сканерами MODIS, а также определены основные структурные особенности индекса цвета в этом районе и их связь с концентрацией хлорофилла. Выполнено сопоставление данных дистанционного зондирования и результатов непосредственных (контактных) измерений.

Сигналы бортового спектрофотометра цветового сканера  $L_i(\lambda)$ , прокалиброванные в энергетических единицах ( $Вт \cdot м^{-2} мкм^{-1} стер^{-1}$ ), в значительной степени отличаются от действительных значений яркости восходящего излучения морской поверхности  $L_w(\lambda)$  из-за влияния атмосферы.

В наиболее простом виде связь между этими величинами имеет следующий вид:

$$L_i(\lambda) = L_a(\lambda) + L_R(\lambda) + L_w(\lambda) i(\lambda),$$

где  $L_a(\lambda)$ ,  $L_R(\lambda)$  — значения яркости, обусловленные аэрозольным и молекулярным (рэлеевским) рассеиванием в атмосфере на длине волны  $\lambda$ ,

$$i(\lambda) = \exp\{-[0.5\tau_R(\lambda) + \tau_{O_2}(\lambda)](\cos\theta_v)^{-1}\}$$

— коэффициент пропускания атмосферы на этой же длине волны. Оптическая толщина  $\tau_R(\lambda)$  слоя молекулярного рассеивания слоя равна  $\tau_R(\lambda) = 0.0079\lambda^{-4.16}$ , ( $\lambda$ , мкм),  $\tau_{O_2}$  — оптическая толщина озонового слоя,  $\theta_v$  — зенитный угол бортового спектрофотометра [2].

Атмосферная коррекция данных измерений нормализованной яркости восходящего излучения морской поверхности в настоящей работе основана на определении такой длины волны  $\lambda^*$  в ИК-области спектра, где выполняется условие некоррелированности яркости восходящего излучения  $L_w(\lambda)$  и сигнала бортового спектрофотометра  $L_i(\lambda^*)$ :

$$R[L_w(\lambda) \cdot L_i(\lambda^*)] = 0.$$

Это условие предполагает, что  $L_w(\lambda)$  определяется оптической структурой морской поверхности, а  $L_i(\lambda^*)$  — исключительно оптическими свойствами атмосферы.

Индекс цвета  $I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2)$  вычисляется по соотношению

$$I_{wn}(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{L_w(\lambda_1)q(\lambda_1)}{L_w(\lambda_2)q(\lambda_2)} = \frac{L_i(\lambda_1) - L_a(\lambda_1) - L_R(\lambda_1)}{L_i(\lambda_2) - L_a(\lambda_2) - L_R(\lambda_2)} \frac{i(\lambda_2)}{i(\lambda_1)} \frac{q(\lambda_1)}{q(\lambda_2)},$$

где

$$\frac{q(\lambda_1)}{q(\lambda_2)} = \exp\left\{\left[\frac{\tau_R(\lambda_1) - \tau_R(\lambda_2)}{2} + \tau_{O_2}(\lambda_1) - \tau_{O_2}(\lambda_2)\right] \frac{1}{\cos\theta_0}\right\}$$

— поправочный множитель при пересчете яркости восходящего излучения в нормализованную яркость,  $\theta_0$  — зенитный угол Солнца [1, 2].

Распределение индекса цвета в северо-западной части Черного моря было вычислено по данным спутниковых измерений 7 октября 2005 г. Основная особенность этого распределения состоит в том, что в прибрежной зоне западной части акватории наблюдаются минимальные значения индекса цвета, что соответствует повышенной мутности водной среды. Эта повышенная мутность обусловлена речным стоком Дуная, Днестра, Днепра и других рек. Их воды характеризуются высокой концентрацией биогенных элементов и загрязнений, которые оказывают влияние на экологические параметры этого района Черного моря. Аналогичные распределения индекса цвета были получены по спутниковым снимкам этого же района, выполненным в мае 2003 г. [1] и, вероятно, относятся к постоянным региональным особенностям района.

Пространственные распределения индекса цвета могут быть использованы для расчета глубины видимости стандартного белого диска  $Z_d = 9.876I_{wn}^{0.4325}$ , цвета морской воды  $CN = 7.8I_{wn}^{-0.4907}$ , показателя ослабления  $\epsilon = 0.23 - 0.151I_{wn}$  и других оптических параметров приповерхностного слоя моря [3]. Наиболее информативным параметром для оценки экологического состояния морской среды является концентрация хлорофилла-а и его динамика.

С использованием полученных снимков морской поверхности MODIS/TERRA и вычисленных распределений индекса цвета были получены пространственные распределения концентрации хлорофилла-а  $C_{chl}$  для этих дней. Расчет проводился по соотношению [4]

$$C_{chl} = \exp[1.078 - 2.54 \ln(I(0.469/0.555))].$$

Распределения концентрации хлорофилла-а показаны на рис. 1. Основные особенности этого распределения состоят в увеличении его концентрации вблизи береговой черты, причем наибольшие значения (до 8...10 мг/м<sup>3</sup>) наблюдаются в районах речного стока. В этих же районах концентрация хлорофилла-а характеризуется значительной изменчивостью. В центральной и восточной частях района концентрация хлорофилла-а относительно невелика, и в основном не превышает 1...2 мг/м<sup>3</sup>.

На рис. 2, 3 представлены оптические параметры приповерхностного слоя моря: цвет моря по международной шкале цветности (рис. 2) и показатель ослабления направленного света (рис. 3). В целом

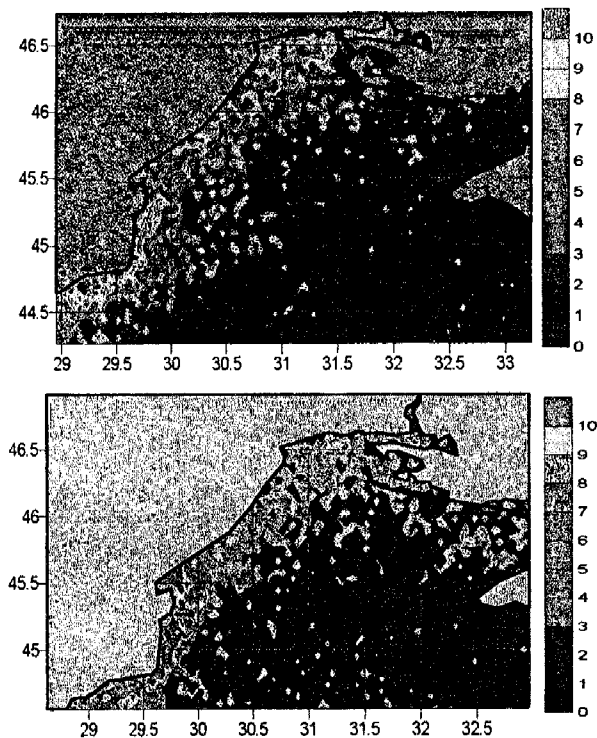


Рис. 1. Пространственные распределения концентрации хлорофилла-а по данным измерений сканером MODIS/TERRA 5 и 7 октября 2005 г.

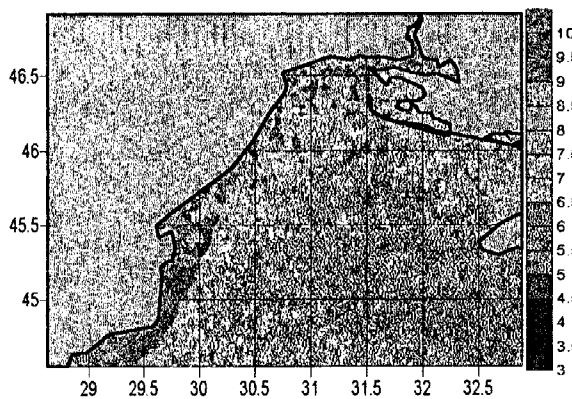


Рис. 2. Цвет моря по международной шкале цветности. В центральной и восточной частях района исследований преобладают голубой и зеленовато-голубой цвет, вблизи берегов — голубовато-зеленый и зеленый цвета

пространственная структура этих параметров соответствует данным прямых измерений в этом районе Черного моря в летний период [1].

Кроме указанных оптико-биологических параметров, состояние экосистемы северо-западного района Черного моря зависит от пространственного

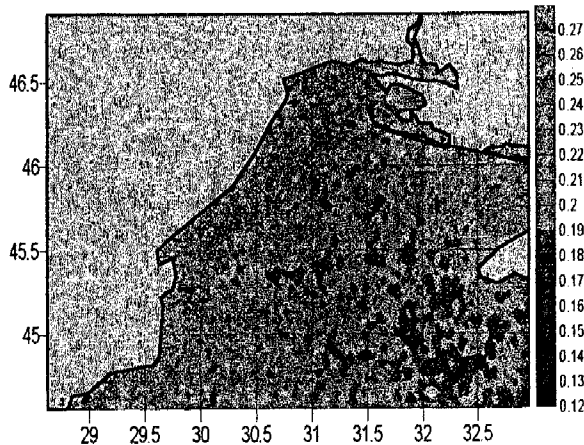


Рис. 3. Показатель ослабления  $\epsilon$ ,  $m^{-1}$

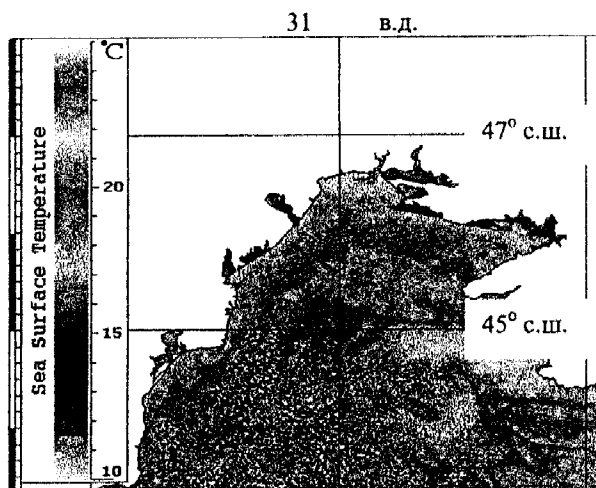


Рис. 4. Температура морской поверхности по данным сканера MODIS/TERRA 7 октября 2005 г.

распределения температуры. На рис. 4 приведено соответствующее распределение, полученное по спутниковым измерениям 7 октября 2005 г. Его основной особенностью является подобие пространственному распределению оптических характеристик: область пониженных температур примерно соответствует области вод пониженной прозрачности вдоль северо-западного берега Черного моря, а область прогретых до 20...22 °С вод соответствует положению зоны вод с высокой прозрачностью. В исследуемом районе в осенний период изменение температура поверхностного слоя связано со стоком более холодных и мутных речных вод. Таким образом, температура является косвенным показателем

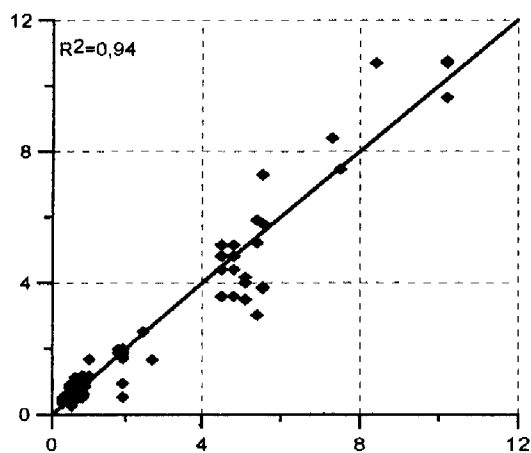


Рис. 5. Сопоставление концентрации хлорофилла-а по данным дистанционного зондирования и непосредственных измерений

телем распространения привносимых со стоком растворенных соединений и взвеси.

Во время спутниковых съемок выполнялись экспедиционные исследования в западной части Черного моря. При этом были выполнены непосредственные измерения концентрации хлорофилла в 35 точках. На рис. 5 представлены результаты сопоставления концентрации хлорофилла-а по данным непосредственных и дистанционных измерений.

Несмотря на существенные отклонения отдельных точек от линии равных значений, общий уровень достоверности высок и составляет 0.94. Это означает возможность использования данных цветковых сканеров и рассмотренного метода обработки данных для оперативных измерений концентрации хлорофилла-а в северо-западной части Черного моря.

Оперативные данные о пространственном распределении оптико-биологических параметров и температуры в северо-западной части Черного моря позволяют объективно определять зоны, где происходят наиболее значительные изменения этих параметров, и следовательно, изменения состояния экосистемы. При высокой температуре морской во-

ды это приводит к интенсификации химических реакций окисления, высоким темпам потребления кислорода и развитию гипоксии.

Таким образом, использование спутниковой информации позволяет проводить оперативный контроль оптико-биологических параметров в северо-западной части Черного моря и их сравнительный анализ на любых временных масштабах. Это дает возможность объективно оценивать пространственно-временную динамику показателей продуктивности, а также выявлять потенциальные зоны риска развития эвтрофикации в экосистеме северо-западной части Черного моря.

1. Кушнир В. М., Станичный С. В. Оптические неоднородности в северо-западной части Черного моря по данным спутниковых измерений цветковым сканером // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. — Вып. 14. — С. 366—381.
2. Gordon H. R. Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era // J. Geophys. Res.—1997.—102D, N 14.—P. 17081—17106.
3. Optical remote sensing of the sea and the influence of the atmosphere / Eds V. A. Urdenko, G. Zimmerman. — Berlin: Inst. for Space Research Academy of Sciences of GDR, 1987.—Vol. 2.—197 p.
4. O'Reilly J. E., Maritorena S., Mitchel B. G., et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // J. Geophys. Res.—1998.—103C.—P. 24937—24953.

#### USE OF MULTISPECTRAL SPACE IMAGES FOR THE STUDY OF THE ECOLOGICAL STATUS OF THE BLACK SEA NORTH-WEST PART

V. M. Kushnir, S. V. Stanichny, T. Ya. Churilova

We consider the method for the determination of the colour index  $I_t(\lambda_1, \lambda_2)$  for the wave lengths  $\lambda_1 = 469$  nm and  $\lambda_2 = 555$  nm from the data of the water leaving radiation obtained with the use of the colour space scanner MODIS/TERRA. The information on the colour index is used to calculate spatial distributions of the chlorophyll-a concentration, sea water colour and its transparency. The spatial structure and values of the chlorophyll-a concentration from the data of remote sensing are in good agreement with the results of synchronous contact measurements in the same area of the sea.