

## Минеральная и органическая компоненты взвеси по данным космических съемок и непосредственных измерений в Азовском море и Керченском проливе

Рассмотрена возможность использования космических съемок оптическими сканерами системы *MODIS* для разделения суммарной концентрации морской взвеси на минеральную и органическую составляющие. Для этой цели применяются разработанные ранее модели расчета индекса цвета для длин волн 0,469 и 0,555 мкм, а также 0,645 и 0,8585 мкм для условий Азовского моря и Керченского пролива. При получении расчетных соотношений использованы также данные лабораторных анализов проб воды, взятых в различных районах Азовского моря и Керченского пролива экспедициями Южного научного центра РАН в 2006 – 2011 гг.

**Ключевые слова:** оптические сканеры системы *MODIS*, пробы морской воды, лабораторное определение концентрации минеральной и органической компонент взвеси.

**Введение.** К числу основных особенностей морской среды относится наличие взвешенных твердых частиц, которые состоят из минеральных и органических фракций. Морская взвесь имеет различное происхождение: терригенное (продукты размыва горных пород суши), биогенное (фрагменты тел и экскременты морских организмов), вулканогенное (обломочный материал вулканических извержений), хемогенное (продукты химических реакций), космогенное (космическая пыль). Некоторое количество взвешенных веществ попадает в море со сточными водами. Преобладающее значение имеет терригенная и биогенная морская взвесь. Концентрация взвеси в морской среде колеблется в широких пределах (от сотых долей  $г/м^3$  в водах открытого океана до нескольких  $кг/м^3$  в приустьевых районах мутных рек). Взвесь является исходным материалом при образовании донных осадков, от ее содержания и свойств зависят оптические свойства морской воды (прозрачность, цвет, поглощение и рассеяние света). Органическая взвесь служит пищей многим морским организмам. Динамика взвеси непосредственным образом влияет на такие литодинамические процессы, как изменение рельефа дна, образование отмелей, размыв и формирование береговой линии, размыв опорных оснований гидротехнических сооружений, буровых платформ, подводных трубопроводов. Исследование структуры и характеристик морской взвеси проводится при проектировании и эксплуатации всех гидротехнических сооружений.

Известны различные методы определения концентрации взвеси в морской среде: весовой (гравиметрический), оптический, кондуктометрический и акустический. Весовой метод является по существу прямым методом опреде-

ления концентрации общего взвешенного вещества [1]. Для разделения органической и минеральной фракций используют специальные методики [2 – 4]. Весовой метод трудоемок и требует значительного времени для получения результата. В связи с этим активно развиваются различные оптические [5 – 17], кондуктометрические [18 – 23] и акустические [24 – 27] методы определения концентрации взвеси. Эти контактные методы имеют высокое пространственное разрешение и быстроедействие, но в то же время они не позволяют получать данные на значительных акваториях. Для этой цели используются космические съемки оптическими сканерами. При этом для определения концентрации взвеси применяется зависимость уровня восходящего излучения на различных длинах волн от концентрации суммарной взвеси [1, 28 – 31]. Космические съемки оптическими сканерами типа *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS* обеспечивают пространственное разрешение от 250 – 300 м до одного километра при охвате акватории свыше 1000 км. Эти параметры соответствуют условиям мониторинга Азовского моря и Керченского пролива. При этом актуальной проблемой является разделение суммарной взвеси на минеральную и органическую компоненты. Такое разделение необходимо для определения параметров динамики рельефа дна и интенсификации размыва береговой линии, оценивания биопродуктивности отдельных морских районов, уточнения оптических характеристик поверхностного слоя моря и решения других задач морской экологии и литодинамики. Настоящая работа посвящена исследованию указанной проблемы.

**Используемые материалы.** Прямые определения концентрации взвеси, ее минеральной и органической фракций традиционно проводились в экспедициях Южного научного центра (ЮНЦ) РАН. За период с 2006 г. по настоящее время имеется порядка тысячи таких определений в Азовском море и Керченском проливе. Они включают также концентрацию хлорофилла *a*, растворенной органики, кислорода и других химических элементов и соединений.

На рис. 1 показаны основные районы отбора проб. В сентябре 2011 г. при выполнении совместной экспедиции ЮНЦ РАН и МГИ НАН Украины в Керченском проливе было дополнительно получено 79 проб для определения концентрации суммарной взвеси и хлорофилла *a*. Анализ полученных данных показал, что существует значимая корреляция между общей концентрацией взвеси  $C_S$ , ее органической  $C_O$  и минеральной  $C_M$  компонентами, а также концентрацией хлорофилла *a*  $C_{chl}$ . В таблице приведены соответствующие эмпирические соотношения, коэффициенты корреляции, количество экспериментальных значений каждого параметра, его минимальные и максимальные значения.

Для получения концентрации минеральной и органической взвеси по данным космических съемок были использованы модель расчета яркости восходящего излучения на длинах волн 0,469 и 0,555 мкм [25, 29] и определение пространственного распределения индекса цвета  $I_{wn} = L_{wn}(0,469) / L_{wn}(0,555)$ , где  $L_{wn}(\lambda)$  – нормализованная яркость восходящего излучения морской поверхности на длине волны  $\lambda$ .



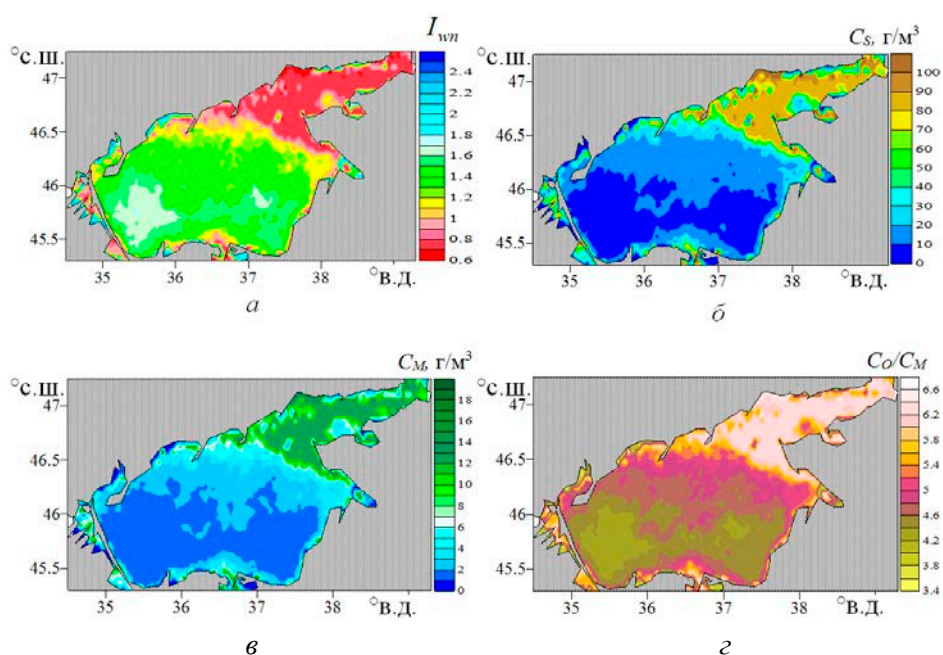
при минимальных и максимальных концентрациях органической взвеси соответственно.

Другая возможность выразить концентрацию органической взвеси по данным расчета индекса цвета состоит в использовании следующих эмпирических соотношений:

$$C_{chl} = 55,72 \exp[-2,1(I_{wn} - 1)], \quad (4)$$

$$C_o = 0,167 C_{chl}. \quad (5)$$

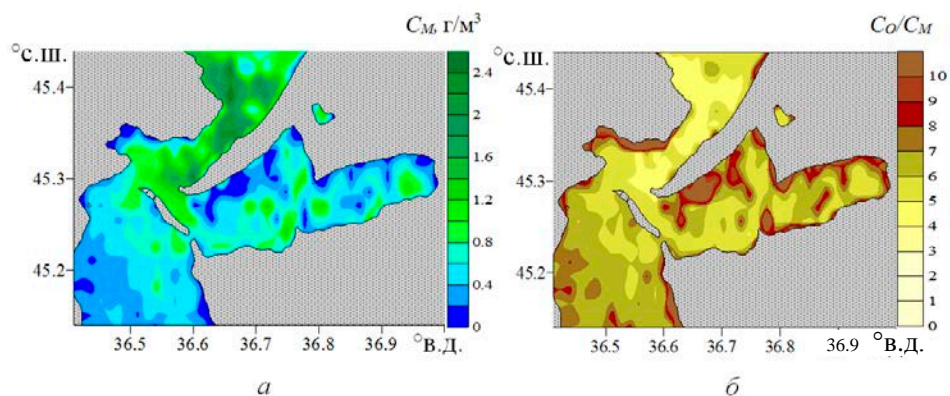
На рис. 2 представлены результаты обработки оптическим сканером MODIS/Aqua одного из снимков Азовского моря, полученного 3 апреля 2009 г. в 10.15 GMT. В этот период была тихая погода, скорость ветра не превышала 2 – 4 м/с, что в результате ослабления обменных процессов способствовало образованию отчетливой границы между Таганрогским заливом и основной частью Азовского моря (рис. 2).



**Р и с. 2.** Пространственное распределение: *a* – индекса цвета  $I_{wn}$ , *б* – концентрации суммарной взвеси  $C_s = C_m + C_o$ , *в* – концентрации минеральной взвеси  $C_m$ , *г* – отношения концентраций  $C_o / C_m$

При оценке концентрации минеральной и органической взвеси в Керченском проливе по данным космических съемок использовались два независимых метода учета влияния атмосферы (рис. 3). Во-первых, применялись упомянутая выше модель расчета яркости восходящего излучения на длинах волн 0,469 и 0,555 мкм [28, 32] и пространственное распределение индекса цвета  $I_{wn} = L_{wn}(0,469) / L_{wn}(0,555)$ . Во-вторых, использовался более простой и

наглядный метод учета атмосферы, основанный на полученных в МГИ НАН Украины данных международного проекта *AERONET*.



**Р и с. 3.** Концентрация минеральной взвеси – *a* и соотношение между концентрацией органической и минеральной взвеси – *b* в Керченском проливе 26 сентября 2011 г.

Анализ этих данных показал, что пространственная изменчивость аэрозоля над Азово-Черноморским бассейном определяется главным образом крупномасштабной адвекцией воздушных масс, в силу чего характерный пространственный масштаб аэрозольных образований превышает 100 км [33]. Так как сигналы яркости восходящего излучения от прозрачной воды на длинах волн 0,645 и 0,8585 мкм пренебрежимо малы, измеренные фотометром спутника величины для прозрачных вод можно считать сигналами яркости аэрозольного и молекулярного рассеяния в атмосфере, а сигналы яркости восходящего излучения для зоны близко расположенных мутных вод Керченского пролива – суммой сигналов этого же атмосферного рассеяния и обратного рассеяния взвесью мутных прибрежных вод. Эти положения были использованы при вычислении нормализованной яркости восходящего излучения морской поверхности на указанных длинах волн.

Предполагая, что масштаб изменчивости атмосферных характеристик значительно превышает расстояние от Керченского пролива до ближайшего глубоководного района Черного моря, можно записать следующее соотношение для индекса цвета:

$$I_{wn}(0,645/0,8585) = I_{wn}^* = \frac{L_t(0,645) - \min[L_t(0,645)]}{L_t(0,8585) - \min[L_t(0,8585)]} P(0,645/0,8585), \quad (6)$$

где  $\min[L_t(0,645)]$ ,  $\min[L_t(0,8585)]$  – минимальные величины измеренных сигналов на указанных длинах волн для прозрачных вод 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;  $\tau_R(\lambda)$  – оптическая толщина слоя молекулярного рассеяния, равная 0,0504 и 0,0162 для длин волн 0,645 и 0,8585 мкм соответственно;  $\tau_{Oz}$  – оптическая толщина озонового слоя, равная 0,0219 и 0,00154 для этих же длин волн;  $\theta_V$ ,  $\theta_S$  – зенитные углы бортового фотометра и Солнца, в диапазоне изменения которых от нуля до 60° относительные изменения поправочного множителя не превышают  $\pm 6\%$ .

Для определения взаимосвязи распределений  $I_{wn}^*$  с концентрацией взвешенного вещества  $C_S$  и глубиной видимости белого диска  $Z_d$  были использованы данные, полученные по результатам судовых измерений и путем обработки отобранных проб воды в лабораторных условиях по стандартным методикам [1]. Анализ показал, что концентрация взвеси  $C_S$  и глубина видимости белого диска  $Z_d$  могут быть определены и вычислены по следующим эмпирическим соотношениям:

$$C_S = 1,33 \exp(0,32 I_{wn}^*), R^2 = 0,82, \quad (7)$$

$$Z_d = 5,72 \exp(-0,24 I_{wn}^*), R^2 = 0,79, \quad (8)$$

где  $R^2$  – достоверность аппроксимации.

Эти же параметры связаны с индексом цвета  $I_{wn}$  для длин волн 0,469 и 0,555 мкм следующим образом:

$$C_S = 31,65 I_{wn}^{-3,15}, R^2 = 0,87, \quad (9)$$

$$Z_d = 0,72 I_{wn}^{2,37}, R^2 = 0,85. \quad (10)$$

С использованием соотношений (7) – (10) была получена зависимость  $I_{wn} = 2,54 \exp(-0,1 I_{wn}^*)$  между величинами индекса цвета для различных участков спектра. Затем через соотношения (2) и (3) были вычислены пространственные распределения концентрации органической взвеси  $C_O$  и отношение  $C_M / C_O$  для Керченского пролива. Эти зависимости представлены на рис. 3. Использовались данные, полученные в совместной экспедиции ЮНЦ РАН и МГИ НАН Украины в Керченском проливе в сентябре 2011 г. [34]. Съемке предшествовал сильный северо-восточный ветер со скоростью 10 – 12 м/с. Во время выполнения измерений скорость ветра уменьшилась до 2 – 5 м/с, направление было преимущественно северо-западным. При этих условиях в проливе преобладали азовские воды с высокой концентрацией органической взвеси.

Скорость ветра и индуцированные поверхностные волны оказывают существенное влияние на пространственное распределение концентрации взвеси. В [25] показано, что существует высокая корреляция между скоростью ветра в Азовском море  $W$  и максимальной видимостью белого диска  $Z_d = 10,8W^{-0,72}$ . Используя соотношение между общей концентрацией взвеси  $C_s$ , ее органической компонентой  $C_o$ , глубиной видимости белого диска  $Z_d$  и опуская простые преобразования, получим следующее соотношение между приращениями концентрации органической взвеси  $\Delta C_o$  и скорости ветра  $\Delta W$ :

$$\Delta C_o = 0,12C_s^{-0,12}\Delta W. \quad (11)$$

### Выводы

1. Согласно данным прямых измерений, в Азовском море и Керченском проливе преобладает органическая взвесь. Отношение ее концентрации к концентрации минеральной взвеси может изменяться от 1 до 15 при средних значениях 2 – 6. При этом, естественно, учитывается соотношение «массовых» концентраций ( $\text{г/м}^3$ ). Объемные концентрации ( $\text{см}^3/\text{м}^3$ ) могут иметь другие характерные соотношения, так как плотность минеральной и органической взвеси значительно различается.

2. Пространственное распределение концентрации суммарной взвеси и ее органической составляющей в Азовском море имеет сложную структуру, которая в значительной степени зависит от метеорологических условий. При небольшой скорости ветра в результате ослабления обменных процессов между центральной частью моря и Таганрогским заливом формируется резкая граница, разделяющая эти районы (рис. 2). При усилении скорости ветра интенсификация обменных процессов приводит к более равномерному пространственному распределению концентрации взвеси, причем в центральной части моря с ростом скорости ветра она увеличивается, а приращение органической составляющей с изменением скорости ветра меняется по соотношению (11).

3. В Керченском проливе также наблюдается сложная пространственная структура распределения концентрации взвеси и ее органической составляющей (рис. 3). Область наибольшей концентрации взвеси находится между западным берегом пролива и косой Чушка, севернее о. Коса Тузла. Этот район характеризуется сложным взаимодействием черноморских и азовских вод, обладающих различными свойствами. Наблюдения показывают, что при ветрах северных направлений в Керченский пролив поступают главным образом воды Азовского моря с высоким содержанием взвеси. При изменении направления ветра на южное в проливе преобладают воды, близкие по своим характеристикам к черноморским, т. е. имеющие более низкое содержание взвеси [34].

Значение полученных результатов определяется исключительно важной ролью Азовского моря и Керченского пролива для экономического комплекса Украины и России.

Представленная работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 11-05-90439-Укр\_ф\_а (Россия) и ДФФД Ф40 68 (Украина).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кушнир В.М., Бердников С.В. Характеристики взвеси в Керченском проливе по данным контактных и дистанционных измерений // Геоинформатика. – 2010. – № 2. – С. 61 – 67.
2. Абакумов В.А. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 236 с.
3. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. – Л.: Наука, 1983. – 150 с.
4. Алекин О.А. Химический анализ вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 200 с.
5. Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана. – М.: Наука, 1983. – С. 208 – 235.
6. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380 – 700 nm) of pure water. II Integration cavity measurements // Appl. Optics. – 1997. – 36, № 33. – P. 8710 – 8723.
7. Копелевич О.В. Факторы, определяющие оптические свойства морской воды // Оптика океана. Том 1. Физическая оптика океана. – М.: Наука, 1983. – С. 157 – 160.
8. Маньковский В.И., Соловьев М.В. Связь показателя ослабления излучения с концентрацией взвеси в водах Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2003. – № 2. – С. 60 – 65.
9. James K.V. Bishop. The correction and suspended particulate matter calibration of Sea Tech transmissometer // Deep-Sea Res. Part A. – 1986. – 33, № 1A. – P. 121 – 134.
10. Чепыженко А.И. Измеритель мутности ИМП-2А. – <http://www.ecodevice.narod.ru/turbidimeter/turbidimeter.htm>.
11. Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Результаты исследования поля суммарного взвешенного вещества на участках Азово-Черноморского побережья Украины в приложении к задачам морской геологии и экологии // Геоинформатика. – 2011. – № 1. – С. 66 – 71.
12. Ломакин П.Д., Спиридонова Е.О., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А. Антропогенные и природные источники взвешенного вещества в водах Керченского пролива // Морской экологический журнал. – 2008. – 7, № 4. – С. 51 – 59.
13. Standard ISO 7027: 1999. Water quality – Determination of turbidity.
14. Маньковский В.И., Маньковская Е.В. Полуэмпирическая региональная спектральная модель показателя ослабления света для поверхностных вод Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – Вып. 18. – С. 254 – 261.
15. Маньковская Е.В., Маньковский В.И. Информационная технология обработки измерений флуктуаций прозрачности морской среды для определения параметров крупной взвеси // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – С. 137 – 139.



16. Дыкман В.З., Маньковский В.И., Маньковская Е.В. Прозрачномер для определения параметров крупной взвеси в море методом измерения флуктуаций показателя ослабления направленного света // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – Вып. 16. – С. 236 – 242.
17. Иванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И. Проблемы исследования кинетики взвеси в прибрежной области моря // Там же. – 2004. – С. 414 – 423.
18. Иванов В.А., Дыкман В.З., Ефремов О.И. Функция распределения частиц взвеси в прибрежной области моря // Доп. НАН України. – 2005. – № 1. – С. 111 – 117.
19. *Dynamical processes in coastal regions.* – Sofia: Publishing house of the Bulgarian Academy of sciences, 1990. – 190 p.
20. Дыкман В.З., Ефремов О.И. Электромагнитный датчик для измерения флуктуаций скорости течения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – С. 318 – 324.
21. Дыкман В.З., Ефремов О.И. Измерение объемной концентрации взвесей по пульсациям электропроводности морской воды // Системы контроля окружающей среды. Методические, технические и программные средства. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. – С. 48 – 54.
22. Кравчишина М.Д., Шевченко В.П. Гранулометрический состав взвеси Белого моря в июне 2003 г. // Геология морей и океанов. XV Международная школа по морской геологии. Т. II. – М.: ГЕОС, 2003. – С. 126 – 127.
23. Кравчишина М.Д., Алексеева Т.Н. Опыт исследования гранулометрического состава осадочного вещества из седиментационных ловушек // Там же. – С. 124 – 125.
24. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Оценка концентрации взвеси по данным ADCP WHM1200 // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 14. – С. 42 – 46.
25. Deines K.L. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profiler // Proceeding IEEE/OES 6<sup>th</sup> Working Conference on Current Measurement Technology, 1999. – P. 259 – 264.
26. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978. – 448 с.
27. Downing A., Thorne P.D., Vincent C.E. Backscattering from a suspension in the near-field of a piston transducer // J. Acoust. Soc. Amer. – 1995. – 97, № 3. – P. 1614.
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. Иванов В.А., Кушнир В.М., Федоров С.В. Динамика изменений рельефа дна в Керченском проливе по данным космических съемок оптическими сканерами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – Вып. 22. – С. 127 – 155.
30. Сапрыгин В.В. Изучение распределения хлорофилла *a* в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и результатам судовых измерений // Диссерт. на соискание уч. степени канд. геогр. наук. – Мурманск: Морской биологический институт Кольского научного центра РАН, 2011. – 125 с.
31. Матишов Г.Г., Поважный В.В., Бердников С.В. и др. Оценки концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных // Доклады РАН. – 2010. – 432, № 4. – С. 563 – 566.
32. Кушнир В.М., Бердников С.В. Взвешенное вещество и хлорофилл *a* в Азовском море по данным контактных измерений и космических съемок // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – Вып. 22. – С. 103 – 115.

33. Толкаченко Г.А. Исследования пространственных масштабов оптических неоднородностей аэрозоля над Черным морем // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 14. – С. 83 – 88.
34. Отчет о совместных экспедиционных исследованиях ЮНЦ РАН – МГИ НАН Украины в Керченском проливе 25 – 30 сентября 2011 г. / Научные фонды МГИ НАН Украины. – Севастополь. – 2011. – 34 с.

\*Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: kushnirv@yahoo.com

Материал поступил  
в редакцию 17.09.12  
После доработки 08.10.12

\*\*Южный научный центр РАН,  
Ростов-на-Дону

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто можливість використання космічних зйомок оптичними сканерами системи *MODIS* для розділення сумарної концентрації морської суспензії на мінеральну та органічну складові. Для цієї мети застосовуються розроблені раніше моделі розрахунку індексу кольору для довжин хвиль 0,469 та 0,555 мкм, а також 0,645 і 0,8585 мкм для умов Азовського моря та Керченської протоки. При отриманні розрахункових співвідношень використані також дані лабораторних аналізів проб води, взятих в різних районах Азовського моря та Керченської протоки експедиціями Південного наукового центру РАН в 2006 – 2011 рр.

**Ключові слова:** оптичні сканери системи *MODIS*, проби морської води, лабораторне визначення концентрації мінеральної та органічної компонент суспензії.

**ABSTRACT** Possibility of use of space surveys performed by the *MODIS* optical scanners, for dividing total concentration of sea suspension into mineral and organic components is considered. For this purpose, the previously developed models for calculating color indices of the wave lengths 0.469 and 0.555 nm, and 0.645 and 0.8585 nm in the conditions of the Azov Sea and the Kerch strait are applied. The laboratory analysis data on water samples taken in various parts of the Azov Sea and the Kerch strait by the expedition of the Southern scientific center, RAS in 2006 – 2011 are also used at deducing calculated ratios.

**Keywords:** optical scanners of the *MODIS* system, seawater samples, laboratory determination of concentrations of the suspension mineral and organic components.