

Д.А.Кременчуцкий*, А.А.Кубряков*, П.О.Завьялов**,
Б.В.Коновалов**, С.В.Станичный*, А.А.Алескерова*

**Морской гидрофизический институт, г.Севастополь*

***Институт океанологии им.П.П.Шишова РАН, г.Москва*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА MODIS

На основе данных натурных наблюдений, выполненных в прибрежных и приустьевых районах восточной части Черного моря, был разработан алгоритм восстановления содержания взвешенного вещества по спутниковым данным MODIS (разрешение 1 км) для широкого диапазона значений концентраций. Оценки, полученные с использованием указанного алгоритма, хорошо согласуются с известными данными о содержании и распределении взвеси в Черном море.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *взвешенное вещество, спутниковые оптические измерения, региональный алгоритм, Черное море.*

Под взвешенным веществом понимают частицы минерального и органического происхождения, имеющие большие размеры, чем коллоиды, и находящиеся в воде во взвешенном состоянии [1]. В воды Мирового океана взвесь поступает с береговым стоком в результате абразии берегов, взмучивании донных осадков, антропогенных сбросов и т.д. В результате этих процессов в морскую среду попадают различные соединения, которые могут содержать как питательные, так и загрязняющие или отравляющие вещества, в том числе радиоактивные [2, 3]. Взвешенное вещество играет важную роль в ряде физических и биологических процессов в океане: оно способно сорбировать растворенные и коллоидные формы веществ, в том числе и тяжелых металлов, и способствовать их скорейшему выведению из водной толщи; оказывает значительное влияние на глубину проникновения света, необходимого для развития биоты.

Спутниковые оптические измерения позволяют определять спектральные свойства излучения, исходящего из-под поверхности воды. Зная спектральный состав взвешенного вещества можно по спутниковым измерениям оценить относительные вклады от излучения водной поверхностью и рассеяния на взвешенных частицах, и, тем самым, определить концентрацию взвеси на поверхности. Однако спектральный состав взвеси может значительно отличаться для различных регионов Мирового океана, что требует разработки региональных алгоритмов определения концентрации взвешенного вещества (например, [4 – 6]).

Особенно сложной задачей является восстановление концентрации взвеси в наиболее мутных водах, например в приустьевых районах моря. Здесь концентрация взвешенного вещества может увеличиваться на порядки по сравнению с глубоководной частью, тем самым оказывая сильное влияние и на экосистему и на спектральные свойства излучения.

© Д.А.Кременчуцкий, А.А.Кубряков, П.О.Завьялов,
Б.В.Коновалов, С.В.Станичный, А.А.Алескерова, 2014

Цель работы – разработать региональный алгоритм для оценки величины общего содержания взвеси в Черном море по данным сканера цвета *MODIS* с разрешением 1 км.

Материалы и методы. В работе использовались данные натурных наблюдений, полученные сотрудниками Института океанологии РАН и Южного отделения Института океанологии РАН за период с 2010 – 2014 гг. В общей сложности было выполнено 180 определений величины общего содержания взвеси. Методика отбора и обработки проб подробно описана в [7]. Эти экспедиции были направлены на исследование наиболее загрязненных прибрежных и приустьевых участков у восточного берега Черного моря [2].

Для аналогичного периода и исследуемых районов с бесплатного архива спутниковых данных *NOAA Oceancolor* [8] были загружены карты распределения величин отражательной способности *Rrs*(443), *Rrs*(488) и *Rrs*(547) с разрешением 1 км. Это ежесуточные массивы данных за период с 2002 по 2013 гг., которые представляют собой продукты уровня обработки *Level 2* и получены они с помощью стандартных алгоритмов коррекции по измерениям радиометра *MODIS-Aqua* в оптическом диапазоне [9].

Разработка регионального алгоритма. Стандартный подход определения концентрации взвешенного вещества основан на поиске связи между измеренными значениями концентрации и величинами обратного рассеяния взвесью, полученными по спутниковым данным. В настоящей работе величина обратного рассеяния на длине волны 555 нм была рассчитана, используя полуаналитический алгоритм [10]:

$$b_{bp}(\lambda) = X \cdot \left[\frac{547}{\lambda} \right]^Y,$$

где $\lambda = 555$ нм – длина волны; X – величина обратного рассеяния частиц; Y – спектральная форма обратного рассеяния частиц.

Авторы работы [11] эмпирически определили зависимость величин X и Y от величины отражательной способности:

$$X = -0,00182 + 2,058 Rrs(547), \quad Y = -1,13 + 2,57 \cdot \frac{Rrs(443)}{Rrs(488)}.$$

С помощью представленного выше полуаналитического алгоритма по данным сканера цвета *MODIS-Aqua* были проведены оценки величины обратного рассеяния взвесью. Далее, были выбраны величины обратного рассеяния в ближайших к контактным измерениям точкам по координате и времени. Отбирались только те спутниковые значения, которые были получены в тот же день и находились на расстоянии менее 5 км от измерения. Следует отметить, что в некоторых случаях информация со спутника была недоступна из-за облачности, поэтому часть данных не использовалась. Данные измерений, соответствующие одной точке на спутниковом снимке, усреднялись. В результате был получен массив, состоящий из 18 точек, разброс значений концентрации в котором составил от 0,3 до 45 мг/л. Наилучшим образом эта зависимость описывалась экспоненциальной функцией (рис.1):

$$C = 0,21 \cdot \exp(108 \cdot b_{bp}).$$

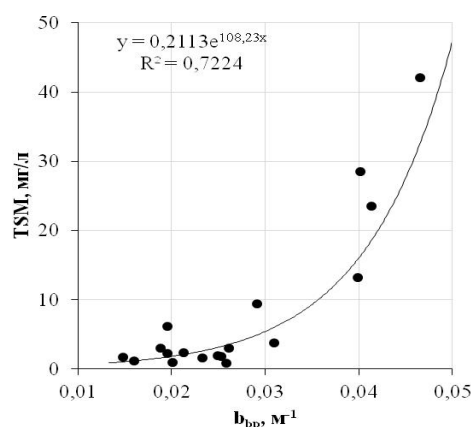


Рис. 1. Зависимость общей концентрации взвеси (TSM) от величины обратного рассеяния частицами (b_{bp}): точки – данные наблюдений, сплошная линия – аппроксимирующая кривая.

Действительно, при сильном увеличении концентрации взвеси, яркость отраженного излучения должна начать насыщаться с определенного значения концентрации, что и приводит к экспоненциальной зависимости. В областях с умеренными значениями

концентрации (до 1 – 2 мг/л) зависимость практически линейна.

Полученная параметризация может быть использована для построения карт распределения концентрации взвешенного вещества по данным *MODIS*. В качестве примера приведем карту (рис.2), полученную в результате композиции двух спутниковых изображений за 21 июня 2013 г. Представленное на рис.2 распределение как в количественном, так и в качественном отношении соответствует основным представлениям о распределении концентрации взвеси в Черном море [2, 12, 13]. Так, фоновые значения в бассейне составили 0,2 – 0,3 мг/л, в районе устьев рек значения порою превосходили 3 мг/л.

Заключение. В настоящей работе, используя результаты экспедиционных исследований, был разработан алгоритм оценки содержания взвешенного вещества по спутниковым данным *MODIS* для широкого диапазона значений концентраций взвеси. Предложенный алгоритм позволяет получать карты распределения концентрации взвеси с разрешением 1 км на каждые

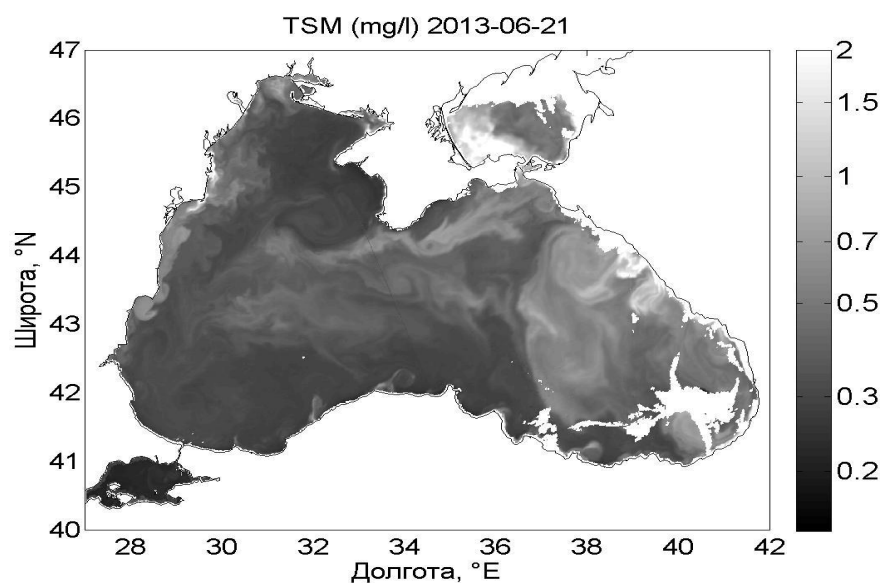


Рис. 2. Пример восстановленной карты концентрации взвешенного вещества за 21 июня 2013 г. на основе измерений *MODIS*.

сутки. Полученные оценки, как в количественном, так и в качественном отношении, соответствует основным представлениям о распределении концентрации взвеси в водах Черного моря.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-45-01526\14 и Минобрнауки РФ (мегагрант 0026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенин А.А., Белоусова Н.В.* Гидрохимический словарь.— Л.: Гидрометеиздат, 1988.— 239 с.
2. *Динамические* процессы береговой зоны моря / Ред. Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пыхов Н.В.— М.: Научный мир, 2003.
3. *Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В., Осадчиев А.А.* Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // *Океанология*.— 2014.— т.54, № 3.— С.293-308.
4. *Буренков В.И., Ершова С.В., Копелевич О.В. и др.* Оценка пространственного распределения взвеси в водах Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета океана SeaWiFS // *Океанология*.— 2001.— т.41, № 5.— С.653-659.
5. *Li R.R. et al.* Remote sensing of suspended sediments and shallow coastal waters // *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*.— 2003.— v.41, № 3.— P.559-566.
6. *Zhang M. et al.* Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery // *Remote Sensing of Environment*.— 2010.— v.114, № 2.— P.392-403.
7. *Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н.* Спектральный анализ морской взвеси — альтернатива традиционным методам её определения при экологическом мониторинге // XII междунар. конф. “Экосистемы, организмы, инновации”.— МГУ, 2010.
8. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
9. *Gordon H.R., Wang M.* Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm // *Appl. Opt.*— 1994.— 33.— P.443-452.
10. *Carder K.L., Chen F.R., Lee Z.P., Hawes S.K., Kamykowski D.* Semi-analytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures // *J. Geophys. Res.*— 1999.— 104.— P.5403-5422.
11. *Lee Z.P., Carder K.L., Hawes S.H., Steward R.G., Peacock T.G., Davis C.O.* A model for interpretation of hyperspectral remote-sensing reflectance // *Appl. Opt.*— 1994.— 33.— P.5721-5732.
12. *Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Поле суммарной взвеси и оценка загрязнения вод Феодосийского залива по данным гидрооптических наблюдений // *Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа*.— Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.— вып.26.— С.322-330.
13. *Щерева Г.П.* Общая и органическая взвесь тонкого поверхностного микрослоя черноморской воды // *Тр. Ин-та океанол.*— Варна, 1998.— т.2.— С.27-31.

Материал поступил в редакцию 28.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ На основі даних натурних спостережень, виконаних в прибережних і пріустьєвих районах східної частини Чорного моря, був розроблений алгоритм відновлення змісту зваженого речовини за супутниковими даними *MODIS* (дозвіл 1 км) для широкого діапазону значень концентрацій. Оцінки, отримані з використанням зазначеного алгоритму, добре узгоджуються з відомими даними про зміст і розподілі суспензії в Чорному морі.

ABSTRACT On the basis of in situ observations, carried out in coastal and estuarine areas in the eastern Black Sea, the suspended matter reconstruction algorithm was developed using satellite data *MODIS* (a resolution is 1 km) for a wide range of concentrations. The estimations obtained using this algorithm, are in good agreement with the known data on the suspended matter content and distribution in the Black Sea.