

С. П. Любарцева, В. С. Суетин, С. Н. Королев

## Оценка изменений экологического состояния Азовского моря по данным наблюдений из космоса

(Представлено академиком НАН Украины В. А. Ивановым)

*За результатами аналізу даних супутникових спостережень Азовського моря встановлено наявність стійкого сезонного ходу концентрації хлорофілу "а". У період 1998–2009 рр. відбувалось систематичне збільшення цього параметра, яке найвиразніше виражене в північно-східній частині моря і в Таганрозькій затоці. Передбачається, що літній максимум концентрації хлорофілу "а" відповідає інтенсивному цвітінню ціанобактерій, а виявлений міжрічний тренд може бути зумовлений прямим відгуком екосистеми моря на зростання вмісту CO<sub>2</sub> в атмосфері.*

Одно из актуальных направлений развития современных средств изучения окружающей среды связано с применением оптической аппаратуры, устанавливаемой на искусственных спутниках Земли [1]. В результате более чем двенадцатилетней эксплуатации космических сканеров цвета *SeaWiFS*, *MODIS* и др. получен огромный массив высококачественной информации, которая является основой для научных исследований, протекающих в морских акваториях разнообразных гидрофизических и экологических процессов.

Цель работы авторов настоящего сообщения — выполнение анализа и обсуждение проявлений крупномасштабной изменчивости Азовского моря в результатах его наблюдений из космоса. Экосистема Азовского моря как объект такого рода исследований представляет интерес в связи с его вероятной повышенной чувствительностью к внешним воздействиям, в том числе таким, которые могут быть обусловлены общими климатическими трендами [2]. Использование спутниковой информации позволяет при малых затратах оценить проявления пространственно-временной изменчивости оптических свойств акваторий, зависящих от множества присутствующих в воде примесей, растворенных и взвешенных веществ.

При интерпретации спутниковых данных обычно рассматривается вычисленная по специальным алгоритмам концентрация хлорофилла "а" ( $C_a$ ). Как известно, его концентрация является не только показателем трофности вод, но и признанным фенологическим и климатическим индикатором, на основе которого рассчитываются переменные, описывающие динамику биомассы фитопланктона и первичной продукции [3].

В приведенных ниже расчетах в качестве исходных данных использованы результаты определения  $C_a$  по спутниковым измерениям, доступные для получения через интернет при помощи программной системы *Giovanni* [4] (<http://reason.gsfc.nasa.gov/Giovanni/>). Данные измерений являются так называемыми продуктами обработки третьего уровня и представляют собой среднемесячные значения, приведенные к узлам регулярной координатной сетки, имеющей шаг, примерно равный 9 км. При этом в пределы рассматриваемой акватории попадает 725 узлов. Указанные значения  $C_a$  вычислены по принятому в *NASA* стандартному алгоритму, предназначенному для вод открытого океана [5].

Строго говоря, в Азовском море из-за вероятных отличий его оптических свойств от океанических этот алгоритм может давать большие ошибки, обусловленные маскировкой

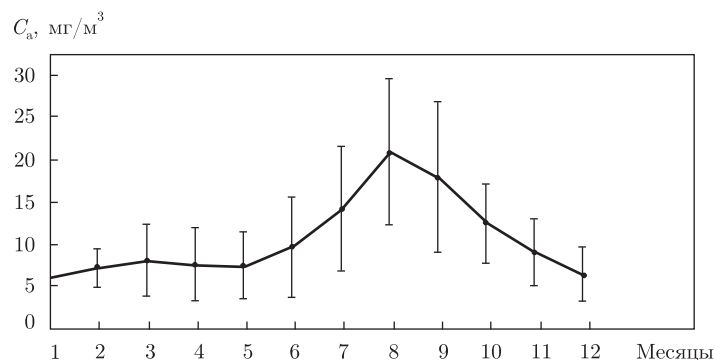


Рис. 1. Сезонный ход концентрации хлорофилла “а” в Азовском море по данным прибора *SeaWiFS*

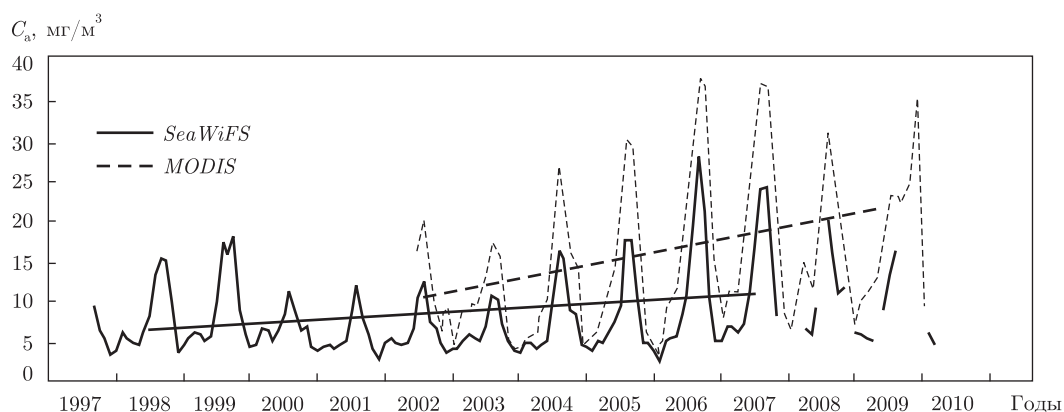


Рис. 2. Концентрация хлорофилла “а” в Азовском море по данным спутниковых оптических сканеров. Статистически значимые линейные тренды показаны соответствующими прямыми линиями

полезного сигнала повышенным содержанием растворенного органического вещества, детрита, взвешенных донных осадков, терригенной взвеси и т. д. Тем не менее параметр  $C_a$  представлен в качестве обобщенной характеристики, описывающей комбинированное проявление всех оптически активных примесей, и в конечном счете косвенным образом отражающей экологическое состояние моря. Ниже приведены результаты анализа сезонного хода и межгодовых вариаций данной величины по всей площади Азовского моря за все время работы приборов *SeaWiFS* и *MODIS* в космосе, а также описывается пространственное распределение обнаруженного при этом долгопериодного тренда.

Среднемесячные значения  $C_a$ , дополнительно осредненные по всей площади Азовского моря, определяли по данным прибора *SeaWiFS* (рис. 1). Полученный сезонный ход  $C_a$  характеризуется двумя локальными максимумами — в марте и августе. Второй максимум в значительной степени превосходит первый по уровню. В этом проявляется существенное отличие от того, что имеет место в глубоководных районах Черного моря, в котором доминирует ранневесенний максимум, а второй — приходится на позднюю осень [6]. Заметим, что из-за значительной пространственно-временной изменчивости исследуемого параметра показанные на рисунке среднеквадратичные отклонения  $C_a$  имеют довольно высокие значения.

Для анализа межгодовых вариаций осредненных по всей площади Азовского моря значений  $C_a$  на рис. 2 проиллюстрированы временные ряды, полученные по данным спутнико-

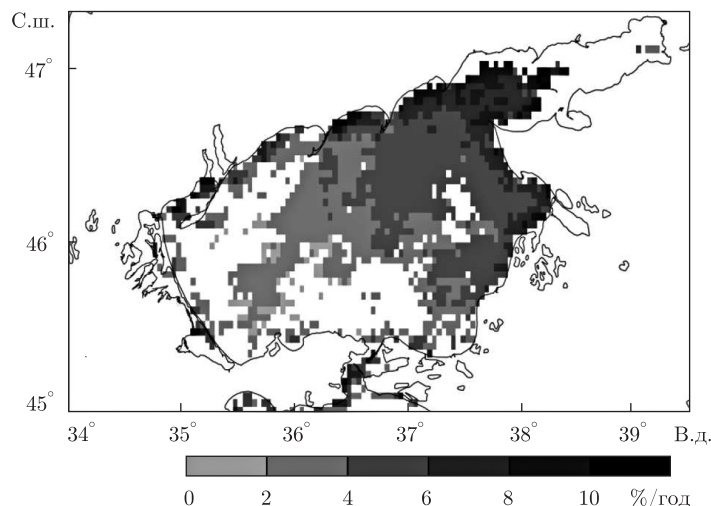


Рис. 3. Распределение относительного положительного тренда концентрации хлорофилла “а” в Азовском море по данным прибора *SeaWiFS*

вых приборов *SeaWiFS* и *MODIS Aqua*. На этих графиках регулярным образом проявляется показанная на рис. 1 сезонная изменчивость, которая характеризуется зимним минимумом и максимумом в конце лета. В разные годы сезонный ход имеет различную амплитуду, а, кроме того, на рис. 2 отчетливо виден межгодовой тренд  $C_a$ , выраженный прежде всего в возрастании уровня летнего локального максимума. Результаты простой линейной аппроксимации установленного тренда показаны прямыми линиями для данных, полученных каждым из спутниковых приборов на временных интервалах их непрерывной работы — 1998–2007 гг. для *SeaWiFS* (в 2008 и 2009 годах регулярность работы *SeaWiFS* была нарушена несколькими перерывами) и 2002–2009 гг. для *MODIS Aqua*.

Проверка по критерию Кокса–Стюарта [7] подтверждает статистическую значимость выявленных линейных трендов с доверительной вероятностью 95%. Несмотря на то, что данные *MODIS Aqua* выглядят несколько завышенными по сравнению с данными *SeaWiFS*, на общем промежутке наблюдений 2002–2009 гг. с учетом среднеквадратичных отклонений обе выборки можно считать статистически однородными в смысле близости математических ожиданий.

Проявления обнаруженного тренда величины  $C_a$  в разной мере выражены в различных частях моря. Для примера на рис. 3 приводится карта пространственного распределения специальным образом вычисленной характеристики относительного увеличения  $C_a$ , определенной как отношение абсолютного линейного тренда в каждом узле регулярной координатной сетки к среднему за весь период наблюдений значению концентрации хлорофилла “а” в этом узле. Почти на всей площади моря линейный тренд имеет положительный знак. Исключение составляют 172 узла сетки, в которых не было обнаружено статистически значимого тренда. Соответствующие участки на карте (см. рис. 3) выделены белым цветом. Легко видеть, что область существенного межгодового роста концентрации хлорофилла “а” располагается в северо-восточной части Азовского моря и в Таганрогском заливе. По-видимому, здесь происходят наиболее значительные экологические изменения. Относительный тренд  $C_a$  в этих районах достигает 10% в год. Это означает, что за 10 лет концентрация хлорофилла “а” увеличивается примерно в 2,5 раза.

Слабая изученность экологического состояния Азовского моря и его изменчивости не позволяет получить однозначные выводы о причинах и механизмах обнаруженного роста  $C_a$ . Тем не менее в качестве предварительных предположений можно пояснить следующее.

В работе [8] установлено, что в летний период в Азовском море при благоприятной температуре воды 22–26 °С происходит цветение цианобактерий (синезеленых водорослей). Следовательно, появление летнего максимума на графике, описывающего сезонный ход  $C_a$  (см. рис. 1), обусловлено именно этими водорослями.

Как известно, при увеличении концентрации углекислого газа растет скорость фиксации азота цианобактериями [9]. Соответственно, логично считать, что усиление цветений синезеленых водорослей является прямым откликом экосистемы моря на рост концентрации  $CO_2$  в атмосфере. При этом ожидается ингибирование нитрификации, что может привести к нарушению баланса между аммонием и нитратами, повышению уровня регенерированной продукции с последующим сдвигом в планктонном сообществе. Оценка реалистичности приведенных рассуждений требует проведения специальных исследований на основе анализа новых экспериментальных данных и численных экспериментов с использованием математического моделирования экологических процессов в море.

Заметим, что научный интерес к процессу жизнедеятельности цианобактерий в последние годы заметным образом увеличился. Ранее их роль в функционировании морских экосистем была во многом недооцененной. Так, попытка калибровать экологическую модель Фэшема–Даклоу с помощью самых надежных на данный момент экспериментальных данных привела к необходимости модернизации модели путем включения в нее цианобактерий [10]. В то же время современные спутниковые оптические приборы дают новые возможности обнаружения цветения синезеленых водорослей в различных районах Мирового океана [11, 12].

Таким образом, по результатам анализа данных спутниковых наблюдений Азовского моря установлено наличие устойчивого сезонного хода концентрации хлорофилла “а”, который характеризуется зимним минимумом и максимумом в конце лета. В течение периода с 1998 по 2009 годы происходило систематическое увеличение  $C_a$ , наиболее отчетливо выраженное в северо-восточной части моря и в Таганрогском заливе. Мы предполагаем, что летний максимум концентрации хлорофилла “а” соответствует интенсивному цветению цианобактерий, а обнаруженный межгодовой тренд может быть обусловлен прямым откликом экосистемы моря на рост содержания  $CO_2$  в атмосфере. Проверка этих предположений может стать предметом дальнейших целенаправленных исследований.

Представленные в данном сообщении результаты получены с использованием интерактивной интернет-системы *Giovanni*, разработанной и поддерживаемой *NASA GES DISC (USA)*.

*Авторы выражают признательность NASA, обеспечивающему работу приборов SeaWiFS, MODIS и архива спутниковых измерений.*

1. McClain C. R., Hooker S. B., Feldman G. C., Bontempi P. Satellite data for ocean biology, biogeochemistry, and climate research // EOS, Trans. AGU. – 2006. – **87**, No 34. – P. 337–343.
2. Kahru M., Mitchell B. G. Ocean color reveals increased blooms in various parts of the world // Ibid. – 2008. – **89**, No 18. – P. 170.
3. Platt T., Sathyendranath S. Ecological indicators for the pelagic zone of the ocean from remote sensing // Remote Sensing of Environment. – 2008. – **112**. – P. 3426–3436.
4. Acker J. G., Leptoukh G. Online analysis enhances use of NASA earth science data // EOS, Trans. AGU. – 2007. – **88**, No 2. – P. 14–17.

5. O'Reilly J. E., Maritorena B. G., Siegel D. A. et al. Ocean color algorithms for SeaWiFS // J. Geophys. Res. – 1998. – **103**. – P. 24937–24953.
6. Ведерников В. И., Демидов А. Б. Первичная продукция и хлорофилл в глубоководных районах Черного моря // Океанология. – 1993. – **33**, № 2. – С. 229–235.
7. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. – Москва: Физматлит, 2006. – 816 с.
8. Лялюк Н. М., Липницька Г. П. Деякі особливості розвитку фітонейстону Азовського моря // Питання біоіндикації та екології. – Запоріжжя: Вид-во Запоріз. ун-ту, 2000. – Вип. 5, № 2. – С. 98–103.
9. Hutchins D. A., Mulholland M. R., Fu F.-X. Nutrient cycles and marine microbes in a CO<sub>2</sub>-enriched ocean // Oceanography. – 2009. – **22**, No 4. – P. 128–145.
10. Rothstein L. M., Cullen J. J., Abbot M. et al. Modeling ocean ecosystems. The paradigm program // Ibid. – 2006. – **19**, No 1. – P. 22–51.
11. Kahru M., Savchuk O. P., Elmgren R. Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability // Mar. Ecol. Prog. Ser. – 2007. – **343**. – P. 15–23.
12. Westberry T. K., Siegel D. A. Spatial and temporal distribution of *Trichodesmium* blooms in the world's oceans // Global Biogeochem. Cycles. – 2006. – **20**, GB4016. – P. 1–13.

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 16.07.2010

**S. P. Liubartseva, V. S. Suetin, S. N. Korolev**

### **Estimation of changes in the Azov Sea ecological state on the basis of satellite remote sensing data**

*Stable annual variability of the chlorophyll "a" concentration in the Azov Sea has been found by the analysis of satellite remote sensing data. Steady increase in this parameter has taken place for 1998–2009 years, which is strongly pronounced in the northwestern part of the sea and the Taganrog bay. The summer chlorophyll 'a' concentration peak is supposed to correspond to the intensive bloom of cyanobacteria. The obtained interannual trend might be caused by the direct ecosystem's response to CO<sub>2</sub> rising in the atmosphere.*