ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗОН ДЕФИЦИТА КИСЛОРОДА В АЗОВСКОМ МОРЕ

Кулыгин В.В.¹, Дашкевич Л.В.¹, Герасюк В.С.²

¹Институт аридных зон Южного научного центра РАН,

²Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

kulygin@ssc-ras.ru, ldashkev@ssc-ras.ru, gerasyuk.v@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Основными источниками поступления кислорода в водную толщу являются прямое поступление из атмосферы и продуцирование при фотосинтезе фитопланктоном, а главными расходными статьями – дыхание водных организмов, окисление органических веществ и восстановление минеральных соединений. При избыточном количестве органического вещества в воде и донных отложениях нередко случаи резкого ухудшения кислородного режима вод и т.н. заморных явлений, которые могут сопровождаться массовой гибелью водных организмов, особенно бентоса и рыб.

В Азовском море практически ежегодно возникают предзаморные и заморные ситуации, имеющие крайне динамичные пространственно-временные масштабы (от нескольких до десятков километров и от нескольких часов до нескольких суток). Переход от предзаморной ситуации к заморной и обратно может происходить достаточно резко, в течение нескольких часов со сменой локализации участков замора [1].

В настоящее время мониторинг возникновения зон дефицита кислорода осуществляется путем отбора проб с борта морских судов в ходе экспедиций в Азовское море. По результатам этих измерений принимается решение об объявлении заморного периода на той или иной части акватории, в течение которого снимаются многие ограничения на ловлю бычков (на орудия лова, объемы вылова и т.д.).

Однако наблюдения на отдельных станциях не способны предоставить полную картину пространственного распределения содержания растворенного кислорода, зонах его дефицита и их площадях. В работе [2] предпринята попытка расширить это представление за счет использования спутниковых снимков. В качестве единственного фактора, определяющего зоны возможного замора, используется температура воды. Прогнозирование потенциально заморных зон основано на следующей гипотезе: цветение фитопланктона приводит к локальному повышению температуры поверхности моря в форме теплых пятен, к которым приурочены зоны придонной гипоксии, развивающейся еще несколько дней после обнаружения пятен. К сожалению, данные, подтверждающие состоятельность этой гипотезы,

отсутствуют. Но, даже принимая эту гипотезу, предложенный подход позволяет получить только качественный прогноз (будет или не будет образована заморная зона), количественные значения дефицита кислорода определить с его помощью нельзя.

В тоже время, температура вод далеко не всегда является определяющим фактором при образовании зон дефицита кислорода. Фактором, несомненно требующим учета, является продукция фитопланктона. В настоящее время для Азовского моря разработаны региональные алгоритмы для определения концентрации хлорофилла «а» по спутниковым снимкам [3, 4], позволяющие оценивать интенсивность продукционных процессов.

Цель настоящей работы продемонстрировать возможность использования спутниковых снимков и математического моделирования для пространственной оценки возникновения зон дефицита кислорода в Азовском море. Для расчета динамики кислородного режима используется модель [5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовались два источника спутниковой информации: Европейский центр данных Copernicus (Marine environment monitoring service) (<http://marine.copernicus.eu>) и распределенный центр архивных материалов физической океанографии НАСА (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC), NASA) (<http://podaac.jpl.nasa.gov>). Для целей настоящего исследования были выбраны следующие наборы данных:

- температура поверхности моря по данным спутниковых снимков радиометров AVHRR (спутники серии NOAA), уровень обработки L4;
- спутниковые снимки MODIS (TERRA/AQUA), уровень обработки L2, для расчета концентрации хлорофилла «а».

Набор данных с температурой поверхности моря представляет собой среднесуточные значения температуры воды в узлах регулярной сетки с размером ячейки 0.05° на 0.05° .

Набор данных с концентрацией хлорофилла «а» представляет собой результат дешифрирования снимков MODIS. *Пространственное разрешение снимков* составляет 1 км. В настоящей работе использовался региональный алгоритм [4], разработанный специально для снимков MODIS. *Выбор алгоритма был обусловлен наличием в свободном доступе данных наблюдений MODIS и недоступностью других данных ДЗЗ.* Более точный региональный алгоритм определения концентрации хлорофилла «а» [3] был разработан для спектральных каналов спектрометра MERIS, который завершил свою работу в 2012 г. Такие же каналы присутствуют у спектрометра OLCI, установленного на борту спутника Sentinel-3, выведенного на орбиту в феврале 2016 г., но его снимки за рассматриваемый в этой работе период отсутствуют.

Для проверки результатов расчета модели использовались данные совместной экспедиции Южного научного центра РАН (ЮНЦ РАН) и АзНИИРХ на НИС «Денеб» в акватории Азовского моря в период с 15 по 31 июля 2016 г. Были использованы:

- измерения температуры и солености воды (термосоленограф *SBE 21 SeaCAT*);
- измерения температуры воздуха, солнечной радиации, скорости ветра (метеостанция *Vaisala WS425*);
- измерения концентрации растворённого кислорода ($\text{мг O}_2/\text{л}$) методом Винклера и прозрачности воды с помощью диска Секки (на 39 океанографических комплексных станциях (рис.1)).

Рис.1. Схема станций экспедиции на НИС «Денеб» в июле 2016 г.

В работе также использовались результаты регулярных наблюдений за температурой воздуха и скоростью ветра в прибрежной зоне Азовского моря на четырнадцати береговых гидрометеостанциях за период 15-31 июля 2016 г., полученные из портала ЕСИМО (<http://portal.esimo.ru/portal>).

Подробное описание используемой математической модели представлено в [5]. Модель является одномерной и описывает сезонный ход содержания кислорода в водах моря, его вертикальное распределение и взаимодействие с донными отложениями. В модели учитываются следующие процессы: первичное проду-

цирование фитопланктона; поступление кислорода из атмосферы; вертикальная диффузия; скорость окисления лабильного органического вещества в водной толще и донных отложениях; оседание продуцированного органического вещества в донные отложения. Модель ориентирована на описание безледного периода года и не учитывает процесс замедления газообмена в результате установления ледового покрова. Входными воздействиями являются: величина первичной продукции, температура воды и скорость ветра. Расчетный шаг модели по времени равен 1 часу.

Получение карт пространственного распределения растворенного кислорода основано на использовании цифровой модели рельефа (ЦМР) дна моря. Для этого в каждой ячейке ЦМР запускается своя одномерная модель. Размер ячейки ЦМР составляет 10 км на 10 км.

Модель написана на языке программирования Python 2.7 и является многопоточным приложением. Распараллеливание выполнено с использованием библиотеки multiprocessing.

Подготовка входной информации. Величина суточной первичной продукции определялась на основе значений концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое согласно [6] с использованием ассимиляционного числа. Для Азовского моря в летний период величина ассимиляционного числа была принята равной 1.5 мгС/мгХл/час. Распределение величины суточной первичной продукции в течение суток выполнялось пропорционально суточному ходу солнечной радиации.

Значение скорости ветра (x) в узлах регулярной расчетной сетки определялось как средневзвешенное значение измерений ветра на береговых гидрометеостанциях (x_i) по формуле:

$$x = \frac{\sum_i w_i \cdot x_i}{\sum_i w_i}, \quad w_i = e^{-\left(\frac{d_i}{r}\right)^2},$$

где d_i – расстояние от узла сеточной области до i -й метеостанции, км; $r = 100$ км.

Суточный ход температуры поверхности воды восстанавливался по суточному ходу температуры воздуха следующим образом:

$$SST_t = \left(\frac{AT_t - AT_{mean}}{\sigma_{air}} \right) \cdot \sigma_{sst} + SST_{mean},$$

здесь SST_{mean} – среднесуточное значение температуры поверхности моря, AT_{mean} – среднесуточное значение температуры воздуха, SST_t – температура поверхности моря в момент времени t , AT_t – температура воздуха в момент времени t , σ_{sst} – среднеквадратичное отклонение температуры воды в течение суток, σ_{air} – среднеквадратичное отклонение температуры воздуха в течение суток. Отношение $\sigma_{air}/\sigma_{sst}$ принято равным 3.7.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет был выполнен для периода 16-31 июля 2016 г. На рис. 2 представлены расчетные карты распределения среднесуточной концентрации растворенного кислорода в придонном слое.

Рис.2. Насыщение кислородом (%) придонного горизонта по результатам расчета

Как можно видеть на рис. 2, во время прохождения экспедиции наблюдалось развитие предзаморной ситуации. Максимальные площади (до 61 % акватории) зон с дефицитом кислорода были отмечены 26 июля 2016 г. Наиболее низкое насыщение кислородом (53-54 %) наблюдалось вблизи северного и юго-восточного побережья Азовского моря. Затем площадь акватории с недостаточным содержанием кислорода уменьшилась в связи с изменением погодных условий.

На рис. 3 приведено сравнение расчетных значений в придонном горизонте с данными измерений *in situ*. Модель ведет себя «консервативно» по сравнению с данными наблюдений в силу низкой пространственной дискретизации входных данных. Средняя абсолютная ошибка при сравнении результатов модельных расчетов и измерений на комплексных станциях в поверхностном горизонте составила 0.94 мг/л, в придонном слое – 1.03 мг/л.

Проведенные расчеты показали, что предложенная модель достаточно адекватно воспроизводит динамику кислородного режима Азовского моря. Совместное использование разработанной математической модели и данных спутникового мониторинга позволяет получать пространственное распределение содержания растворенного кислорода

в придонном слое и выявлять зоны риска возникновения заморных явлений. Предложенный подход может быть использован для выполнения ретроспективного анализа кислородного режима Азовского моря и исследования возможных сценариев развития неблагоприятных экологических ситуаций.

Рис.3. Сравнение данных экспедиционных наблюдений за содержанием кислорода в придонном горизонте (1) и расчетных значений (2)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00290 мол_а.

Список литературы

1. Кочергин А.Т., Крискевич Л.В., Боровская Р.В. Гидрометеорологические условия и их влияние на возникновение заморных явлений в Азовском море в летний период 2013 г. / Труды ЮгНИРО: Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском рыбохозяйственном бассейне и Мировом океане – Керчь: ЮгНИРО, 2015. С. 29-33.
2. Боровская Р.В., Ломакин П.Д., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О. выявление признаков придонной гипоксии в Азовском море и Керченском проливе на базе контактных и спутниковых данных // ГПИМО. 2009. №4. С.71-78.
3. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S.V., Saprygin V.V., Povazhnyi V.V. Operational MERIS-based NIR-red algorithms for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters – the Azov Sea case study // Remote Sens. of Environment. 2012. V. 121. P. 118-124.
4. Справочник «Органическое вещество Азовского моря и прилегающих районов Чёрного моря». Спутниковые методы оценки концентрации хлорофилла. <http://atlas.iaz.ssc-ras.ru/corgbook/methods/md-ddzchla.html#md-dzzchla2>

5. Kulygin V., Berdnikov S., Selyutin V., Dashkevich L. Oxygen depletion risk assessment in shallow water bodies of the Sea of Azov region // SGEM2016 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-62-9 / ISSN 1314-2704, June 28 – July 6, 2016, Book 3 Vol. 2, 799-806 pp. DOI: 10.5593/SGEM2016/B32/S15.104
6. Матишов Г.Г., Поважный В.В., Бердников С.В., Мозес В.Дж., Гительсон А.А. Оценка концентрации хлорофилла а и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных // Доклады академии наук. 2010. Т.432, №4. С. 563-566.

USING SATELLITE IMAGES FOR THE ASSESSMENT OF THE OXYGEN DEPLETION AREAS IN THE SEA OF AZOV

V.V. Kulygin¹, L.V. Dashkevich¹, V.S. Gerasyuk²

¹Institute of Arid Zones Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences

²Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

kulygin@ssc-ras.ru, ldashkev@ssc-ras.ru, gerasyuk.v@mail.ru

Abstract. The excess amount of organic matter can cause a dramatic deterioration of the water oxygen regime along with so-called hypoxia phenomena, which may be accompanied by a massive death of aquatic organisms, especially fish and benthic.

In this paper an approach of using satellite images with mathematical modeling to assessment the oxygen depletion in the Sea of Azov is considered. 1D mathematical model of oxygen regime, describing the seasonal variation of the oxygen concentration, its vertical distribution and interaction with sediments, is presented. The following datasets were used: sea surface temperature from satellite images of radiometers AVHRR (NOAA series satellites); MODIS Level-2 data (TERRA / AQUA) to obtain Chlorophyll-a concentration with using regional algorithm.

The model was validated by *in-situ* measurements in July 2016. The mean absolute error of dissolved oxygen concentration when comparing the results of model calculations and measurements at complex stations in surface layer is 0.94 mg/l, in the bottom layer 1.03 mg/l.

The proposed approach can be used to perform a reanalysis of the oxygen regime of the Sea of Azov and to study possible scenarios of adverse ecological situations.

Keywords. oxygen depletion, mathematical modeling, satellite images, the Sea of Azov

References

1. Kochergin A.T., Kriskevich L.V., Borovskaya R.V. 2015. [Hydrometeorological conditions and their impact on the occurrence of fish kill phenomena in the Sea of Azov in summer 2013] In: Proceedings of YugNIRO: Main results of complex studies in the Azov-Black Sea fisheries basin and the World Ocean, Publisher: YugNIRO – Kerch. pp. 29-33 (In Russian).
2. Borovskaya R.V., Lomakin P.D., Panov B.N., Spiridonova E.O. 2009 [Identification of signs of benthic hypoxia in the Sea of Azov and the Kerch Strait on the basis of contact and satellite data] GPIMO. 4: 71-78 (In Russian).
3. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S.V., Saprygin V.V., Povazhnyi V.V. Operational MERIS-based NIR-red algorithms for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters – the Azov Sea case study // Remote Sens. of Environment. 2012. V. 121. P. 118-124.
4. [Handbook “Organic matter of the Sea of Azov and adjacent areas of the Black Sea”. Satellite methods for chlorophyll concentration assessment]. Available at: <http://atlas.iaz.ssc-ras.ru/corgbook/methods/md-ddzchla.html#md-dzzchla2>
5. Kulygin V., Berdnikov S., Selyutin V., Dashkevich L. Oxygen depletion risk assessment in shallow water bodies of the Sea of Azov region // SGEM2016 Conference Proceedings, ISBN

978-619-7105-62-9 / ISSN 1314-2704, June 28 – July 6, 2016, Book 3 Vol. 2, 799-806 pp. DOI: 10.5593/SGEM2016/B32/S15.104

6. Matishov G.G., Povazhniy V.V., Berdnikov S.V., Moses W. J., Gitelson A.A. 2010. [Estimation of chlorophyll-a concentration and primary production in the Sea of Azov with using of satellite data]. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. 432(4): 563-566. (In Russian).