Модельная оценка содержания растворенного кислорода в водах Таганрогского залива на основе спутниковой информации

Model assessment of dissolved oxygen content in the Taganrog Bay based on satellite information

Кулыгин / Kulygin V.
Валерий Валерьевич
(kulygin@ssc-ras.ru)
кандидат технических наук.
ФГБУН Институт аридных зон
Южного научного центра (ЮНЦ) РАН,
старший научный сотрудник.
г. Ростов-на-Дону

Дашкевич / Dashkevich L.
Людмила Владимировна
(ldashkev@ssc-ras.ru)
кандидат географических наук.
ЮНЦ РАН,
старший научный сотрудник.
г. Ростов-на-Дону

Герасюк / Gerasyuk V.
Виктория Сергеевна
(gerasyuk.v@mail.ru)
ЮНЦ РАН,
младший научный сотрудник.
г. Ростов-на-Дону

Ключевые слова: растворенный кислород – dissolved oxygen; математическое моделирование – mathematical modeling; спутниковые снимки – satellite images; Таганрогский залив – Taganrog Bay.

Предложен модельный метод расчета содержания растворенного кислорода в водах Таганрогского залива Азовского моря на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В качестве входной информации используются данные о концентрации хлорофилла «*a*» спектрорадиометра MODIS (спутники Terra и Aqua) и температура поверхности моря по данным радиометров AVHRR (спутники серии NOAA), а также данные наблюдений за температурой воздуха и ветром в прибрежной зоне. Верификация модели проведена на основе подспутниковых наблюдений за содержанием растворенного кислорода, полученных in situ в июле 2016 г. с борта НИС «Денеб». Получение пространственной динамики растворенного кислорода основано на использовании цифровой модели рельефа. Предлагаемый модельный метод расчета по данным ДЗЗ позволяет оценивать содержание кислорода в водах Азовского моря в оперативном режиме и предупреждать население о возникновении неблагоприятных экологических ситуаций.

A model method is proposed to calculate dissolved oxygen content in water of the Taganrog Bay, the Sea of Azov based on data from Earth remote sensing (ERS). Data on chlorophyll-a concentration from MODIS spectroradiometer (Terra and Aqua satellite), and sea surface temperature according to the data from AVHRR radiometers (NOAA series satellites), and data from observations over air temperature and wind in the coastal zone are used as input. Model verification was conducted based on in situ observations of dissolved oxygen content obtained on R/V "Deneb" in July 2016. Obtaining spatial dynamics of dissolved oxygen is based on utilizing digital elevation model. Proposed model method with using ERS data allows assessing dissolved oxygen content in water of the Sea of Azov in a near real-time mode, and warn community on unfavorable environmental conditions.

Содержание кислорода, растворенного в водной толще, относится к важнейшим гидрохимическим показателям, определяющим условия существования гидробионтов. В первую очередь, содержание растворенного кислорода в водах моря интересует исследователей как источник дыхания водных организмов, немаловажным является значение этого фактора для определения полноты и скорости минерализации органических соединений, а также интенсивности процессов самоочищения водоема от загрязнений.

Одной из особенностей формирования кислородного режима Азовского моря в современный период является проникновение зон дефицита кислорода в акваторию Таганрогского залива (ТЗ). Частота появ-

1 2018.indd 120 30.03.2018 11:50:07

ления таких ситуаций в ТЗ в последние десятилетия увеличивается как из-за климатических изменений, так и в результате роста антропогенной нагрузки.

Современные натурные данные о содержании кислорода в водной толще Азовского моря немногочисленны. Это в основном информация, полученная научными организациями в результате экспедиционных исследований, не отличающихся частотой и регулярностью в связи с недостатком финансирования. В этих условиях актуальной является проблема разработки метода оценки содержания растворенного кислорода с использованием общедоступных данных спутниковых снимков для прогноза неблагоприятных экологических явлений в море (дефицит кислорода, массовые заморы гидробионтов).

В данной работе с помощью методов математического моделирования на основе спутниковой информации проводится оценка содержания растворенного кислорода в водах ТЗ Азовского моря в июле 2016 г. Верификация модели основывается на результатах подспутниковых наблюдений in situ.

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

Материалы и методы

Описание математической модели. Для однородного района акватории была разработана одномерная модель, описывающая вертикальное распределение содержания кислорода и взаимодействие с донными отложениями [1]. Переменными состояния модели являются: концентрация кислорода, количество лабильного органического вещества в водной толще и донных отложениях.

Получение пространственной динамики растворенного кислорода основано на использовании цифровой модели рельефа (ЦМР) дна залива. Для этого в каждой ячейке ЦМР запускается своя одномерная модель, при этом поля входных характеристик оцениваются по данным спутниковых снимков. При построении ЦМР была использована батиметрическая карта [2]. Размер ячейки ЦМР (10 км * 10 км) был выбран исходя из пространственного разрешения входных данных. Расчетный шаг модели по времени равен 1 часу.

Предлагаемая модель учитывает следующие природные процессы: образование первичной продукции; поступление кислорода из атмосферы; вертикальная диффузия; скорость окисления лабильного органического вещества в водной толще и донных отложениях; оседание продуцированного органического вещества в донные отложения.

Первичная продукция выступает экзогенным фактором, в качестве оценки ее уровня используются значения концентрации хлорофилла «*a*» (КХ*a*), полученные по спутниковым снимкам. Величина суточной первичной продукции рассчитывается на основе ассимиляционного числа согласно [3]. Для ТЗ в летний период по данным экспедиционных исследований величина ассимиляционного числа равна 1.5 мгС/мгХл/час [4]. Распределение величины суточной первичной продукции в течение суток выполняется пропорционально суточному ходу солнечной радиации. Расчет вертикального распределения величины первичной продукции основан на значениях прозрачности вод (глубина видимости белого диска).

Величина газообмена «вода – атмосфера» параметризуется зависимостью от температуры среды, скорости ветра и степени насыщения кислородом (зависящей от температуры и солености воды). Модель ориентирована на описание безледного периода года и не учитывает процесс замедления газообмена в результате установления ледового покрова. Для описания коэффициента вертикальной диффузии используется эмпирическая зависимость от скорости ветра. Для расчета скорости окисления органического вещества используется зависимость от температуры воды и концентрации растворенного кислорода.

Входными воздействиями в предлагаемой модели являются величина первичной продукции, прозрачность, скорость ветра, температура и соленость воды.

Данные дистанционного зондирования. Для математической модели в качестве входных использовались следующие данные дистанционного зондирования:

– КХ*a* по данным спектрорадиометра MODIS (спутники Terra и Aqua);

– температура поверхности моря по данным радиометров AVHRR (спутники серии NOAA).

Использованная информация находится в свободном доступе на сайте распределенного центра архивных материалов физической океанографии NASA (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO. DAAC)) [5].

Для расчета КХ*a* использовались снимки MODIS второго уровня обработки (L2). Было отобрано 14 снимков MODIS (пространственное разрешение – 1 км) соответствующих времени экспедиционных наблюдений в июле 2016 г.

Расчет проводился на основе регионального алгоритма [6]:

$$\text{КХ}a = 122.24[R_{rs}^{-1}(667) \times R_{rs}(748)] - 30.852,$$

где $R_{rs}(667)$ – коэффициент спектральной яркости около максимума поглощения хлорофилла «*a*» в красном диапазоне спектра на 667 нм (13 канал MODIS), а $R_{rs}(748)$ соответствует пику коэффициента спектральной яркости около 748 нм (15 канал MODIS).

Калибровка этого алгоритма выполнялась с использованием данных наблюдений КХ*a* *in situ* в 2008 г. [7]. Валидация алгоритма проводилась по 194 флуориметрическим измерениям КХ*a*, сделанным в июле 2016 г. Алгоритм позволяет оценивать КХ*a*, превышающие 15 мг/м^3. Для ТЗ КХ*a* по данным многолетних наблюдений колеблется в пределах 30-80 мг/м^3 (с максимальными значениями более 200 мг/м^3) [8–10].

1 2018.indd 121 30.03.2018 11:50:07

Температура поверхности моря по данным AVHRR/NOAA представляет собой набор данных 4-го уровня обработки (L4), содержащий среднесуточные значения температуры воды на каждую дату наблюдений в узлах регулярной сетки с размером ячейки 0.05° на 0.05°.

Данные наблюдений на береговых метеостанциях. В работе использованы материалы регулярных наблюдений за температурой воздуха и скоростью ветра в прибрежной зоне ТЗ на четырех станциях (Мариуполь, Таганрог, Ейск, Маргаритово) в период экспедиционных наблюдений.

Данные in situ. Подспутниковые наблюдения проводились в совместной экспедиции Южного научного центра РАН (ЮНЦ РАН), Института аридных зон ЮНЦ РАН (ИАЗ ЮНЦ РАН) и Азовского научно-исследовательского института рыбного хозяйства (АзНИИРХ) с борта НИС «Денеб» в акватории Азовского моря в июле 2016 г. С помощью флуориметрического судового комплекса, разработанного Шавыкиным А.А. [9], были получены непрерывные измерения КХ*a*, общей взвеси и растворенного кислорода в водах залива по ходу судна (рис. 1). Температура и соленость воды регистрировались термосоленографом *SBE 21 SeaCAT*; температура воздуха, солнечная радиация, скорость и направление ветра – автоматическим метеорологическим комплексом *Vaisala WS*425. Кроме этого, на 10 комплексных станциях определялись: абсолютная концентрация растворенного кислорода (мг O_2/л) методом Винклера на двух горизонтах (поверхностном и придонном); КХ*a* – спектрофотометрическим методом [11] и комбинированным методом с использованием модифицированного фотометра [12]; концентрация общей взвеси гравиметрическим методом [13]; прозрачность воды с помощью диска Секки. Работы проводились по стандартным общепринятым океанографическим методикам в соответствии с руководством [14]. Отбор проб осуществлялся пластиковым ведром из поверхностного горизонта, а также из системы прокачки термосоленографа *SBE 21 SeaCAT* (глубина забора – 1.5 м).

Результаты и обсуждение

Содержание кислорода в водной толще Азовского моря определяется многими факторами (поглощением атмосферного кислорода поверхностным слоем воды, прогревом и охлаждением водных масс, циркуляционными процессами и другими). При этом пространственные изменения содержания растворенного кислорода, как правило, отражают распределение фитопланктона [15], поэтому прослеживается прямая связь с КХ*a*.

Погодные условия во время прохождения экспедиции на НИС «Денеб» в июле 2016 г. способствовали насыщению вод залива кислородом из атмосферы. На рис. 2 представлены основные составляющие гидрометеорологической обстановки в период экспедиции.

Исследования выполнялись в условиях действия ветров восточных направлений (северо-восток, юго-восток), средняя скорость составляла 4–6 м/с, максимальная – 11 м/с. Соленость и прозрачность вод изменялись по ходу движения судна: минимальные значения наблюдались в вершине ТЗ – 4‰ и 0.5 м, максимальные – на выходе из залива – 13‰ и 1.9 м соответственно. Отмечался выраженный суточный ход температур воздуха и воды, с колебаниями от 26.6 до 32.3°С и от 26.7 до 28.7°С соответственно.

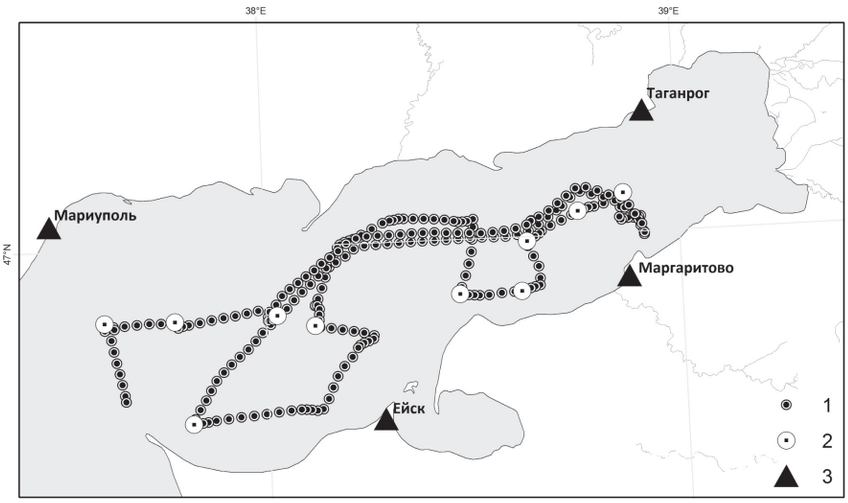

Рис. 1. Схема станций, выполненных на НИС «Денеб» в ТЗ в июле 2016 г. 1 – станции непрерывных наблюдений; 2 – комплексные станции, 3 – береговые метеостанции

1 2018.indd 122 30.03.2018 11:50:08

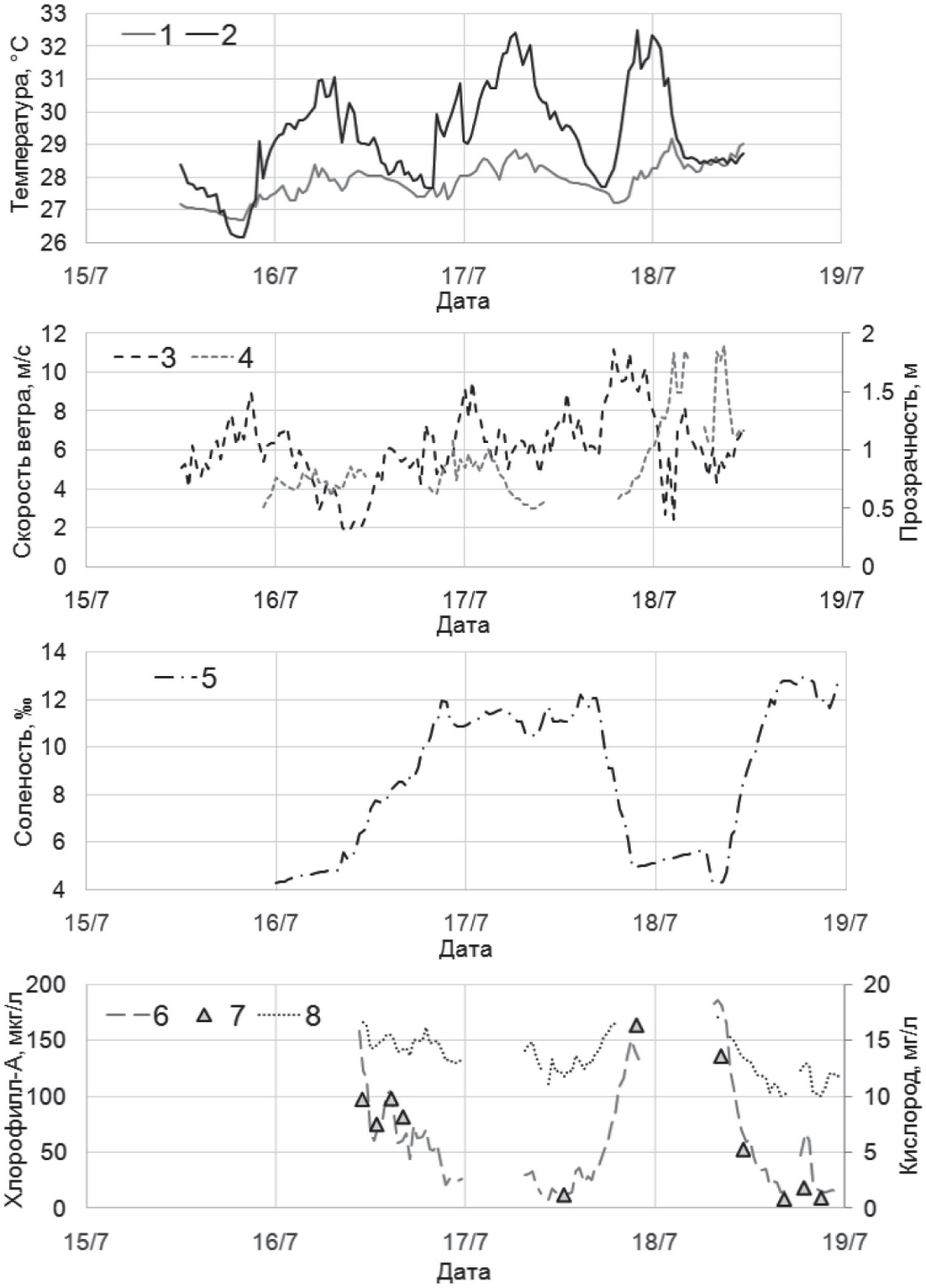

Рис. 2. Гидрометеорологическая обстановка в период экспедиции в ТЗ, июль 2016 г.
1 – температура воды, 2 – температура воздуха, 3 – скорость ветра, 4 – прозрачность,
5 – соленость, 6 – КХа, измеренного флуориметрическим судовым комплексом, 7 – КХа, измеренного комбинированным методом, 8 – концентрация растворенного кислорода

1 2018.indd 123 30.03.2018 11:50:08

По результатам наблюдений *in situ* в июле 2016 г. в ТЗ были отмечены относительно высокие концентрации кислорода в поверхностном слое: от 107% до 160% насыщения, при среднем значении – 130%. Максимальные степени насыщения вод кислородом в поверхностном слое приурочены к станциям с повышенными значениями КХ*a* (рис. 2), что свидетельствует о высокой интенсивности первичного продуцирования, так называемом «цветении» водорослей, в этот период. При этом по данным наблюдений на комплексных станциях в придонном слое содержание растворенного кислорода составляло от 49 до 100%, при среднем значении насыщения 83%. Зоны дефицита кислорода (< 60%) были отмечены в центральной части ТЗ.

По результатам модельных расчетов на основе спутниковых снимков (рис. 3) насыщение кислородом поверхностного слоя в среднем составило 113% (минимальное и максимальное значения 96% и 185% соответственно), при этом насыщение придонного горизонта кислородом в среднем было на уровне 85%. Что адекватно наблюдениям *in situ*.

Средняя ошибка расчетов концентрации растворенного кислорода в поверхностном слое при сравнении с наблюдениями флуориметрического судового комплекса составила 1.46 мг O_2/л. Средняя абсолютная ошибка расчетов для комплексных станций в поверхностном горизонте составила 0.84 мг O_2/л, в придонном слое – 1.15 мг O_2/л.

По результатам модельного расчета возникновение зон дефицита кислорода в ТЗ было отмечено с 21 по 26 июля, с максимальным развитием 24 июля. Как можно видеть на рис. 4, пространственно их расположение приурочено к наиболее глубокой части ТЗ. Согласно расчетам зона придонного дефицита кислорода на 24 июля составила 600 км^2 (10% площади залива). К сожалению, небольшое количество комплексных станций не позволяет подтвердить или опровергнуть такое развитие ситуации в придонной части залива в эти даты.

Косвенным подтверждением может быть наблюдавшаяся в июле 2016 г. гибель гидробионтов в ТЗ. Следует отметить, что «заморный» период на всей акватории Азовского моря, включая ТЗ, был объявлен еще 27.06.2016 [16], но массовая гибель рыбы в ТЗ отмечена в июле [17]. По Азовскому морю гибель гидробионтов летом 2016 г. фиксировалась также в начале августа в Темрюкском районе (ст. Голубицкая) и в Крыму (в акватории Арабатского залива, на участке от города Щелкино до с. Мысовое) [18].

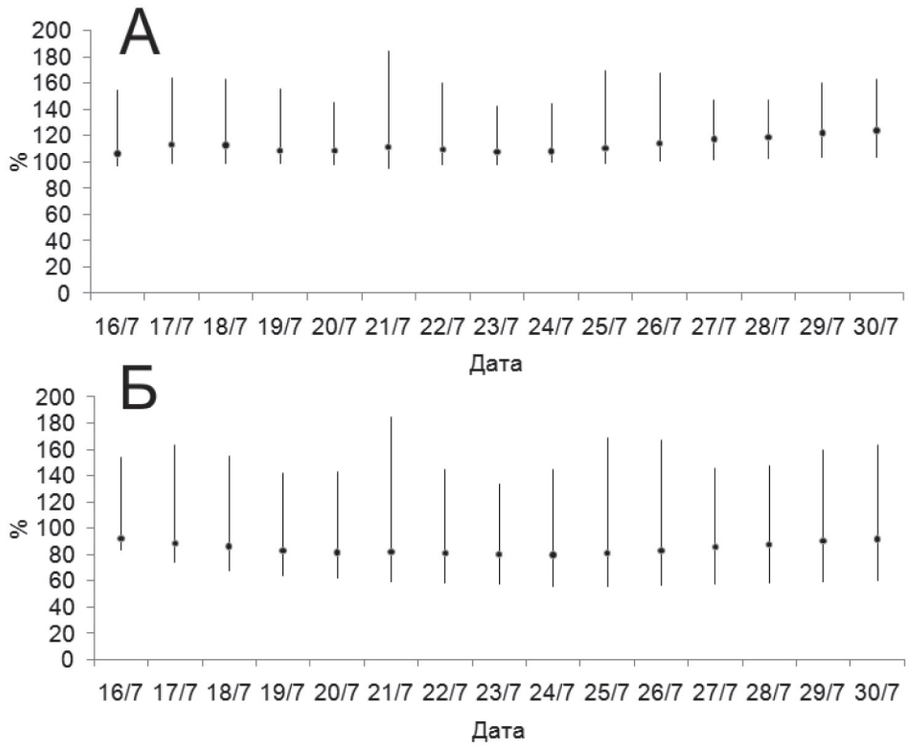

Рис. 3. Среднесуточное насыщение кислородом (%) поверхностного (А) и придонного (Б) горизонтов по результатам расчета, июль 2016 г. Примечание: вертикальной линией показан размах значений от минимального до максимального, горизонтальной отсечкой – среднее значение по заливу

1 2018.indd 124 30.03.2018 11:50:09

Заключение

Содержание растворенного кислорода в водоемах – вариабельный показатель, который может заметно меняться даже в течение суток. По результатам модельных расчетов можно сделать вывод, что предложенный метод оценки содержания растворенного кислорода на основе данных дистанционного зондирования достаточно адекватно воспроизводит кислородный режим ТЗ и дает удовлетворительные количественные оценки потенциальных зон дефицита кислорода. Так как предлагаемая модель предназначена для вычисления усредненных по времени и пространству характеристик, получаемые в результате компьютерных экспериментов концентрации кислорода имеют условный характер и должны рассматриваться, в первую очередь, как индикаторы тенденций. Однако даже такая грубая оценка позволяет анализировать масштабы пространственно-временной неоднородности и прогнозировать возможное изменение кислородного режима в зависимости от величины первичной продукции и гидрометеорологических условий среды. Предлагаемый модельный метод расчета по данным спутниковых снимков позволяет оценивать содержание кислорода в водах Азовского моря в оперативном режиме и может использоваться для предупреждения населения о возникновении неблагоприятных экологических ситуаций.

Литература

1. Oxygen depletion risk assessment in shallow water bodies of the Sea of Azov region / V. Kulygin [et al.] // SGEM2016 Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 2. – P. 799–806.

2. Матишов, Г. Г. Батиметрия и закономерности формирования рельефа дна Азовского моря / Г.Г.Матишов // Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей. Апатиты: КНЦ РАН. – 2006. – Т. 8.– С. 31–42.

3. Оценка концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных / Г.Г. Матишов [и др.] // Доклады академии наук. – 2010. – Т. 432, № 4. – С. 563–566.

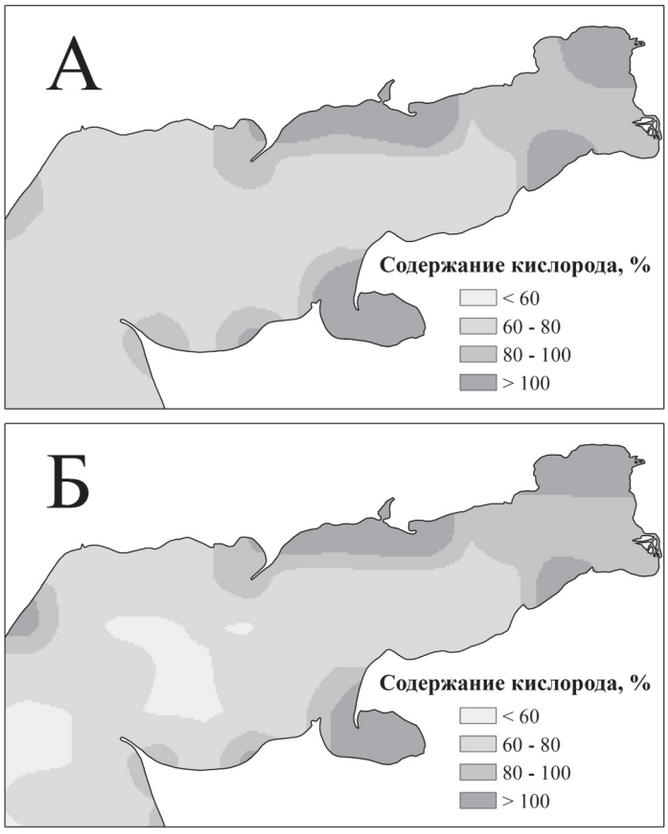

Рис. 4. Насыщение кислородом придонного горизонта ТЗ по результатам расчета на 18 (А) и 24 (Б) июля 2016 г.

1 2018.indd 125 30.03.2018 11:50:09

4. Ермолаева, Е. В. Распределение и сезонная динамика продукции и деструкции органического вещества в Азовском море в 2008–2010 гг. / Е.В. Ермолаева // Экосистемные исследования среды и биоты Азовского бассейна. – 2012. – С. 131–139.

5. Physical Oceanography Distributed Active Archive Center [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://podaac.jpl.nasa.gov, свободный. – Загл.с экрана.

6. Атлас Больших морских экосистем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://atlas.iaz.ssc-ras.ru, свободный. – Загл. с экрана.

7. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data-successes and challenges / W.J. Moses [et al.] // Environmental Research Letters. – 2009. – Vol. 4. – P. 045005 (8 pp).

8. Пространственно-временное распределение концентрации хлорофилла а в Азовском море по данным ДЗЗ / В.В.Сапрыгин [и др.] // Окружающая среда и человек. Современные проблемы генетики, селекции и биотехнологии: материалы междун. науч. конф. и молодежн. науч. конф. памяти Д. Г. Матишова / гл. ред. акад. Г.Г. Матишов и др. – Ростов н/Д: изд. ЮНЦ РАН, 2016. – С. 224–227.

9. Непрерывные измерения океанологических параметров в приповерхностном слое Таганрогского залива. 1. Определение хлорофилла а флуориметрическим методом / А.А. Шавыкин [и др.] // Вестник Южного научного центра. – 2010. – Т. 6, № 3. – С. 37–46.

10. Operational MERIS-based NIR-red algorithms for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters – the Azov Sea case study / W.J. Moses [et al] // Remote Sens. of Environment. – 2012. – Vol. 121. – P. 118–124.

11. ГОСТ 17.1.4.02–90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а / ИО АН СССР. – М., 1990. – 12 с.

12. Поважный, В. В. Определение концентрации хлорофилла "*a*" комбинированным методом с использованием модифицированного фотометра / В.В. Поважный // Океанология. – 2012. – № 4. – С. 600–605.

13. РД 52.24.468-2005. Взвешенные вещества и общее содержание примесей в водах. Методика выполнения измерений массовой концентрации гравиметрическим методом / Гидрохимический институт. – Ростов-на-Дону, 2005. – 12 с.

14. РД 52.10.243-92. Руководство по химическому анализу морских вод / Гидрометеоиздат – СПб., 1993. – 129 с.

15. Студеникина, Е. И. Фитопланктон Азовского моря в условиях антропогенных воздействий / Е.И. Студеникина, А.Я. Алдакимова, Г.С. Губина. – Ростов-на-Дону: Эверест, 1999. – 175 с.

16. «Об объявлении заморного периода в Азовском море и Таганрогском заливе»: приказ Азово-Черноморского территориального управления Федерального агентства по рыболовству от 27.06.2016 г № 428 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rostov-fishcom.ru. – 2016. – 27 июня. – 2 с.

17. DonNews [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.donnews.ru/V-Azovskom-more-i-Taganrogskom-zalive-iz-za-zhary-dohnet-ryba_25658, свободный. – Загл. с экрана.

18. Азово-Черноморское территориальное управление Федерального агентства по рыболовству [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rostov-fishcom.ru/news/10506, свободный. – Загл. с экрана.

1 2018.indd 126 30.03.2018 11:50:09