УДК 581.526.325:528.88 (262.54)
DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-2-55-65

ОЦЕНКА ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ АЗОВСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2018 г. С.В. Бердников¹, Л.В. Дашкевич¹, В.В. Кулыгин¹, В.В. Поважный²

Аннотация. Работа посвящена оценке годовой валовой первичной продукции фитопланктона Азовского моря по данным дистанционного зондирования. Определение значений первичной продукции выполнено с использованием интегрированной по глубине модели, основанной на величинах концентрации хлорофилла *a* и ассимиляционного числа. Концентрация хлорофилла *a* в поверхностном слое Азовского моря рассчитана по спутниковым снимкам спектрометра MERIS с применением разработанного двухканального алгоритма, использующего коэффициенты спектральной яркости на длинах волн 665 и 708 нм. На основе информации *in situ* по данным измерений определена сезонная динамика ассимиляционного числа, получено нормированное вертикальное распределение суточной первичной продукции в водах Таганрогского залива. По данным дистанционного зондирования рассчитана динамика первичной продукции по месяцам для Таганрогского залива, открытой части акватории и всего моря в целом в 2008–2009 гг. Кроме этого, для Азовского моря получена карта распределения годовой валовой первичной продукции. Максимальные значения пришлись на центральную часть Таганрогского залива и глубоководную центральную часть Азовского моря. По нашим оценкам на основе данных дистанционного зондирования, уровень продуцирования Азовского моря в современный период примерно соответствует уровню 1960-х гг. Единственные опубликованные и доступные для сравнения значения годовой первичной продукции Азовского моря рассчитаны с помощью кислородного метода Бруевича – Дацко. Показаны значительные различия оценок, полученных нами по данным дистанционного зондирования, и значений годовой первичной продукции, рассчитанных кислородным методом Бруевича – Дацко. В работе также обсуждаются ограничения данного кислородного метода, подтвержденные результатами непрерывных наблюдений на научно-исследовательском судне «Денеб» в июле 2016 г.

Ключевые слова: первичная продукция, Азовское море, методика Бруевича – Дацко, данные дистанционного зондирования, хлорофилл *a*.

ASSESSMENTS OF PRIMARY PRODUCTIVITY IN THE SEA OF AZOV BASED ON REMOTE SENSING DATA

S.V. Berdnikov¹, L.V. Dashkevich¹, V.V. Kulygin¹, V.V. Povazhnyy²

Abstract. The study is devoted to assessments of gross primary productivity (GPP) of plankton in the Sea of Azov, based on remote sensing data. The estimates of GPP were made with depth-integrated model, based on chlorophyll *a* concentration and assimilation number. Chlorophyll *a* concentrations in the Sea of Azov surface layer were assessed on the basis of MERIS spectrometer images by the original two-channel algorithm, utilizing 665 and 708 nm bands. The assimilation number seasonal dynamics and normalized vertical distribution of daily GPP values in the Taganrog Bay were calculated with *in situ* data. The monthly average GPP values were obtained for the Taganrog Bay, the open part of the Sea of Azov and the Sea in general in 2008–2009. The integrated map of annual GPP distribution was also plotted. The maximum GPP values were recorded in the central part of the Taganrog Bay and in the deep central open part of the Sea. The modern GPP level, assessed on the basis of remote sensing data, is comparable to one observed in 60-s of XX century. The only published

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: ldashkev@ssc-ras.ru

² Государственный научный центр РФ «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт» (Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russian Federation), Российская Федерация, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

reference values for GPP in the Sea of Azov were obtained with Bruevich-Datsko oxygen method. The considerable bias of provided assessments with annual GPP data, based on oxygen evaluation dynamics after Bruevich-Datsko (used previously for the Sea of Azov), is shown. The limitations of Bruevich-Datsko method, proved by the results of underway monitoring on research vessel “Deneb” in July 2016 are also discussed in the article.

Keywords: gross primary productivity, Sea of Azov, Bruevich – Datsko method, remote sensing data, chlorophyll *a*.

ВВЕДЕНИЕ

Определение валовой первичной продукции (ПП) морских водоемов является непростой задачей. Азовское море хорошо изучено в гидробиологическом отношении, и, тем не менее, оценки ПП для данного водоема, имеющиеся в настоящий момент, противоречивы, что связано с применяемыми методическими подходами к ее определению.

Азовское море является высокопродуктивным морским водоемом эстуарного типа. Его площадь составляет всего 39 тыс. км² при средней глубине около 7 м [1]. Основными источниками поступления биогенных веществ в акваторию являются реки Дон и Кубань, суммарный сток которых в последнее десятилетие составляет 24–26 км³/год [2; 3] (за историю наблюдений – от 19 до 63 км³/год [1]). Высокая трофность водоема и преобладающие глинистые донные осадки определяют невысокую прозрачность моря (2,0 и 0,7 м в море и в Таганрогском заливе соответственно [4]).

Измерения ПП за весь период наблюдений, выполненные общепринятыми методами [5–7], для Азовского моря немногочисленны [8; 9]. При этом ежегодно с 1952 г. выполняются оценки ПП для всего моря [1; 10–12 и др.] по оригинальной методике Бруевича – Дацко [9; 13; 14] на основе взаимосвязи суточной динамики растворенного кислорода в водоеме и фотосинтеза фитопланктона. Хотя данный метод не получил широкого распространения в биоокеанологии, а используется лишь для оценки ПП ручьев и рек [15; 16], для экосистемы Азовского моря отсутствуют оценки годовой ПП, полученные другими методами.

Широкое распространение в последние годы получил метод оценки ПП по концентрации хлорофилла *a* на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Такой подход позволяет рассчитывать величину ПП одновременно на больших участках акватории и так часто, как появляются релевантные спутниковые данные. Успешные примеры использования данного подхода приведены в работах [17–19].

Целью настоящей работы является оценка современного уровня первичного продуцирования Азовского моря в годовом масштабе с использованием данных ДЗЗ. В работе также обсуждаются ограничения кислородного метода Бруевича – Дацко, используемого для оценок годовых значений ПП Азовского моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой анализа содержания растворенного кислорода для последующего определения первичного продуцирования в Азовском море послужили архивные и экспедиционные первичные данные, опубликованные в работах [20; 21]. В этих базах данных общее число океанографических станций с измерениями содержания растворенного кислорода составило 12479.

В период с апреля 2008 г. по август 2010 г. проведены исследования на 179 океанографических станциях с измерениями ПП и концентрации хлорофилла *a* в 10 морских экспедициях в Азовском море, охвативших все сезоны. Определения ПП выполняли по кислородной модификации скляночного метода [5] при экспонировании воды из поверхностного горизонта в проточной системе на борту судна (157 станций), а также при экспонировании *in situ* на горизонтах, кратных величине глубины видимости белого диска (диска Секки) (22 станции). Определение концентрации хлорофилла *a* и других фотосинтетических пигментов выполняли спектрофотометрическим методом согласно [22] при каждом определении ПП.

Для оценки ПП Азовского моря по данным ДЗЗ применяли формулу:

$$PP = \frac{\alpha \cdot Chla \cdot h_s}{k} = \frac{PP_0}{k}, \quad (1)$$

где *PP* – суточная ПП органического вещества, гС/м²/сутки; α – ассимиляционное число, равное отношению суточной продукции органического вещества в поверхностном слое (гС/м³/сутки) к концентрации хлорофилла *a* в этом слое (мг/м³);

$Chla$ – концентрации хлорофилла a в поверхностном слое, $мг/м^3$; h_s – глубина видимости белого диска, $м$; PP_0 – суточная ПП органического вещества в слое, равном одной глубине видимости белого диска, $гС/м^2/сутки$; k – доля ПП в слое, равном одной глубине видимости белого диска от общей ПП в слое фотосинтеза.

Оценка годовой ПП по данным ДЗЗ по формуле (1) выполнена следующим образом. Концентрации хлорофилла a в поверхностном слое Азовского моря рассчитывали по спутниковым снимкам спектрометра MERIS за 2008–2009 гг. с применением разработанного двухканального алгоритма, использующего коэффициенты спектральной яркости на длинах волн 665 и 708 нм [23]. В диапазоне концентрации хлорофилла a от 1 до 110 $мг/м^3$ средняя абсолютная и среднеквадратичная ошибки составляют 4,32 и 5,92 $мг/м^3$ соответственно [24]. Для расчета среднемесячных и среднего годового полей концентрации хлорофилла a обработано 185 спутниковых снимков, покрывающих акваторию Азовского моря полностью или частично [25; 26].

Для оценки величины ассимиляционного числа и параметра k в формуле (1) использованы данные наблюдений *in situ*.

Величина ассимиляционного числа рассчитана по данным экспедиционных наблюдений (рис. 1). Для месяцев, когда параллельные наблюдения ПП и концентрации хлорофилла a отсутствовали, выполнена интерполяция измеренных значений.

Вертикальное распределение ПП было изучено на 22 станциях в водах Таганрогского залива. Для обобщения полученных результатов брали не абсолютные глубины, а относительные горизонты, нормированные на глубину белого диска, и относительные значения ПП (рис. 2).

Значение ПП на поверхности было принято за 100 %. Максимальные значения ПП (114 %) наблюдаются на горизонте, соответствующем 0,5 глубины видимости белого диска. При этом было установлено, что в среднем 55 % органического вещества продуцируется в слое, равном глубине видимости белого диска. Поэтому коэффициент k в формуле (1) был принят равным 0,5. Это означает, что удвоение величины ПП в слое, равном одной глубине видимости белого диска, дает общее значение ПП в слое фотосинтеза для Азовского моря.

Значения глубины видимости белого диска были получены для всего моря в соответствии с сезонными картами прозрачности, построенными на основе баз данных [4; 20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе среднемесячных полей распределения концентрации хлорофилла a , сезонных карт распределения прозрачности и сезонного хода ассимиляционного числа по формуле (1) рассчитаны поля суточной ПП для каждого месяца. После умножения на число календарных дней в соответствующем месяце и суммирования получена оценка годовой величины ПП в Азовском море, представленная на рисунке 3 и по сезонам в таблице 1.

На рисунке 3 величина ПП указана под квадратным метром, что дает представление о районах с наибольшим вкладом в годовую ПП моря в целом. Максимальные значения ПП приходятся на центральную часть Таганрогского залива, где в летне-осенний период наблюдаются максимумы концентрации хлорофилла a , и глубоководную центральную часть Азовского моря.

В открытой части Азовского моря концентрации хлорофилла a , по данным многолетних наблюдений, колеблются в пределах 5–10 $мг/м^3$ (с максимальными значениями до 30 $мг/м^3$); в Таганрогском заливе – 30–80 $мг/м^3$ (с максимальными значениями более 200 $мг/м^3$) [24; 27; 28]. Максимум в распределении концентрации хлорофилла a в Таганрогском заливе наблюдается

Рис. 1. Сезонная динамика ассимиляционного числа в Азовском море по данным измерений *in situ* в 2008–2009 гг. Столбиком показаны средние значения, линией – стандартное отклонение, пунктиром – оценки для месяцев, для которых измерения отсутствовали.

Fig. 1. The seasonal dynamics of assimilation number, based on *in situ* data of 2008–2009. The bars stand for mean values, lines – for standard deviation, dashed line – assessment for months with no data.

Рис. 2. Нормированное вертикальное распределение суточной ПП (%) в водах Таганрогского залива за период 2008–2009 гг. (среднее, квантиль 25 и 75 %). По вертикали выполнена нормировка на одну глубину видимости белого диска, по горизонтали – на значение суточной ПП на поверхности.

Fig. 2. Normalized vertical distribution of daily GPP (%) in the Taganrog Bay in 2008–2009 (mean, 25 and 75 % quartile). Normalized vertically to one Secchi Depth, horizontally – to daily GPP in surface layer.

на участках с соленостью 5,5–6,5 PSU [29]. Его расположение в центральной части залива соответствует зоне максимального развития сообщества солоноватоводного фитопланктона под влиянием биогенного стока р. Дон, поступающего в залив преимущественно по судоходному каналу. При этом большая протяженность и узость Таганрогского залива препятствуют

быстрому водообмену с открытой частью Азовского моря.

Рост величин ПП от берегов к центру моря связан с увеличением глубины и прозрачности, что влияет на слой фотосинтеза. В мутных прибрежных водах (глубина видимости белого диска в летне-осенний период около 0,5 м [4]) вся ПП формируется в приповерхностном слое. Расположение максимума ПП в центральной части моря объясняется наибольшей прозрачностью этого района (до 4 м в весенний период [4]).

В отличие от вод р. Дон, оказывающих большое влияние на мелководный Таганрогский залив, меньший по объему сток р. Кубань, поступающая в Азовское море, быстро смешивается с малопродуктивными морскими водами из-за отсутствия выраженного эстуария и не формирует устойчивой зоны повышенной концентрации хлорофилла *a*.

Было выполнено сравнение сезонного хода ПП, рассчитанного по спутниковым данным 2008–2009 гг., с опубликованными в работе [9] результатами натурных наблюдений в Азовском море (рис. 4). В основном числа сопоставимы, за исключением мая месяца, когда наблюдается различие оценок более чем в 2 раза. Вероятно, это связано с особенностями развития фитопланктона в конкретные годы наблюдений.

Таблица 1. ПП в Азовском море в 2008–2009 гг., гС/м² (в скобках указана ПП в млн т сухого органического вещества)

Table 1. GPP in the Sea of Azov in 2008–2009 in gC/m² (within brackets – mln. t. of dry organic matter)

Месяц Month	Таганрогский залив Taganrog Bay	Открытая часть моря Open Sea	Все море Sea in general
Февраль / February	14 (0,2)	19 (1,3)	19 (1,5)
Март / March	27 (0,3)	20 (1,4)	21 (1,7)
Апрель / April	19 (0,2)	20 (1,3)	19 (1,5)
Май / May	28 (0,3)	37 (2,5)	36 (2,8)
Июнь / June	47 (0,5)	28 (1,9)	31 (2,4)
Июль / July	71 (0,8)	51 (3,4)	54 (4,2)
Август / August	62 (0,7)	47 (3,1)	49 (3,8)
Сентябрь / September	50 (0,6)	36 (2,4)	38 (3,0)
Октябрь / October	22 (0,2)	20 (1,3)	20 (1,5)
Ноябрь / November	16 (0,2)	24 (1,6)	23 (1,8)
Декабрь / December	13 (0,1)	15 (1,0)	15 (1,1)
Год / Year	369 (4,1)	317 (21,2)	325 (25,3)

Примечание. Для пересчета содержания углерода на содержание органического вещества нами использовался коэффициент 2, так же как и в формуле (1).

Note. To calculate dry organic matter from carbon the factor of 2 was used (as well as in formula (1)).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В.Г. Дацко [9] оценивал среднюю годовую ПП, создаваемую фитопланктоном в Азовском море, в 34 млн т органического вещества в сухом весе. Наши оценки ПП Азовского моря с использованием спутниковой информации и данных полевых наблюдений для 2008–2009 гг. дают величину 25 млн т в год сухого органического вещества.

Единственные опубликованные и доступные для сравнения значения годовой первичной продукции Азовского моря рассчитывались кислородным методом Бруевича – Дацко [1; 10–12]. Для 2008 и 2009 гг. они составили 62 и 68 млн т в год сухого органического вещества соответственно [10], что более чем в 2 раза больше величин, полученных нами с использованием спутниковой информации.

Здесь следует подробнее остановиться на методе Бруевича – Дацко. Анализируя многолетний ряд годовой ПП, рассчитанной этим методом [1; 10–12], можно отметить два периода: 1960–1989 и 1990–2011 гг. Во втором периоде наблюдается существенное увеличение ПП (примерно в 2 раза) по сравнению с первым. Эти значительные изменения пока не находят должного объяснения, поскольку современный уровень биомассы фитопланктонного сообщества Азовского моря находится на уровне 1960-х гг. [30]. Также следует отметить, что ряд годовой ПП характеризуется большой вариативностью.

Одной из причин подобного поведения величин ПП, на наш взгляд, могут являться ошибки методического характера. В основе метода Бруевича – Дацко лежат следующие два положения:

1) существование «правильного» суточного хода кислорода, позволяющего оценить суточную первичную продукцию. В работе В.Г. Дацко сказано: «при хорошо выраженной жизнедеятельности фитопланктона, например, в Азовском и Каспийском морях, получаются при тихой погоде довольно правильные кривые суточного хода кислорода с минимумом на восходе солнца и максимумом в послеполуденные часы...» [9: с. 30];

2) модификация В.Г. Дацко, предусматривающая возможность использования измерений кислорода, выполненных не только на суточных станциях, но и на разных станциях в течение одного рейса: «Наблюдения, которые производятся с неподвижно стоящего судна, дают представление об изменении содержания кислорода на большой акватории моря.

Рис. 3. Средняя годовая ПП в Азовском море, полученная по данным ДЗЗ, за период 2008–2009 гг.

Fig. 3. Mean annual GPP in the Sea of Azov, assessed by remote sensing data of 2008–2009.

Примерно те же величины по изменению содержания кислорода могут быть получены при наблюдениях в разных точках моря с судна, находящегося в рейсе, если станции выполняются в те же часы, что и определения кислорода на суточных станциях... Порядок величин $\Delta O_{2\text{макс}}$ из средних значений содержания кислорода по рейсовым наблюдениям примерно тот же, что и для тех же величин, полученных при наблюдениях на суточных станциях» [9: с. 120].

Для исследования справедливости первого положения на основе баз данных Азовского моря [20; 21] был построен среднесезонный суточный ход содержания кислорода в слое 2 м от поверхности для периода с марта по ноябрь. На рисунке 5 показано,

Рис. 4. Сопоставление сезонного хода ПП в Азовском море в период с марта по ноябрь: 1 – наши данные, 2 – данные из работы [9]. Период вегетации (март – ноябрь) принят за 100 %.

Fig. 4. Comparison of seasonal GPP trends in the Sea of Azov (March – November): 1 – original data, 2 – data from [9]. Vegetation period taken from March to November as 100 %.

Рис. 5. Среднегодовое содержание растворенного кислорода (мл/л) в Азовском море (медиана, квантиль 25 и 75 %): *a* – Таганрогский залив; *б* – открытое море.

Fig. 5. Mean annual dissolved oxygen values (ml/l) in the Sea of Azov (mean, quartile 25 and 75 %): *a* – Taganrog Bay; *б* – open Sea.

что среднегодовое суточный ход получился практически «правильной» формы. При этом графики для Таганрогского залива и открытой части моря отличаются незначительно (на 0,1–0,5 мл/л). Величина стандартного отклонения в пределах часа для Таганрогского залива составляет 1,1–2,8 мл/л, а для открытой части моря 1,3–2,0 мл/л, что говорит о высокой изменчивости данного параметра.

Вместе с тем анализ результатов наблюдений за содержанием растворенного кислорода из баз данных [20; 21] показал, что минимум содержания кислорода на поверхности в летний период может отмечаться в любое время суток в зависимости от погодных условий, но чаще в промежутки от полуночи до 8 часов утра. Максимум также не имеет четкого времени локализации, чаще всего приходится на вторую половину дня – с полудня до 21 часа; возможен и второй максимум около 10 часов утра. Выраженные сезонные особенности в динамике суточного хода кислорода не выявлены. По нашему мнению, характер суточного хода определяется преобладающими погодными условиями в день наблюдений, в частности скоростью ветра. Так, при скорости ветра более 6 м/с в поверхностном слое на многосуточных станциях можно наблюдать суточный ход кислорода, обратный «правильному» (рис. 6).

Второе положение, лежащее в основе метода Бруевича – Дацко, не подтверждается данными непрерывных наблюдений на научно-исследовательском судне «Денеб» в июле 2016 г. На всей акватории моря были выполнены непрерывные из-

мерения прижизненной флуоресценции хлорофилла *a* и растворенного кислорода в поверхностном горизонте (более 3600 измерений) с помощью проточного флуориметра оригинальной конструкции, оборудованного люминесцентным датчиком кислорода на основе фенантролинового комплекса рутения(II) [31]. Проведенные наблюдения показали, что содержание растворенного кислорода в водах Азовского моря в большей степени зависит от мозаичности распределения концентрации фитопланктона и погодных условий, нежели от времени суток. На рисунке 7 отображены результаты суточных непрерывных наблюдений за содержанием растворенного кислорода и концентрацией хлорофилла *a* по ходу движения судна в водах Таганрогского залива и открытой части Азовского моря. Приведены примеры «правильного» и обратного «правильному» суточного хода.

Так, на рисунке 7*б* судно следует по направлению увеличения концентрации хлорофилла *a* до 16:00, а далее идет в район с более низкой концентрации хлорофилла *a*, скорость ветра на протяжении суток в среднем составляет 3,6 м/с. В результате полученный график хорошо соответствует «правильному» суточному ходу распределения растворенного кислорода (рис. 7*а*). Противоположная ситуация показана на рисунке 7*г*: судно в течение суток движется по направлению уменьшения содержания концентрации хлорофилла *a*, кроме того, отмечается умеренный ветер с порывами до 12 м/с, при этом наблюдается суточный ход кислорода, обратный «пра-

ВЫВОДЫ

вильному» (рис. 7в). Аналогичную ситуацию можно наблюдать в открытом море. На рисунке 7е экспедиционное судно с начала суток до 16:00 следует из района с более низкими значениями концентрации хлорофилла *a* в прибрежные районы моря с более высокими его значениями, а далее возвращается в район с меньшей концентрацией хлорофилла *a*, средняя скорость ветра при этом составляет 6 м/с при порывах до 10 м/с. Однако полученный в результате суточный ход кислорода близок к «правильному» (рис. 7д). На рисунке 7з судно на протяжении суток движется из района с более высоким значением концентрации хлорофилла *a* в район с более низким значением его концентрации – получаем обратный «правильному» суточный ход растворенного кислорода (рис. 7ж). При этом следует отметить, что в течение суток скорость ветра не превышала 4–5 м/с при среднем значении 2,9 м/с. Таким образом, по данным непрерывных наблюдений по ходу судна, суточный ход растворенного кислорода в первую очередь следует за концентрацией хлорофилла *a* в водах моря.

Можно сделать вывод, что использование данных о растворенном кислороде, полученных из разных районов Азовского моря даже в пределах одного дня экспедиционных исследований, может привести к значительным ошибкам при определении суточной продукции фитопланктона.

Приведенные выше примеры нарушения положений, лежащих в основе метода Бруевича – Дацко, ставят вопрос об оправданности применения этого метода для оценки годовой ПП морского водоема и корректности получаемых оценок.

Получена оценка современного уровня годовой ПП для Азовского моря в целом с использованием спутниковой информации и данных полевых наблюдений (2008–2009 гг.): $325 \text{ гC}_{\text{орг}}/\text{м}^2/\text{год}$, или 25 млн т в год сухого органического вещества. Это значение более чем в 2 раза меньше опубликованных величин годовой ПП, рассчитанных по модифицированной методике Бруевича – Дацко другими авторами (62 и 68 млн т в год сухого органического вещества в 2008 и 2009 гг. соответственно [10]). Вместе с тем следует отметить, что наши оценки уровня ПП в Азовском море примерно соответствуют величинам, характерным для 1960-х гг. [1; 13], оцененным также по методике Бруевича – Дацко. Данное противоречие можно объяснить большой вариабельностью величин годовой ПП, получаемых при использовании модифицированной методики Бруевича – Дацко. Косвенным подтверждением справедливости наших оценок современной продуктивности моря, близких к таковым в 1960-х гг., может быть наблюдаемая в последние два десятилетия стабилизация биомассы фитопланктонного сообщества в Азовском море, соответствующая уровню 60-х гг. прошлого века [30].

Ограничения, накладываемые на применение методики Бруевича – Дацко для расчета годовой ПП экосистемы Азовского моря, требуют переоценки ранее опубликованных представлений о продуктивности моря в целом. Дальнейшее развитие современных дистанционных методов измерений позволит сделать оценки ПП по пространству, сезонам и в целом за год более точными.

Рис. 6. Динамика содержания кислорода (мл/л) в поверхностном слое Таганрогского залива по наблюдениям из базы данных [20; 21] на многосуточных станциях при ветре более 6 м/с: *a* – 11–14 октября 1967 г., скорость ветра 9–15 м/с; *б* – 13 сентября 1967 г., скорость ветра 6–10 м/с

Fig. 6. Dissolved oxygen (ml/l) daily changes in the surface layer of Taganrog Bay [20; 21], derived from long-term observation series with wind over 6 m/s: *a* – October 11–14, 1967, wind speed 9–15 m/s; *б* – September 13, 1967, wind speed 6–10 m/s.

Рис. 7. Динамика содержания растворенного кислорода (1) и концентрации хлорофилла *a* (2) в поверхностном слое по данным непрерывных наблюдений с НИС «Денеб» в июле 2016 г.: а, б – 29.07; в, г – 18.07; д, е – 20.07; ж, з – 30.07.

Fig. 7. Dissolved oxygen (1) and chlorophyll *a* (2) changes in surface layer, based on underway observations from research vessel "Deneb" in July 2016: а, б – 29.07; в, г – 18.07; д, е – 20.07; ж, з – 30.07.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-0854), в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.52 «Обеспечение устойчивого развития Юга России в условиях климатиче-

ских, экологических и техногенных вызовов» по теме «Анализ кризисных явлений в Азово-Черноморском и Каспийском бассейнах (водные и рыбные ресурсы, опасные природные явления)» (№ АААА-А18-118011990324-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. 1991. Л., Гидрометеониздат: 237 с.
2. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. 2013. Современные изменения водного режима рек в бассейне Дона. *Водные ресурсы*. 40(6): 544–556. doi: 10.7868/S0321059613060047
3. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2013. 2014. Ростов н/Д: 568 с.
4. Сорокина В.В., Кулыгин В.В. 2013. Долговременная изменчивость относительной прозрачности вод Азовского моря. *Океанология*. 53(3): 324–331. doi: 10.7868/S003015741303012X
5. Абакумов В.А. 1983. *Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений*. Л., Гидрометеониздат: 236 с.
6. *Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем*. 1992. СПб., Гидрометеониздат: 318 с.
7. Steemann Nielsen E. 1952. The use of radio-active carbon (C14) for measuring organic production in the sea. *Journal du Conseil*. 18(2): 117–140.
8. Артемьев В.Е. 1993. *Геохимия органического вещества в системе река-море*. М., Наука: 209 с.
9. Дацко В.Г. 1959. *Органическое вещество в водах южных морей СССР*. М., изд-во Академии наук СССР: 272 с.
10. Александрова З.В. 2011. Закономерности изменений химических основ биопродуктивности Азовского моря в 2008–2009 гг. В кн.: *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Сборник научных трудов (2008–2009 гг.)*. Ростов н/Д, ФГУП «АзНИИРХ»: 11–28.
11. Александрова З.В. 2012. Многолетняя изменчивость кислородного режима и содержания биогенных веществ в Азовском море. В кн.: *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Сборник научных трудов (2010–2011 гг.)*. Ростов н/Д, ФГУП «АзНИИРХ»: 18–35.
12. Александрова З.В., Баскакова Т.Е., Шевцова Е.А., Долженко С.В. 2014. Основные закономерности развития гипоксии в придонном слое Азовского моря и ее экологические последствия для гидробионтов. В кн.: *Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. Сборник научных трудов (2012–2013 гг.)*. Ростов н/Д, ФГУП «АзНИИРХ»: 11–32.
13. Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д. 1979. *Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря*. М., Пищевая промышленность: 288 с.
14. Бруевич С.В. 1937. *Гидрохимия Среднего и Южного Каспия*. М., изд-во Академии наук СССР: 52 с.
15. Bott T.L., Brock J.T., Cushing C.E., Gregory S.V., King D., Petersen R.C. 1978. A comparison of methods for measuring primary productivity and community respiration in streams. *Hydrobiologia*. 60(1): 3–12. doi: 10.1007/BF00018681
16. Marzolf E.R., Mulholland P.J., Steinman A.D. 1994. Improvements to the diurnal upstream–downstream dissolved oxygen change technique for determining whole-stream metabolism in small streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 51(7): 1591–1599. doi: 10.1139/f94-158
17. Hill V.J., Matrai P.A., Olson E., Suttles S., Steele M., Codispoti L.A., Zimmerman R.C. 2013. Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. In situ and remotely sensed estimates. *Progress in Oceanography*. 110: 107–125. doi: 10.1016/j.pocean.2012.11.005
18. Petrenko D., Pozdnyakov D., Johannessen J., Counillon F., Syrov V. 2013. Satellite-derived multi-year trend in primary production in the Arctic Ocean. *International Journal of Remote Sensing*. 34(11): 3903–3937. doi: 10.1080/01431161.2012.762698
19. Zhai L., Gudmundsson K., Miller P., Peng W., Gujfinnsson H., Debes H., Hátún H., White G.N., Walls R.H., Sathyendranath S., Platt T. 2012. Phytoplankton phenology and production around Iceland and Faroes. *Continental Shelf Research*. 37: 15–25. doi: 10.1016/j.csr.2012.01.013
20. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Dzhenyuk S.L., Smolyar I.V., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhnyi V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tretyakova I.A., Tsygankova A.E., D'yakov N.N., Fomin V.V., Klochkov D.N., Shatonin B.M., Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M., Luchin V.A., Kruts A.A. 2014. *Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013)*. G.G. Matishov, K. Sherman, S. Levitus (eds). NOAA Atlas NESDIS 78: 131 p. doi: 10.7289/V5Q52MK5
21. Matishov G., Matishov D., Gargopa Yu., Dashkevich L., Berdnikov S., Kulygin V., Arkhipova O., Chikin A., Shabas I., Baranova O., Smolyar I. 2008. *Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008*. G. Matishov, S. Levitus (eds). NOAA Atlas NESDIS 65, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office: 148 p.
22. *Государственный контроль качества воды*. 2001. М., Издательство стандартов: 688 с.
23. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Povazhnyy V. 2009. Satellite Estimation of Chlorophyll-a Concentration Using the Red and NIR Bands of MERIS – The Azov Sea Case Study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 6(4): 845–849. doi: 10.1109/LGRS.2009.2026657
24. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S.V., Saprygin V.V., Povazhnyi V.V. 2012. Operational MERIS-based NIR-red algorithms for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters – the Azov Sea case study. *Remote Sens. of Environment*. 121: 118–124. doi: 10.1016/j.rse.2012.01.024
25. Бердников С.В., Сапрыгин В.В., Поважный В.В., Кулыгин В.В., Гительсон А., Мозес В. 2012. Сезонная динамика и пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* в Азовском море в 2008–2010 гг. по данным судовых наблюдений и

- дистанционного зондирования сканером MERIS. В кн.: *Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 58–71.
26. Матишов Г.Г., Поважный В.В., Бердников С.В., Мозес В.Дж., Гительсон А.А. 2010. Оценка концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных. *Доклады Академии наук*. 432(4): 563–566.
 27. Сапрыгин В.В., Кулыгин В.В., Дашкевич Л.В., Бердников С.В. 2016. Пространственно-временное распределение концентрации хлорофилла *a* в Азовском море по данным ДЗЗ. В кн.: *Окружающая среда и человек. Современные проблемы генетики, селекции и биотехнологии. Материалы международной научной конференции и молодежной научной конференции памяти Д.Г. Матишова (Ростов-на-Дону, 5–8 сентября 2016 г.)*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 224–227.
 28. Шавыкин А.А., Бердников С.В., Сапрыгин В.В., Вербицкий Р.Е. 2010. Непрерывные измерения океанологических параметров в приповерхностном слое Таганрогского залива. 1. Определение хлорофилла *a* флуориметрическим методом. *Вестник Южного научного центра*. 6(3): 39–48.
 29. Поважный В.В., Бердников С.В., Пономаренко Е.П., Шишкина А.В. 2012. Связь между концентрацией различных форм фосфора и хлорофилла *a* в Таганрогском заливе Азовского моря в 2008–2010 гг. В кн.: *Экосистемные исследования среды и биоты Азовского бассейна*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 116–124.
 30. Ковалева Г.В. 2011. Многолетние изменения биомассы фитопланктона Азовского моря. В кн.: *Изучение и освоение морских и наземных экосистем в условиях арктического и аридного климата: Материалы Международной научной конференции (Ростов-на-Дону, 6–11 июня 2011 г.)*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 164–166.
 31. Povazhnyy V., Povazhnyy A., Zolotareva A. 2016. Measurements of chlorophyll-A *in vivo* fluorescence and water reflectance by consumer digital cameras for remote sensing data verification. In: *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, SGEM 2016 Conference Proceedings, June 28 – July 6, 2016, Book 2, Vol. 2*: 963–970. doi: 10.5593/SGEM2016/B22/S10.123
- ### REFERENCES
1. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey SSSR. T. V. Azovskoe more. [Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas. Vol. 5. The Sea of Azov]*. 1991. Leningrad, Gidrometeoizdat: 237 p. (In Russian).
 2. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. 2013. Current changes in river water regime in the Don River Basin. *Water Resources*. 40(6): 573–584. doi: 10.1134/S0097807813060043
 3. *Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii. Ezhegodnik 2013. [Quality of surface waters of the Russian Federation. Yearbook 2013]*. 2014. Rostov-on-Don: 568 p. (In Russian).
 4. Sorokina V.V., Kulygin V.V. 2013. Long-term variability of the water transparency (Secchi Depth) in the Sea of Azov. *Oceanology*. 53(3): 287–293. doi: 10.1134/S0001437013030107
 5. Abakumov V.A. 1983. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozheniy. [Guidance on methods for the hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments]*. Leningrad, Gidrometeoizdat: 236 p. (In Russian).
 6. *Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem. [Guide to hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems]*. 1992. St. Petersburg, Gidrometeoizdat: 318 p. (In Russian).
 7. Steemann Nielsen E. 1952. The use of radio-active carbon (C14) for measuring organic production in the sea. *Journal du Conseil*. 18(2): 117–140.
 8. Artem'ev V.E. 1993. *Geokhimiya organicheskogo veshchestva v sisteme reka-more. [Geochemistry of organic matter in the river-sea system]*. Moscow, Nauka: 209 p. (In Russian).
 9. Datsko V.G. 1959. *Organicheskoe veshchestvo v vodakh yuzhnykh morey SSSR. [Organic matter in the waters of the southern seas of the USSR]*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ.: 272 p. (In Russian).
 10. Aleksandrova Z.V. 2011. [Regularities of changes in the chemical basis of the bioproductivity of the Azov Sea in 2008–2009]. In: *Osnovnye problemy rybnogo khozyaystva i okhrany rybokhozyaystvennykh vodoemov Azovo-Chernomorskogo basseyne. [The main problems of fisheries and the protection of fishery water bodies in the Azov-Black Sea basin. Collection of scientific papers (2008–2009)]*. Rostov-on-Don, Azov Sea Research Institute of Fishery: 11–28. (In Russian).
 11. Aleksandrova Z.V. 2012. [Long-term variability of the oxygen regime and nutrient content in the Azov Sea]. In: *Osnovnye problemy rybnogo khozyaystva i okhrany rybokhozyaystvennykh vodoemov Azovo-Chernomorskogo basseyne. [The main problems of fisheries and the protection of fishery water bodies in the Azov-Black Sea basin. Collection of scientific papers (2010–2011)]*. Rostov-on-Don, Azov Sea Research Institute of Fishery: 18–35. (In Russian).
 12. Aleksandrova Z.V., Baskakova T.E., Shevtsova E.A., Dolzhenko S.V. 2014. [The main regularities of the development of hypoxia in the near-bottom layer of the Azov Sea and its ecological consequences for hydrobionts]. In: *Osnovnye problemy rybnogo khozyaystva i okhrany rybokhozyaystvennykh vodoemov Azovo-Chernomorskogo basseyne. [The main problems of fisheries and the protection of fishery water bodies in the Azov-Black Sea basin. Collection of scientific papers (2012–2013)]*. Rostov-on-Don, Azov Sea Research Institute of Fishery: 11–32. (In Russian).
 13. Bronfman A.M., Dubinina V.G., Makarova G.D. 1979. *Gidrologicheskie i gidrokhimicheskie osnovy produktivnosti Azovskogo morya. [Hydrological and hydrochemical basis of productivity of the Sea of Azov]*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost': 288 p. (In Russian).
 14. Bruevich S.V. 1937. *Gidrokimiya Srednego i Yuzhnogo Kaspiya. [Hydrochemistry of the Middle and Southern Caspian]*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ.: 52 p. (In Russian).
 15. Bott T.L., Brock J.T., Cushing C.E., Gregory S.V., King D., Petersen R.C. 1978. A comparison of methods for measuring primary productivity and community respiration in streams. *Hydrobiologia*. 60(1): 3–12. doi: 10.1007/BF00018681
 16. Marzolf E.R., Mulholland P.J., Steinman A.D. 1994. Improvements to the diurnal upstream-downstream dissolved oxygen change technique for determining whole-stream metabolism in small streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 51(7): 1591–1599. doi: 10.1139/f94-158

17. Hill V.J., Matrai P.A., Olson E., Suttles S., Steele M., Codispoti L.A., Zimmerman R.C. 2013. Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. In situ and remotely sensed estimates. *Progress in Oceanography*. 110: 107–125. doi: 10.1016/j.pocean.2012.11.005
18. Petrenko D., Pozdnyakov D., Johannessen J., Counillon F., Sychov V. 2013. Satellite-derived multi-year trend in primary production in the Arctic Ocean. *International Journal of Remote Sensing*. 34(11): 3903–3937. doi: 10.1080/01431161.2012.762698
19. Zhai L., Gudmundsson K., Miller P., Peng W., Gujfinnsson H., Debes H., Hátún H., White G.N., Walls R.H., Sathyendranath S., Platt T. 2012. Phytoplankton phenology and production around Iceland and Faroes. *Continental Shelf Research*. 37: 15–25. doi: 10.1016/j.csr.2012.01.013
20. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Dzhenyuk S.L., Smolyar I.V., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhnyi V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tretyakova I.A., Tsygankova A.E., D'yakov N.N., Fomin V.V., Klochkov D.N., Shatonin B.M., Plotnikov V.V., Vakulskaya N.M., Luchin V.A., Kruts A.A. 2014. *Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013)*. G.G. Matishov, K. Sherman, S. Levitus (eds). NOAA Atlas NESDIS 78: 131 p. doi: 10.7289/V5Q52MK5
21. Matishov G., Matishov D., Gargopa Yu., Dashkevich L., Berdnikov S., Kulygin V., Arkhipova O., Chikin A., Shabas I., Baranova O., Smolyar I. 2008. *Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008*. G. Matishov, S. Levitus (eds). NOAA Atlas NESDIS 65, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office: 148 p.
22. *Gosudarstvennyy kontrol' kachestva vody*. [State water quality control]. 2001. Moscow, Izdatel'stvo standartov: 688 p. (In Russian).
23. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Povazhnyy V. 2009. Satellite Estimation of Chlorophyll-a Concentration Using the Red and NIR Bands of MERIS – The Azov Sea Case Study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 6(4): 845–849. doi: 10.1109/LGRS.2009.2026657
24. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S.V., Saprygin V.V., Povazhnyi V.V. 2012. Operational MERIS-based NIR-red algorithms for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters – the Azov Sea case study. *Remote Sens. of Environment*. 121: 118–124. doi: 10.1016/j.rse.2012.01.024
25. Berdnikov S.V., Saprygin V.V., Povazhnyy V.V., Kulygin V.V., Gitelson A.A., Moses W.J. 2012. [Seasonal dynamics and spatial distribution of chlorophyll a concentration in the Sea of Azov in 2008–2010 according to shipborne observations and remote sensing by the MERIS scanner]. In: *Azovskoe more, Kerchenskiy proliv i predprolivnye zony v Chernom more: problemy upravleniya pribrezhnymi territoriyami dlya obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti i ratsional'nogo prirodopol'zovaniya*. [The Sea of Azov, the Kerch Strait and the preexisting zones in the Black Sea: problems of coastal zone management for ensuring environmental safety and rational nature management]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 58–71. (In Russian).
26. Matishov G.G., Povazhnyi V.V., Berdnikov S.V., Moses W.J., Gitelson A.A. 2010. Satellite estimation of chlorophyll-a concentration and phytoplankton primary production in the Sea of Azov. *Doklady Biological Sciences*. 432(1): 216–219. doi: 10.1134/S0012496610030142
27. Saprygin V.V., Kulygin V.V., Dashkevich L.V., Berdnikov S.V. 2016. [Spatio-temporal distribution of chlorophyll a concentration in the Sea of Azov according to ERS data]. In: *Okruzhayushchaya sreda i chelovek. Sovremennyye problemy genetiki, selektsii i biotekhnologii. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii i molodezhnoy nauchnoy konferentsii pamyati D.G. Matishova*. [Environment and people. Modern problems of genetics, breeding and biotechnology: Materials of the international scientific conference and the youth scientific conference in memory of D.G. Matishov (Rostov-on-Don, Russia, 5–8 September 2016)]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 224–227. (In Russian).
28. Shavykin A.A., Berdnikov S.V., Saprygin V.V., Verbitskiy R.E. 2010. [Continuous measurements of oceanological parameters in near-surface layer of the Taganrog Bay. 1. Chlorophyll a determination using fluorometric method]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 6(3): 39–48. (In Russian).
29. Povazhnyy V.V., Berdnikov S.V., Ponomarenko E.P., Shishkina A.V. 2012. [The relationship between the concentration of various forms of phosphorus and chlorophyll a in the Taganrog Gulf of the Azov Sea in 2008–2010]. In: *Ekosistemnye issledovaniya sredi i bioty Azovskogo basseyna*. [Ecosystem research of the environment and biota of the Azov basin]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 116–124. (In Russian).
30. Kovaleva G.V. 2011. [Long-term changes in the biomass of the Azov Sea phytoplankton]. In: *Izucheniye i osvoeniye morskikh i nazemnykh ekosistem v usloviyakh arkticheskogo i aridnogo klimata: Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. [The study and development of marine and terrestrial ecosystems in arctic and arid climate: Materials of the international scientific conference (Rostov-on-Don, Russia, 6–11 June 2011)]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 164–166. (In Russian).
31. Povazhnyy V., Povazhnyy A., Zolotareva A. 2016. Measurements of chlorophyll-A *in vivo* fluorescence and water reflectance by consumer digital cameras for remote sensing data verification. In: *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, SGEM 2016 Conference Proceedings, June 28 – July 6, 2016, Book 2, Vol. 2*: 963–970. doi: 10.5593/SGEM2016/B22/S10.123

Поступила 14.03.2018