

6.3. ОЦЕНКА ГОДОВОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ АЗОВСКОГО МОРЯ ПО КИСЛОРОДНОМУ МЕТОДУ И ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

С.В. Бердников, Л.В. Дашкевич, В.В. Кулыгин

Аннотация. Работа посвящена оценке годовой валовой первичной продукции фитопланктона по данным дистанционного зондирования и кислородному методу Бруевича – Дацко. Показано, что возможность применения кислородного метода для определения первичной продукции ограничивается целым рядом факторов, что значительно влияет на получаемые оценки. Рассчитана величина первичной продукции в Азовском море по данным спутниковых снимков спектрометра MERIS. Рассмотрены особенности динамики первичной продуцирования за период 2003–2011 гг. Показаны значительные различия оценок, полученных нами по данным дистанционного зондирования, и значений годовой первичной продукции, рассчитанных кислородным методом Бруевича – Дацко.

Ключевые слова: первичная продукция, Азовское море, методика Бруевича – Дацко, данные дистанционного зондирования

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

Существует несколько методик определения ПП, наиболее распространенные из них и применяемые в настоящее время: кислородная и радиougлеродная модификации скляночного метода [Nielsen, 1952; Руководство ... 1983; 1992]. Измерения ПП за весь период наблюдений, выполненные общепринятыми методами, для Азовского моря немногочисленны [Дацко, 1959; Артемьев, 1993]. При этом ежегодно с 1952 г. выполняются оценки ПП для всего моря по оригинальной методике, не применяющейся в широком масштабе ни для одного морского водоема. Метод косвенного определения ПП в высокопродуктивных водоемах был предложен С.В. Бруевичем [Бруевич, 1937] на основе взаимосвязи суточной динамики растворенного кислорода в водоеме и фотосинтеза фитопланктона. Впоследствии он был модифицирован [Дацко, 1959; Бронфман и др., 1979]. В последней модификации этот метод применяется и в настоящее время при определении ПП Азовского моря [Гидрометеорология ... 1991; Александрова, 2011; 2012; Александрова и др., 2014 и др.]. Следует отметить, что данный метод не получил широкого распространения в биоокеанологии и применяется в настоящее время лишь для оценки ПП ручьев и рек [Bott et al., 1978; Marzolf et al., 1994].

Широкое распространение в последние годы получил метод определения ПП по данным дистанционного зондирования Земли из космоса. Такой подход позволяет рассчитывать величину ПП одновременно на больших участках акватории моря и так часто, как появляются релевантные спутниковые данные. В настоящее время разработан большой спектр математических моделей, применяемых для расчета ПП и ориентированных на усвоение спутниковых данных (например, [Копелевич и др., 2006; Лобанова и др., 2015; Демидов и др., 2016; Friedrichs et al., 2009; Lee et al., 2015;]).

Алгоритмы расчета ПП, основанные на спутниковой информации, подразумевают использование поверхностных характеристик вод в качестве входных данных. Для вычисления годовой ПП в Азовском море предложена математическая модель, основанная на величинах концентрации хлорофилла a , и выполнены расчеты по данным снимков спектрометра MERIS за 2008 и 2009 гг. [Бердников и др., 2018].

Недостатки кислородного метода Бруевича – Дацко и ограниченность возможности его применения, а также оценка ПП с применением комплексной технологии анализа спутниковых снимков и результатов исследований *in situ* для Азовского моря рассмотрены в настоящей работе.

Материалы и методы

Основой для проведения реанализа оценок ПП Азовского моря послужили архивные и экспедиционные данные по содержанию растворенного кислорода за период 1913–2016 гг., опубликованные в работах [Climatic Atlas ... 2008; Atlas of Climatic Changes ... 2014]. Общее число океанографических станций с измерениями содержания растворенного кислорода в базе данных (БД) составило 12 479.

В период с апреля 2008 г. по август 2010 г. в ходе 10 морских экспедиций в Азовском море было выполнено 179 определений ПП и концентрации хлорофилла a (КХа). Экспедиционными исследованиями были охвачены все сезоны. Определения ПП выполнялись по кислородной модификации скляночного метода [Руководство ... 1983] при экспонировании воды из поверхностного горизонта в проточной системе на борту судна (123 определения), а также при экспонировании *in situ* на горизонтах, кратных величине глубины белого диска (диска Секки) – (21 определение). Определение КХа и других фотосинтетических пигментов выполнялось спектрофотометрическим методом согласно госстандарту качества воды [Государственный контроль ... 2001].

В июле 2016 г. на всей акватории моря в ходе экспедиции на НИС «Денеб» были выполнены непрерывные измерения прижизненной флуоресценции хлорофилла a и растворенного кислорода в поверхностном горизонте (3600 измерений) проточным флуориметром оригинальной конструкции [Povazhnyy et al., 2016]. Показания флуориметра были пересчитаны в КХа и концентрацию кислорода по калибровочным уравнениям, полученным с использованием стандартных методов [Государственный контроль ... 2001; РД 52.24.419-2005].

Метод Бруевича – Дацко. Для вычисления суточной продукции кислорода (для последующего определения ПП) С.В Бруевичем [Бруевич, 1937] была предложена следующая формула:

$$P_{O_2} = \Delta O_{2H} \cdot \left(\frac{24}{24-n} \right) + \Delta O_2(24H), \quad (1)$$

где P_{O_2} – продукция кислорода за сутки; $\Delta O_{2H} \cdot \left(\frac{24}{24-n} \right)$ – потребление кислорода за сутки, n – продолжительность дня в часах; $\Delta O_2(24H)$ – приращение кислорода за 24 часа от восхода до восхода солнца.

Также было определено следующее соотношение:

$$P_{O_2} = 1.6 \Delta O_{2\text{макс}}, \quad (2)$$

где $\Delta O_{2\text{макс}} = O_{2\text{макс}} - O_{2\text{мин}}$ – разность между максимальным содержанием кислорода в послеполуденные часы и минимальным его содержанием на восходе солнца.

Следует отметить, что С.В. Бруевич для оценки продукции кислорода рассматривал только данные многосуточных наблюдений с судна, стоявшего на якорь, и давал оценку ПП для района наблюдений. Было отмечено, что метод наблюдения над изменением содержания кислорода *in situ* для определения ПП применим лишь тогда, когда процессы перемешивания водных масс практически отсутствуют.

В дальнейшем В.Г. Дацко [Дацко, 1959] упростил данную методику расчета ПП. В частности, было предложено рассчитывать продукцию кислорода по средним минимумам (между 03:00 и 09:00 ч) и максимумам (средние величины нескольких определений между 15:00 и 21:00 ч), а также распространить эту методику для рейсовых наблюдений, выполненных в течение одного месяца, при этом не обязательно на одних и тех же станциях. При расчетах месячной ПП количество благоприятных для фотосинтеза дней в каждом месяце было принято равным: в марте – 18 дней, в апреле – 20, с мая по сентябрь по 25 дней, в октябре – 21 и в ноябре – 16 дней (всего 200 благоприятных для вегетации дней). Объем Азовского моря принимался как 256 км³, при средней глубине 6,8 м. Выделялось 2 слоя воды с различной продуктивностью – по 3,4 м (объем каждого 128 км³). Для верхнего слоя взята величина суточной продукции у поверхности, а для нижнего – на глубине 5 м. Среднее приращение органического углерода на 1 мл растворенного кислорода, по оригинальным данным, полученным В.Г. Дацко, составило около 0,4 мг, эта величина и была принята для пересчета величины продукции в единицы углерода. Для пересчета углерода в органическое вещество, его содержание в последнем принималось равным 50 % [Дацко, 1959].

Окончательная модификация метода Бруевича – Дацко приведена в [Бронфман и др., 1979; Гидрометеорология ... 1991]. В этих работах годовая ПП за 1952–1986 гг. была рассчитана с использованием формулы:

$$ПП = (O_2)_{\text{макс}} K_1 K_2 K_3 V n, \quad (3)$$

где $(\Delta O_2)_{2, \text{ макс}}$ – разность между средней максимальной (с 15:00 до 21:00 ч) и средней минимальной (с 03:00 до 09:00 ч) концентрациями кислорода; K_1 – коэффициент, выражающий соотношение между суточным продуцированием кислорода и его содержанием, равный 1,6; K_2 – среднее приращение содержания органического углерода на 1 мл растворенного кислорода, равное 0,4 мг; K_3 – коэффициент пересчета содержания углерода на содержание органического вещества, равный 2. Объем (V) фотического слоя был принят для Таганрогского залива (ТЗ) равным 25,26 км³ и открытой части Азовского моря – 256 км³; n – число благоприятных для фотосинтеза дней со скоростью ветра, равной либо меньшей 5 м/с. В отличие от методики Дацко [1959], при расчете ПП по формуле (3) использовались данные измерений кислорода в период рейсов, выполнявшихся только в летние месяцы (июль и август), при этом принималось, что полученная оценка составляет 19,4 % от годовой ПП. Здесь необходимо сделать замечание. Из работ [Бронфман и др., 1979; Гидрометеорология ... 1991] не совсем ясно, к чему именно относится эта цифра: к июлю и августу или к двум месяцам сразу. В дальнейшем мы будем считать, что среднее арифметическое месячных значений ПП за июль и август составляет 19,4 % от годовой величины.

Оценка ПП по данным дистанционного зондирования. В основе расчета валовой первичной продукции (ПП) лежит формула (4):

$$PP = n \cdot PP_{\text{day}} = n \cdot \frac{\alpha \cdot Chla \cdot Z_0}{k}, \quad (4)$$

где PP – ПП органического вещества за месяц, гС/м²/месяц; PP_{day} – среднемесячная величина суточной ПП, гС/м²/сут.; n – число дней в месяце; α – ассимиляционное число (АЧ), равное отношению суточной продукции органического вещества в поверхностном слое (г С/м³/сут) к KXa в этом слое (мг/м³); $Chla$ – KXa в поверхностном слое (мг/м³); Z_0 – глубина видимости белого диска (м); k – доля ПП в слое равном одной глубине видимости белого диска от общей ПП в слое фотосинтеза.

Исходными данными для оценки KXa в поверхностном слое являлись снимки спектрометра MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer), работавшего на спутнике ENVISAT в течение 2002–2012 гг. Использовались снимки второго уровня обработки с учетом атмосферной коррекции, предоставленные Европейским космическим агентством [<https://earth.esa.int>] и имеющие пространственное разрешение 300 м. Всего за период 2003–2011 гг. было обработано 762 спутниковых снимка, покрывающих акваторию Азовского моря полностью или частично. Два года (2002 и 2012 гг.) были исключены из оценки годовой ПП, в эти годы отсутствовали снимки для большинства месяцев. Расчеты KXa в Азовском море по снимкам спектрометра MERIS выполнялись при помощи разработанного двухканального алгоритма [Moses et al., 2012; Сапрыгин и др., 2018].

Значения глубины видимости белого диска были получены для всего моря в соответствии с среднемноголетними сезонными картами прозрачно-

сти, построенными на основе БД [Сорокина, Кулыгин, 2013; Atlas of Climatic Changes ... 2014].

Для оценки величины АЧ и параметра k в формуле (4) использованы данные наблюдений *in situ*.

Результаты и обсуждение

Оценка ПП методом Бруевича – Дацко

О суточной динамике кислорода в Азовском море. Следует остановиться на понятии «правильного» суточного хода кислорода, на котором основано определение ПП кислородным методом Бруевича – Дацко. О суточной динамике кислорода в работах В.Г. Дацко сказано, что: «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. В таком море, как Чёрное, где биомасса фитопланктона представлена относительно низкими величинами, влияние гидрометеорологических факторов, искажающих суточные изменения кислорода, настолько велико, что не удастся отметить правильного его хода...» [Дацко, 1959, с. 30].

В связи с немногочисленностью доступных нам данных многосуточных измерений (всего около 50 океанографических станций), было принято решение все имеющиеся данные наблюдений за содержанием кислорода из БД распределить по времени наблюдений (часам) и рассчитать среднегодовое суточный ход в поверхностном фотическом слое Азовского моря (2 м от поверхности) для вегетационного периода с марта по ноябрь (рис. 1). Можно увидеть, что среднегодовое суточный ход получился практически «правильной» формы. Полученные графики среднегодового суточного хода по часам для ТЗ и открытой части моря отличаются незначительно (на 0,1–0,5 мл/л). При этом величина стандартного отклонения в пределах часа для ТЗ 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 во времени и пространстве.

По результатам наших исследований на основе БД [Climatic Atlas ... 2008; Atlas of Climatic Changes ... 2014] минимум содержания кислорода на поверхности в летний период может наблюдаться в любое время суток в зависимости от погодных условий, но чаще в промежутке от полуночи до 8 утра. Максимум также не имеет четкого времени локализации, однако чаще всего приходится на вторую половину дня – с полудня до 21:00; возможен и второй максимум около 10 часов утра.

Выраженных сезонных особенностей в динамике суточного хода кислорода не выявлено. По нашему мнению, характер суточного хода определяется преобладающими погодными условиями в день наблюдений, в частности скоростью ветра, что можно проследить на рисунке 2. Так, при скорости ветра более 6 м/с в поверхностном слое на многосуточных станциях можно наблюдать суточный ход кислорода обратный «правильному».

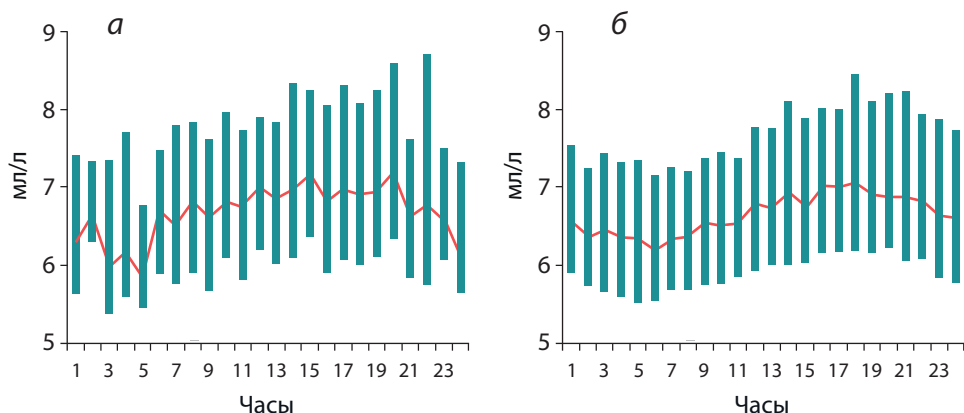


Рис. 1. Среднегодовое содержание растворенного кислорода (мл/л): *а* – в Таганрогском заливе; *б* – в открытой части Азовского моря (медиана, квантиль 25 и 75 %)

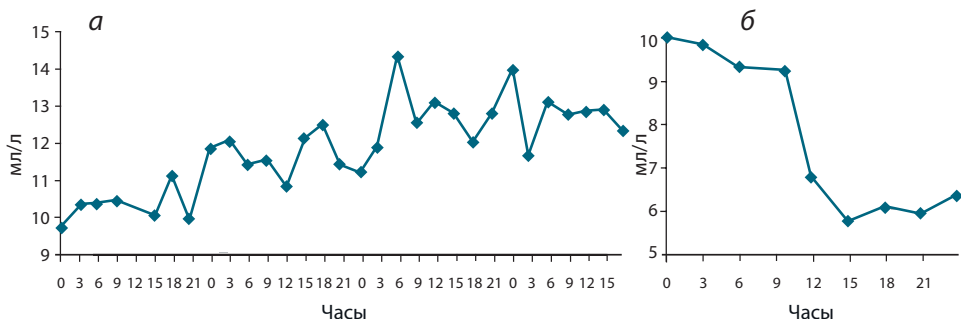


Рис. 2. Содержание кислорода (мл/л) в поверхностном слое Таганрогского залива по наблюдениям на многосуточных станциях при ветре более 6 м/с: *а* – 11–14 октября 1967 г., скорость ветра 9–15 м/с; *б* – 13 сентября 1967 г., скорость ветра 6–10 м/с

О суточной динамике растворенного кислорода, измеряемого по ходу движения судна. Рассмотрим следующее утверждение В.Г. Дацко, положенное в основу модификации кислородной методики С.В. Бруевича: «Наблюдения, которые производятся с неподвижно стоящего судна, дают представление об изменении содержания кислорода на большой акватории моря. 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» [Дацко, 1959, с. 120].

Данное утверждение опровергается данными непрерывных наблюдений ЮНЦ РАН с борта НИС «Денеб» в июле 2016 г., которые показали, что содержание растворенного кислорода в водах Азовского моря в большей степени зависит от распределения «пятен» фитопланктона и погодных условий,

нежели от времени суток. На рисунке 3 приведены суточные непрерывные наблюдения за содержанием растворенного кислорода и КХа по ходу движения судна в водах ТЗ и открытой части Азовского моря. Приведены примеры «правильного» и обратного «правильному» суточного хода.

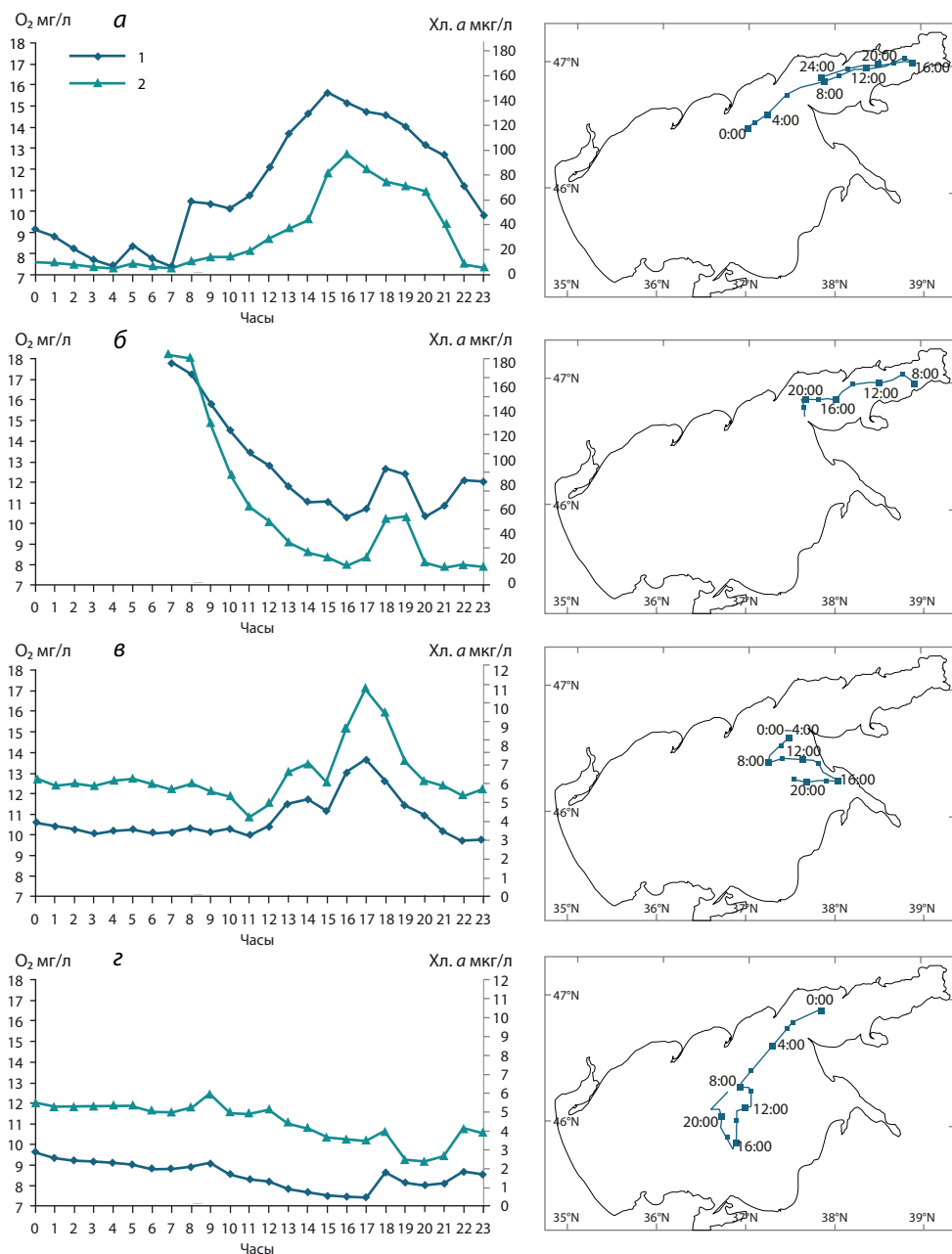


Рис. 3. Содержание растворенного кислорода (1) и КХа (2) в поверхностном слое по данным непрерывных наблюдений с НИС «Денеб» в июле 2016 г.

Так, на рисунке 3а судно следует по направлению увеличения КХа до 16:00, а далее идет в район с более низкой КХа, скорость ветра на протяжении суток в среднем составляет 3,6 м/с. Полученный график соответствует «правильному» суточному ходу распределения растворенного кислорода. Противоположная ситуация представлена на рисунке 3б: судно в течение суток движется по направлению уменьшения содержания КХа, кроме того, отмечается умеренный ветер с порывами до 12 м/с – при этом наблюдается суточный ход кислорода обратный «правильному».

Аналогичную ситуацию можно наблюдать в открытом море. На рисунке 3в экспедиционное судно с начала суток до 16:00 следует из района с более низкими значениями КХа в прибрежные районы моря с более высокими его значениями, а далее возвращается в район с меньшей КХа, 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». На рисунке 3г судно на протяжении суток движется из района с более высоким значением КХа в район с более низким значением КХа, таким образом, мы можем наблюдать обратный «правильному» суточный ход растворенного кислорода. 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 КХа в водах моря.

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

Расчет ПП Азовского моря методом Бруевича – Дацко. В результате проведенных расчетов В.Г. Дацко оценил среднюю годовую ПП, создаваемую фитопланктоном в Азовском море, в 34 млн т органического вещества в сухом весе [Дацко, 1959].

Для сравнения, несколько раньше М.В. Федосов [Федосов, 1955] по средней биомассе фитопланктона с использованием суточного коэффициента обогатимости (Р/В коэффициент), принимая для Азовского моря 250 дней в году, благоприятных для вегетации фитопланктона, оценивал величину ПП в море в целом всего порядка 90 тыс. т/сут или 2,25 млн т/год органического вещества в сухом весе.

Нами по модифицированной методике Бруевича – Дацко (3) была рассчитана суточная ПП для многосуточных станций из БД. Рассматривались два года: 1964 и 1967 гг., – наиболее представительные по станциям с суточными наблюдениями в БД. Для каждого года были получены средние значения суточной продукции в летний период путем осреднения значений ПП на суточ-

ных станциях, приходящихся на июль и август. Годовая ПП по результатам расчетов составила в 1964 и 1967 гг. соответственно 44 и 49 млн т органического вещества в сухом весе. Полученные нами оценки ПП превышают оценки в работах [Бронфман и др., 1979; Гидрометеорология ... 1991] для этих лет соответственно: 36,4 (1964 г.) и 35,7 (1967 г.) млн т органического вещества в сухом весе. Возможно, подобное различие объясняется местоположением большинства имеющихся в нашем распоряжении данных наблюдений на многосуточных станциях в акватории высокопродуктивного Таганрогского залива, что дает завышенную оценку для моря в целом. Это еще раз доказывает важность местоположения станций наблюдений при применении кислородного метода Бруевича – Дацко.

По результатам наших исследований можно сделать вывод, что определение ПП методом Бруевича – Дацко возможно только при ряде условий, изложенных ниже.

Во-первых, тихая (штилевая) погода с волнением не более 1 балла. Так, по данным [Дацко, Семенов, 1959; Цурикова, Шульгина, 1964], при волнении уже в 2–3 балла «правильного» суточного хода не наблюдается. Это подтверждается нашими наблюдениями. Так как штилевые условия в Азовском море чаще всего наблюдаются в летний период [Гидрометеорология ... 1991], то «правильный» суточный ход растворенного кислорода можно наблюдать преимущественно летом. При сильном ветре, в результате перемешивания водных масс динамика содержания кислорода в поверхностном слое становится хаотичной, или даже наблюдается обратный «правильному» суточный ход (см. рис. 2). Причем, начиная с установления маловетреной погоды, кривая распределения вновь принимает «правильный» вид.

Во-вторых, так как «в пространственном отношении степень обогащения вод кислородом коррелируется с биомассой фитопланктона» [Бронфман и др., 1979, с. 187] и в связи с «пятнистостью» распространения фитопланктонных сообществ [Шавыкин и др., 2010], подтвержденных нашими исследованиями, на основе данных дистанционного зондирования [Сапрыгин и др., 2018], суточный ход растворенного кислорода целесообразно наблюдать без изменения местоположения судна в течение суток. При этом экстраполяция полученных оценок на остальную акваторию возможна только при учете известных данных об уровне продуцирования в других районах моря. Поэтому методически неверно использовать такие данные для получения адекватных оценок ПП в водоеме в целом.

В-третьих, «правильный» суточный ход растворенного кислорода можно наблюдать только в поверхностном горизонте. В среднем и тем более придонном горизонтах суточный ход кислорода не соответствует динамике фотосинтеза фитопланктона и имеет совершенно другую форму, что, безусловно, связано с преобладающим влиянием на растворенный кислород в этих слоях процессов деструкции, а также конвективного и ветрового перемешивания.

Данные утверждения основаны на результатах обработки данных многоточных станций из исторической базы данных ЮНЦ РАН и данных натурных наблюдений на судах. Приведенные выше условия ограничивают возможность использования метода Бруевича – Дацко для определения ПП в морском водоеме.

Оценка ПП по данным дистанционного зондирования. Параметрами модели (4) являются величина эффективности утилизации солнечной энергии в столбе воды – АЧ (α) и индекс вертикального распределения ПП (k).

Месячные величины АЧ были рассчитаны по данным экспедиционных наблюдений, когда выполнялись параллельные измерения ПП и КХа (рис. 4). Значения для месяцев, когда параллельные наблюдения отсутствовали, получены в результате интерполяции. В связи с малочисленностью данных, для выполнения расчетов АЧ было задано двенадцатью средними месячными значениями, одинаковыми для всей акватории моря.

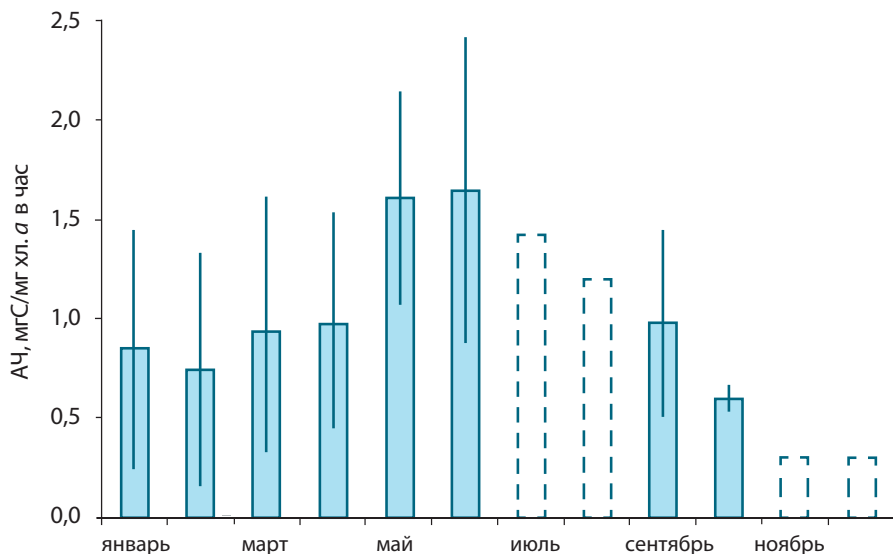


Рис. 4. Сезонный ход АЧ в Азовском море по данным измерений *in situ* в 2008–2009 гг. Столбиком показаны средние значения, линией – стандартное отклонение, пунктиром – оценки для месяцев, в которых измерения отсутствовали

Вертикальное распределение ПП было изучено на 21 станции в водах ТЗ, выполненных в ходе 10 морских экспедиций за период с апреля 2008 г. по август 2010 г. Для обобщения полученных результатов брались не абсолютные глубины, а относительные горизонты, нормированные на глубину белого диска, и относительные значения ПП (рис. 5). Значение ПП на поверхности было принято за 100 %. Максимальные значения ПП (114,32 %) наблюдаются на горизонте, соответствующем 0,5 глубины белого диска. При этом в среднем 55 % органического вещества продуцируется в слое, равном одной глубине

видимости белого диска. Поэтому было принято, что коэффициент $k = 0,5$, т.е. в слое, равном одной глубине видимости белого диска, продуцируется 50 % от общей ПП в столбе воды.

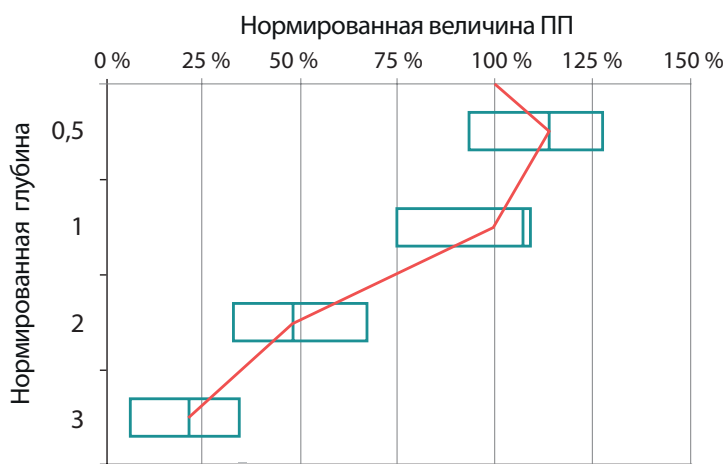


Рис. 5. Нормированное вертикальное распределение суточной ПП (%) в водах ТЗ (среднее, квантиль 25 и 75)

Примечание: по вертикали выполнена нормировка на одну глубину видимости белого диска, по горизонтали на значение суточной ПП на поверхности.

По результатам расчетов были построены сезонные среднемноголетние распределения величин ПП в Азовском море (рис. 6). Максимальные значения ПП во все сезоны года отмечаются в ТЗ, что объясняется его мелководностью, хорошим прогревом и богатством вод питательными веществами, поступающими со стоком р. Дон. Центральная часть моря отличается высокой прозрачностью, слоем фотосинтеза до 4 м [Сорокина, Кулыгин, 2013] и высокими значениями ПП в слое воды. Высокий уровень первичного продуцирования в юго-восточной части моря может быть связан с поступлением черноморских вод и стока р. Кубань.

В многолетней динамике за 2003–2011 гг. наименее продуктивным был 2003 г. с самым холодным весенне-летним периодом за последние 20 лет. Максимум годовой ПП в ТЗ пришелся на жаркий 2010 г. (до 90 гС/м²·месяц в июле), т.к. основу первичной продуктивности в этом районе моря образуют теплолюбивые водоросли и цианопрокариоты. Наибольшая годовая ПП в ОМ была отмечена в 2006 г. (до 75 гС/м²·месяц в сентябре), когда была зарегистрирована минимальная средняя годовая соленость вод за рассматриваемое десятилетие. После чего с ростом солености моря, наблюдающейся до настоящего времени [Дашкевич и др., 2017], отмечается снижение среднегодовой ПП. В среднем за рассматриваемое десятилетие величина годовой ПП для ТЗ составила 314 гС/м²·год, а для ОМ – 236 гС/м²·год. Распределение значений ПП для Азовского моря в целом по годам и месяцам представлено в таблице 1.

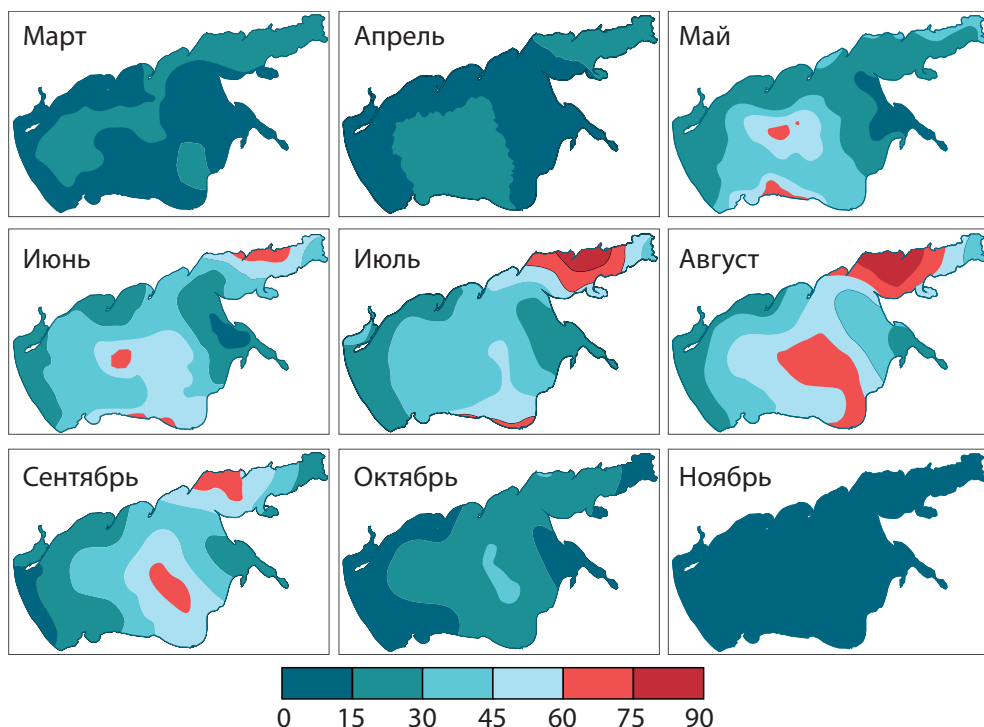


Рис. 6. Распределение ПП ($\text{гС/м}^2\cdot\text{месяц}$) по месяцам по данным MERIS за 2003–2011 гг.

Следует отметить, что использование спутниковых снимков оптического диапазона позволяет оценивать только области моря, свободные от облачности. Из этого следует, что для ПП в данном случае получается некоторая оценка сверху, т.к. в районах под облаками снижается освещенность и процессы фотосинтеза могут идти медленнее.

Также для месяцев с малым числом снимков могут быть получены смещенные оценки ПП. Следует отметить, что оценка ПП летних месяцев в Азовском море достаточно надежна, поскольку обеспечена одним снимком на каждые 2–3 дня.

По модифицированной методике Бруевича – Дацко в работах [Александрова, 2011; 2012; Косенко и др., 2017] ПП Азовского моря за период 2003–2011 гг. оценивалась в среднем в 55 млн т органического вещества в сухом весе в год. Согласно нашим данным, полученным с использованием спутниковой информации, это значение составило 21 млн т/год сухого органического вещества. Таким образом, наши оценки по спутниковым снимкам сравнимы с оценками В.Г. Дацко для 1960-х гг., но в 2–3 раза ниже, чем оценки [Александрова, 2011; 2012; Косенко и др., 2017] для современного периода.

Таблица 1. Месячные ($\text{гС/м}^2 \cdot \text{месяц}$) значения ПП Азовского моря в 2003–2011 гг. и сравнение годовых значений ПП (млн т органического вещества в сухом весе), полученных по спутниковым снимкам (PP_{sat}) и модифицированной методике Бруевича – Дацко ($\text{PP}_{\text{Б-Д}}$) [Александрова, 2011; 2012; Косенко и др., 2017]

Год	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	PP_{sat}		$\text{PP}_{\text{Б-Д}}$
										$\text{гС/м}^2 \cdot \text{год}$	млн т/год	
2003	6	55	27	28	25	28	24	10	4	206	15	45
2004	32	23	27	26	33	49	31	17	8	247	18	38
2005	35	51	29	35	34	48	44	23	6	305	23	49
2006	25	20	61	36	38	52	67	38	13	349	26	70
2007	44	18	32	50	54	73	60	26	14	371	27	55
2008	27	19	38	34	48	48	36	18	8	277	21	62
2009	14	15	37	35	51	49	34	17	12	265	20	68
2010	43	12	37	36	49	51	36	19	8	291	22	49
2011	23	21	31	39	41	45	24	14	7	245	18	57

Было проведено сравнение (рис. 7) наших данных сезонного хода ПП в Азовском море в период с марта по ноябрь с данными работы [Дацко, 1959]. Как можно видеть на графике, в основном данные сопоставимы, за исключением месяца мая, когда наблюдается различие оценок более чем в 2 раза. Вероятно, это связано с особенностями развития фитопланктона в конкретные годы наблюдений.

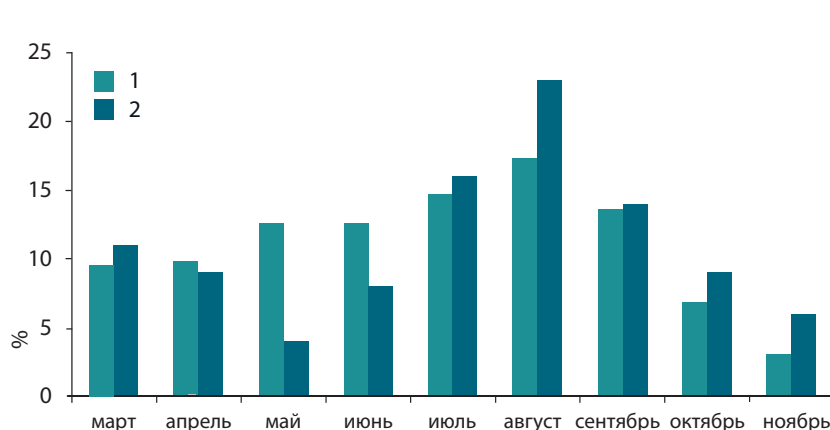


Рис. 7. Сопоставление сезонного хода ПП в Азовском море в период с марта по ноябрь: 1 – наши данные; 2 – данные Дацко [1959]. Период вегетации (март – ноябрь) принят за 100 %

Заключение

Ограничения, накладываемые на применение методики Бруевича – Дацко для расчета годовой ПП экосистемы Азовского моря, требуют переоценки ранее опубликованных представлений о продуктивности моря в целом. Применение современных методов оценки ПП на основе обработки данных спутниковых снимков дает более надежную оценку ПП продукции Азовского моря, чем экстраполяция на всю акваторию моря точечных данных наблюдений за динамикой растворенного кислорода (сильно зависящих от погодных условий и скоплений фитопланктона).

Благодарности

В ходе работ использовалось оборудование ЦКП ЮНЦ РАН «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследования, разработка, апробация)». Авторы благодарят команды НИС «Денеб» и «Профессор Панов», а также участников экспедиций, отбывавших пробы, и сотрудников лаборатории, проводивших их обработку, – В.В. Поважного, В.В. Герасюк, В.В. Саяпина, Е.В. Ермолаеву.

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, госрегистрация проекта № 01201363188; а также государственного задания ЮНЦ РАН в части «Перевозка пассажиров и (или) грузов внутренним водным транспортом при обеспечении проведения научных исследований».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрова З.В. Закономерности изменений химических основ биопродуктивности Азовского моря в 2008–2009 гг. // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: сб. науч. тр. АЗНИИРХ (2008–2009 гг.). Ростов н/Д., 2011. С. 11–28.

Александрова З.В. Многолетняя изменчивость кислородного режима и содержания биогенных веществ в Азовском море // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: сб. науч. тр. АЗНИИРХ (2010–2011 гг.). Ростов н/Д., 2012. С. 18–35.

Александрова З.В., Баскакова Т.Е., Шевцова Е.А., Долженко С.В. Основные закономерности развития гипоксии в придонном слое Азовского моря и ее экологические последствия для гидробионтов // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: сб. науч. тр. АЗНИИРХ (2012–2013 гг.). Ростов н/Д., 2014. С. 11–32.

Артемов В.Е. Геохимия органического вещества в системе река – море. М.: Наука, 1993. 209 с.

Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В., Поважный В.В. Оценка первичной продукции Азовского моря по данным дистанционного зондирования // Наука Юга России (Вестник Южного научного центра). 2018. Т. 14. № 2. С. 55–65. Doi: 10.23885/2500-0640-2018-14-2-55-65.

Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М.: Пищевая пром-сть, 1979. 288 с.

Бруевич С.В. Гидрохимия Среднего и Южного Каспия. М.: Изд-во АН СССР, 1937. 52 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 237 с.

Государственный контроль качества воды. М.: ИПК; Изд-во стандартов, 2001. 688 с.

Дацко В.Г. Органическое вещество в водах южных морей СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 272 с.

Дацко В.Г., Семенов А.Д. Наблюдения над кислородным режимом Азовского моря в 1956 г. и содержанием биогенных элементов в 1955–1956 гг. // Гидрохимические материалы. Т. XXIX. 1959. С. 102–117.

Дашкевич Л.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В. Многолетнее изменение средней солености Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572. Doi: 10.7868/S0321059617040046.

Демидов А.Б., Мошаров С.А., Артемьев В.А., Ступникова А.Н., Симакова У.В., Вазюля С.В. Интегрированные и разрешающие по глубине модели первичной продукции Карского моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 4. С. 563–576.

Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 99–105.

Косенко Ю.В., Барабахин Т.О., Баскакова Т.Е. Динамика гидрохимических характеристик Азовского моря в современный период осолонения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2017. № 3–1. С. 76–82.

Лобанова П.В., Башмачников И.Л., Бротаиш В. Анализ моделей первичной продукции на основе спутниковых данных в северо-восточной части Атлантического океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 114–126.

РД 52.24.419-2005. Массовая концентрация растворенного кислорода в водах. Методика выполнения измерений йодометрическим методом.

Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В.А. Абакумова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 236 с.

Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем // под ред. В.А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.

Сапрыгин В.В., Бердников С.В., Кулыгин В.В., Дашкевич Л.В., Местецкий Л.М. Пространственное распределение и сезонная динамика концентрации хлорофилла *a* в Азовском море по данным спутниковых снимков спектрометра MERIS // Океанология. 2018. Т. 58. № 5. С. 1–12. Doi: 10.1134/S0030157418050131.

Сорокина В.В., Кулыгин В.В. Долговременная изменчивость относительной прозрачности вод Азовского моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 3. С. 324–331.

Федосов М.В. Причины возникновения дефицита кислорода в Азовском море // Тр. ВНИРО. 1955. Т. 31. В. 1. С. 80–94.

Цурикова А.П., Шульгина Е.Ф. Гидрохимия Азовского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 246 с.

Шавыкин А.А., Бердников С.В., Сапрыгин В.В., Вербицкий Р.Е. Непрерывные измерения океанологических параметров в приповерхностном слое Таганрогского залива. 1. Определение хлорофилла *a* флуориметрическим методом // Вестник Южного научного центра. 2010. Т. 6. № 3. С. 37–46.

Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013) / Matishov G.G., Sherman K., Levitus S. (Eds.). NOAA Atlas NESDIS-78. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C., 2014. 131 p.

Bott T.L., Brock J.T., Cushing C.E., Gregory S.V., King D., Petersen R.C. A comparison of methods for measuring primary productivity and community respiration in streams // *Hydrobiologia*. 1978. Vol. 60. № 1. P. 3–12.

Climatic Atlas of the Sea of Azov / Matishov G., Matishov D., Gargopa Yu., Dashkevich L., Berdnikov S., Kulygin V., Archipova O., Chikin A., Shabas I., Baranova O., Smolyar I.; Matishov G., Levitus S. (Eds.). NOAA Atlas NESDIS-65. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C., 2008. 148 p.

European Space Agency. URL: <https://earth.esa.int>

Friedrichs M.A., Carr M.-E., Barber R.T. et al. Assessing the uncertainties of model estimates of primary productivity in the tropical Pacific Ocean // *Journal of Marine Systems*. Vol. 76. Iss. 1–2. 20 February. 2009. P. 113–133. Doi:10.1016/j.jmarsys.2008.05.010.

Lee Y.J., Matrai P.A., Friedrichs M.A.M., Saba V.S., Antoine D., Ardyna M., Asanuma I., Babin M., Bélanger S., Benoît-Gagné M., Devred E., Fernández-Méndez M., Gentili B., Hirawake T., Kang S., Kameda T., Katlein C., Lee S.H., Lee Z., Mélin F., Scardi M., Smyth T.J., Tang S., Turpie K.R., Waters K.J., Westberry T.K. An assessment of phytoplankton primary productivity in the Arctic Ocean from satellite ocean color/in situ chlorophyll-a based models // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015. 120. P. 6508–6541. Doi: 10.1002/2015JC011018.

Marzolf E.R., Mulholland P.J., Steinman A.D. 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*. 1994. Vol. 51. № 7. P. 1591–1599.

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 Sensing of Environment*. 2012. Vol. 121. P. 118–124.

Nielsen E.S. The use of radio-active carbon (C14) for measuring organic production in the sea // *Journal du Conseil*. 1952. Vol. 18. № 2. P. 117–140.

Povazhnyy V., Povazhnyy A., Zolotareva A. Measurements of chlorophyll-a *in vivo* fluorescence and water reflectance by consumer digital cameras for remote sensing data verification // *SGEM-2016. Conf. Proceedings*. 2016. B. 2. Vol. 2. P. 263–270.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бердников Сергей Владимирович – д.г.н., председатель ЮНЦ РАН; berdnikov@ssc-ras.ru

Дашкевич Людмила Владимировна – к.г.н., с.н.с. ЮНЦ РАН; ldashkev@ssc-ras.ru

Кулыгин Валерий Валерьевич – к.т.н., зав. лаб. ЮНЦ РАН; kulygin@ssc-ras.ru