

## Сезонная и многолетняя динамика первичной продукции Азовского моря по данным спектрометра MERIS

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

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН  
Ростов-на-Дону, 344006, Россия  
E-mail: berdnikovsv@yandex.ru

Работа посвящена исследованию уровня первичного продуцирования в Азовском море по данным спутниковых снимков спектрометра MERIS (за всё время его работы). Описывается методика расчёта первичной продукции (ПП) с помощью разработанной математической модели, входными параметрами которой являются величины содержания концентрации хлорофилла *a* в поверхностном слое и прозрачности (глубина видимости белого диска). Для оценки концентрации хлорофилла *a* в Азовском море по спутниковым снимкам использовался региональный алгоритм для высокопродуктивных водоёмов. Прозрачность определялась на основе стандартного продукта обработки снимков MERIS — концентрации общего взвешенного вещества — и эмпирической зависимости между прозрачностью и взвесью. Впервые представлено среднегодовое и среднемноголетнее сезонное пространственное распределение ПП для всей акватории Азовского моря в современный период. Рассмотрены особенности динамики первичного продуцирования за период 2003–2011 гг. Отмечено, что начиная с 2006 г. наиболее продуктивные зоны смещаются в центральную часть Таганрогского залива. Представлены средние сезонные оценки первичной продукции по районам моря. Средняя за рассматриваемое десятилетие величина годовой первичной продукции (с марта по ноябрь) для Азовского моря составила  $247 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ .

**Ключевые слова:** первичная продукция, Азовское море, спутниковые снимки, спектрометр MERIS

Одобрена к печати: 18.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-173-185

### Введение

Морская первичная продукция (ПП) — наиболее изменчивая компонента глобального углеродного цикла, двигатель основных биогеохимических циклов в океане. С экологической точки зрения ПП определяет верхнюю границу всех основных трофических уровней и в целом основу стабильности промышленного рыболовства и аквакультуры. Оценки ПП имеют большое значение для понимания последствий изменения климата для фитопланктона и морских экосистем в целом.

Первичная продукция имеет высокую пространственную и временную изменчивость. На помощь экспедиционным исследованиям, в которых ПП измеряется *in situ*, пришли новые технологии, основанные на данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

В настоящее время разработан большой спектр математических моделей, применяемых для расчёта ПП и ориентированных на усвоение спутниковых данных (см., например, работы (Демидов и др., 2016; Лобанова и др., 2015; Копелевич и др., 2006; Friedrichs et al., 2009; Lee et al., 2015)).

Алгоритмы расчёта ПП, основанные на спутниковой информации, подразумевают использование поверхностных характеристик вод в качестве входных данных. Среди различных алгоритмов, разработанных для этих целей, можно выделить группу моделей, основанных на величинах концентрации хлорофилла *a* (хл-*a*) и ассимиляционного числа (АЧ). Качество подобных моделей во многом зависит от данных, на основе которых оцениваются их параметры. Поэтому необходимо, чтобы спутниковые модели учитывали региональные особенности процессов первичного продуцирования.

В период 2008–2009 гг. для снимков спектрометра MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), работавшего на спутнике ENVISAT в течение 2002–2012 гг., разработан алгоритм оценки концентрации хл-*a* в Азовском море, водные массы которого по оптическим свойствам относят ко II типу (Moses et al., 2009). В дальнейшем этот алгоритм уточнялся на основе данных экспедиционных наблюдений за концентрацией хл-*a* (Moses et al., 2012). С учётом измерений ПП *in situ* предложена эмпирическая формула для её расчёта в зависимости от концентрации хл-*a* в поверхностном слое (Матишов и др., 2010). В период 2010–2018 гг. усилия были направлены на параллельные измерения *in situ* ПП и концентрации хл-*a* в ходе экспедиционных исследований для оценки сезонной изменчивости АЧ и применение разработанных алгоритмов для расчёта пространственно-временной изменчивости концентрации хл-*a* (Сапрыгин и др., 2018).

Для вычисления годовой ПП в Азовском море предложена математическая модель, основанная на величинах концентрации хл-*a* и АЧ, и выполнены её расчёты по данным снимков спектрометра MERIS за 2008 и 2009 гг. (Бердников и др., 2018).

Целью настоящей работы являлось исследование сезонной и многолетней динамики ПП Азовского моря по данным архива спутниковых снимков за весь период работы спектрометра MERIS с использованием разработанной модели.

## Материалы и методы

Интегрированная по глубине модель ПП Азовского моря (1) включает средние величины эффективности утилизации солнечной энергии в столбе воды — АЧ ( $\alpha$ ) и индекс вертикального распределения ПП ( $k$ ) в качестве коэффициентов модели. Входными параметрами являются величины содержания концентрации хл-*a* в поверхностном слое и глубина видимости белого диска ( $Z_6$ ).

$$PP = n \cdot PP_{day} = n \frac{\alpha \cdot Chla \cdot Z_6}{k}, \quad (1)$$

где  $PP$  — ПП органического вещества (ОВ) за месяц ( $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мес}^{-1}$ );  $PP_{day}$  — среднемесячная величина суточной ПП ( $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ );  $n$  — число дней в месяце;  $\alpha$  — АЧ, равное отношению суточной продукции органического вещества в поверхностном слое ( $\text{гС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$ ) к концентрации хл-*a* в этом слое ( $\text{мг}/\text{м}^3$ );  $Chla$  — среднемесячная концентрации хл-*a* в поверхностном слое ( $\text{мг}/\text{м}^3$ );  $Z_6$  — среднемесячная глубина видимости белого диска (м);  $k$  — доля ПП в слое, равном  $1 Z_6$  от общей ПП в слое фотосинтеза.

Исходными данными для оценки концентрации хл-*a* являются снимки спектрометра MERIS второго уровня обработки с учётом атмосферной коррекции, предоставленные Европейским космическим агентством (ESA) и имеющие пространственное разрешение 300 м (<https://earth.esa.int>).

Для оценки концентрации хл-*a* отбирались снимки, содержащие изображение не менее 10 % свободной от облачности акватории моря. Большинство таких снимков приходится на летний сезон (табл. 1). В связи с небольшим числом зимних изображений с требуемыми характеристиками рассматривался период с марта по ноябрь. Поскольку не все месяцы в 2002 и 2012 гг. обеспечены снимками, то расчёт годовой и сезонной ПП выполнен для 2003–2011 гг.

Расчёты концентрации хл-*a* ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в Азовском море по снимкам спектрометра MERIS выполнялись при помощи разработанного двухканального алгоритма (Moses et al., 2012):

$$Chla = 61,324 \left[ R_{rs}^{-1}(665) \cdot R_{rs}(708) \right] - 37,94, \quad (2)$$

где  $R_{rs}(665)$  — коэффициент спектральной яркости около максимума поглощения хл-*a* в красном диапазоне спектра на 665 нм (7-й канал MERIS), а  $R_{rs}(708)$  — коэффициент спектральной яркости на длине волны 708 нм (9-й канал MERIS).

Таблица 1. Количество снимков MERIS, содержащих изображение не менее 10 % акватории Азовского моря (свободной от облачности), по месяцам

Год	Месяцы												Всего
	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Ноябрь	Дек.	
2002	—	—	—	—	—	—	1	—	—	1	1	1	4
2003	—	—	1	3	3	7	4	4	8	4	2	1	37
2004	1	2	5	10	12	6	14	11	11	3	4	2	81
2005	3	2	9	7	10	14	11	20	14	8	4	2	104
2006	—	—	7	9	11	15	13	18	7	8	1	1	90
2007	—	7	11	9	13	11	12	14	8	9	2	—	96
2008	—	3	3	4	10	12	14	16	9	9	5	2	87
2009	—	3	2	12	9	14	14	13	11	7	2	1	88
2010	—	2	6	8	9	11	13	15	5	6	3	1	79
2011	2	4	4	9	7	12	14	13	9	4	6	2	86
2012	3	—	5	2	—	—	—	—	—	—	—	—	10
Всего	9	23	53	73	84	102	110	124	82	59	30	13	762

В работе (Бердников и др., 2018) использовались среднемноголетние сезонные карты прозрачности вод Азовского моря, построенные на основе базы данных ЮНЦ РАН (по  $Z_6$ ) (Сорокина, Кулыгин, 2013; Matishov et al., 2014). В настоящем исследовании для сравнения оценок ПП прозрачность также определялась на основе стандартного продукта обработки снимков MERIS — концентрации общего взвешенного вещества (мг/л) (MERIS..., 2011).

Анализ данных стандартного продукта MERIS показал систематическое занижение значений концентрации общего взвешенного вещества в среднем в два раза ( $N = 82$ ) (рис. 1а). На основе этого отношения полученное значение было использовано как поправочный коэффициент для концентрации взвешенного вещества по MERIS. После внесения поправки коэффициент детерминации при сравнении измеренных и расчётных величин составил  $R^2 = 0,6$  ( $N = 82$ ) для измерений в диапазоне от 2 до 100 мг/л.

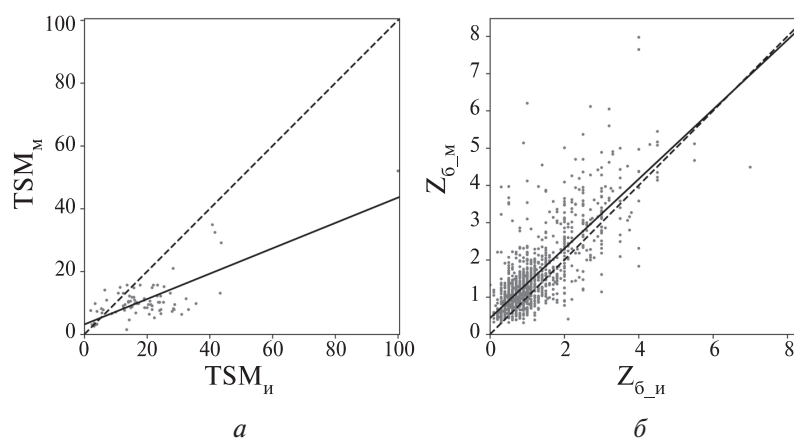


Рис. 1. Сравнение измеренных (и) и рассчитанных (м) величин: а — концентрация общего взвешенного вещества (мг/л),  $TSM_m = 0,4 TSM_i + 3,1$ ,  $R^2 = 0,55$ ,  $N = 82$ ; б —  $Z_6$  (м),  $Z_{6\_м} = 0,93Z_{6\_и} + 0,43$ ,  $R^2 = 0,61$ ,  $N = 1406$ . Пунктиром указана линия 1:1

Для расчёта  $Z_6$  была использована зависимость (3), установленная по результатам экспедиционных исследований ( $R^2 = 0,81$ ;  $N = 174$ ) для диапазона изменчивости концентрации взвешенного вещества от 0,6 до 145 мг/л (Кушнир, Бердников, 2012):

$$Z_6 = 8,2 TSM^{-0,82}, \tag{3}$$

где TSM — концентрация суммарного взвешенного вещества в поверхностном горизонте (0–0,3 м), мг/л.

Сравнение величин  $Z_6$ , рассчитанных по формуле (3) на основе спутниковых данных по концентрации взвешенного вещества, с натурными измерениями (рис. 1б) дало уравнение регрессии с коэффициентом  $a = 0,93$  ( $R^2 = 0,61$ ,  $N = 1406$ ).

Месячные величины АЧ были рассчитаны по данным экспедиционных наблюдений, когда выполнялись параллельные измерения ПП и концентрации хл-*a* (Бердников и др., 2018). В связи с малочисленностью этих данных АЧ в модели было задано двенадцатью средними месячными значениями, одинаковыми для всей акватории моря. Таким образом, параметр  $\alpha$  (АЧ) интегрирует в себе изменчивость таких факторов, как видовой состав фитопланктона и условия среды (фотосинтетически активная радиация (ФАР), температура воды, обеспеченность биогенным питанием и т. д.). В некоторых исследованиях эти зависимости параметризуют в явном виде (например, в работе (Заика, Макарова, 1982) АЧ зависит от температуры воды и ФАР). Или в уравнении модели выделяют какую-то переменную, заменяя АЧ новым параметром (так, в исследовании (Демидов и др., 2016) вводится параметр  $\psi$ , равный отношению АЧ к величине ФАР, а само значение ФАР рассматривается как переменная модели). Построение подобных эмпирических зависимостей требует большого числа наблюдений, которые чаще всего отсутствуют, и получаемые регрессионные уравнения имеют ограниченное применение. Поскольку в настоящей работе рассматривается оценка ПП на уровне месячных значений, используемый график сезонной динамики АЧ (Бердников и др., 2018) отражает комплексное влияние указанных выше факторов, в первую очередь — сезонного хода ФАР.

В результате исследования вертикального распределения ПП в водах Таганрогского залива (ТЗ) было получено, что в среднем 55 % ОВ продуцируется в слое, равном  $1 Z_6$  (Ермолаева, 2012). Поэтому в модели значение коэффициента  $k$  было принято равным 0,5, т. е. в слое, равном  $1 Z_6$ , продуцируется 50 % от общей ПП в столбе воды.

На предварительном этапе обработки снимков была выполнена процедура отбраковки пикселей, аналогичная представленной в работе (Сапрыгин и др., 2018). В настоящем исследовании дополнительно исключались пиксели, относящиеся к глубинам менее 1 м (прибрежная зона), где величины концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным могут давать ошибочные значения.

Процедура подготовки данных для проведения пространственно-временного анализа состояла из следующих этапов:

1. Пространственная агрегация растровых изображений со значениями концентрации хл-*a* и общего взвешенного вещества. Она заключалась в интерполяции значений спутниковых снимков в узлы регулярной сетки с разрешением 10 км (рис. 2, см. с. 177). Рассчитывалось среднее значение всех пикселей, попавших в ячейку регулярной сетки.
2. Временная агрегация регулярных сеток со значениями концентрации хл-*a* и общего взвешенного вещества. Она заключалась в расчёте средних величин для каждого месяца каждого года как средних арифметических значений всех регулярных сеток, приходящихся на конкретный месяц. Каждый узел сетки при этом рассматривался независимо от соседних.
3. Расчёт величины прозрачности по формуле (3).
4. Расчёт среднемесячной величины суточной ПП и величины месячной ПП для каждого месяца каждого года по формуле (1).
5. Расчёт сезонного и межгодового хода ПП:
  - суммирование месячных полей конкретного года для оценки годовой величины ПП;
  - вычисление среднего значения месячных полей за разные годы для получения среднемноголетнего месячного значения.

Для представления результатов все узлы регулярной сетки были распределены по 9 районам согласно схеме районирования (см. рис. 2), которая является упрощённой версией

классического районирования Азовского моря (Гидрометеорологический..., 1962). Границы районов ТЗ, а также Темрюкского, Прикерченского и центрального районов открытой части моря (ОМ) оставлены без изменений. При этом были выделены районы: северный (три северных района ОМ объединены в район 4), западный (два западных района ОМ объединены в район 3) и восточный (два восточных района ОМ объединены в район 5) (см. рис. 2). Такие изменения обусловлены общностью гидрометеорологических условий для развития фитопланктона в выделенных районах (Дашкевич, 2008; Matishov et al., 2008). Более подробно районирование Азовского моря обсуждается в работе (Дашкевич и др., 2017).

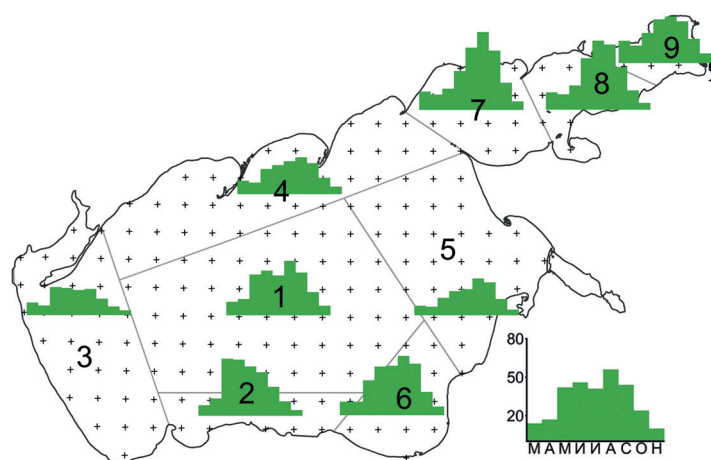


Рис. 2. Схема районирования Азовского моря и сезонная изменчивость средних значений ПП ( $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мес}^{-1}$ ) по районам за 2003–2011 гг. (в легенде по горизонтальной оси указаны заглавные буквы названий месяцев с марта по ноябрь). Символом «+» обозначены узлы регулярной сетки. Цифрами указаны номера районов

Значение ПП в регионе определялось как среднее арифметическое всех входящих в него узлов сетки. Затем рассчитывались средневзвешенные значения с учётом площадей районов для ТЗ (районы 7–9) и ОМ (районы 1–6), а после — в целом по морю как средневзвешенное значение ТЗ и ОМ с учётом их площадей.

## Результаты и обсуждение

По результатам расчётов были построены месячные (рис. 2, 3, см. с. 178) и годовые (рис. 4, см. с. 178) распределения величин ПП в Азовском море.

Максимальные значения ПП во все сезоны года отмечаются в ТЗ (см. рис. 2), что объясняется его мелководностью, хорошим прогревом и богатством вод питательными веществами, поступающими со стоком р. Дон. Центральный район ОМ (№ 1) отличается высокой прозрачностью, слоем фотосинтеза до 4 м (Сорокина, Кулыгин, 2013) и высокими значениями ПП в столбе воды. Для районов 2 и 6 ОМ высокий уровень первичного продуцирования может быть связан с поступлением черноморских вод и стока р. Кубань соответственно.

По данным спутниковых съёмок в акватории Азовского моря за 2003–2011 гг. можно выделить два ежегодно повторяющихся пика в развитии фитопланктона: весенний и летне-осенний (Сапрыгин и др., 2018). Их продолжительность и сроки наступления в зависимости от районов моря различны. Весенний пик соответствует массовому развитию диатомового комплекса фитопланктона, его начало и продолжительность зависит от ледовой обстановки и температурных условий предшествующей зимы (Студеникина и др., 1999). Согласно данным спутниковых наблюдений, в ТЗ и 4-м районе весенний максимум продуцирования наблюдается обычно на месяц позже, чем в ОМ; вероятно, это связано с более поздним прогревом поверхностного слоя и сходом льда в северной части Азовского моря (см. рис. 3).

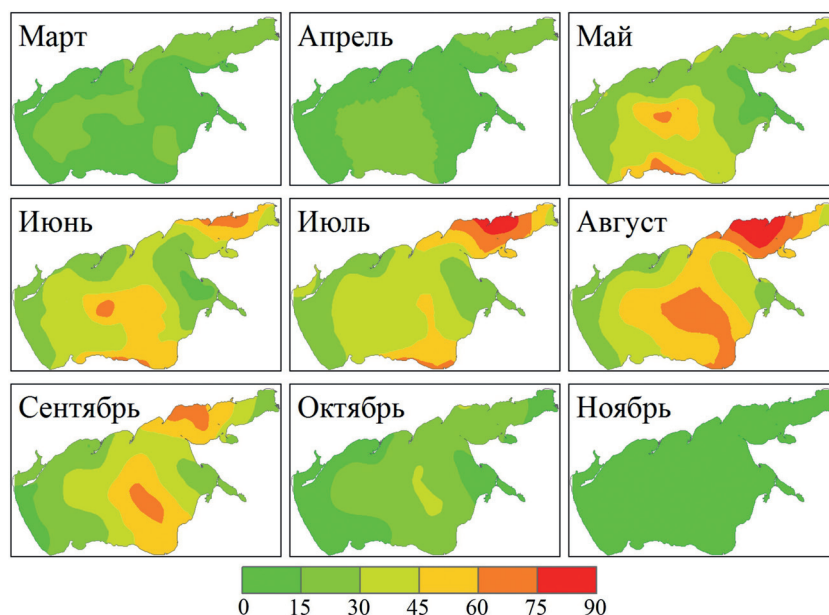


Рис. 3. Распределение ПП ( $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мес}^{-1}$ ) по месяцам по данным MERIS за 2003–2011 гг.

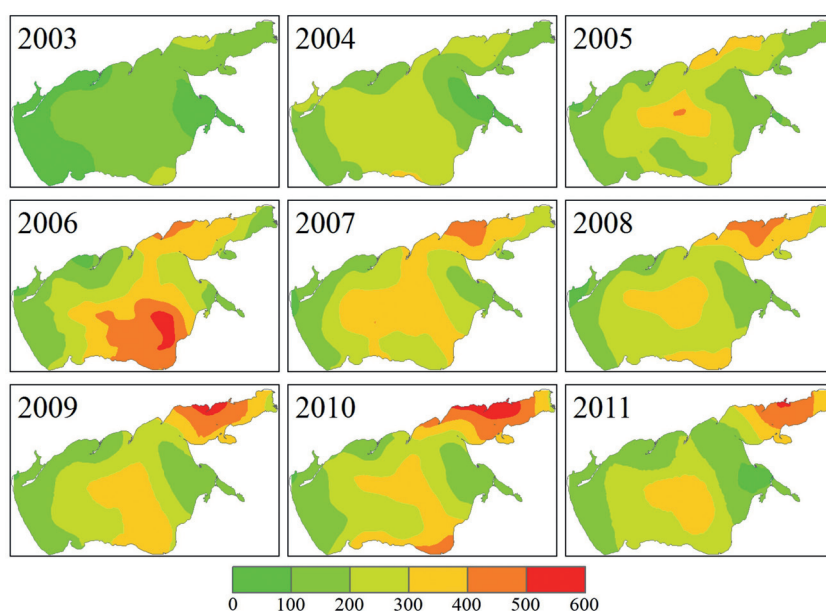


Рис. 4. Распределение ПП ( $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ) за период 2003–2011 гг. по данным MERIS

Концентрация хл-*a* в морских водах в разных районах начинает расти в феврале — начале апреля, после чего по мере прогрева водной толщи и завершения развития ранневесеннего комплекса фитопланктона достигает минимальных значений в конце апреля—июне (Сапрыгин и др., 2018). Второй пик развития фитопланктонного сообщества Азовского моря, связанный с бурным ростом теплолюбивых видов и цветением цианопрокариот (Студеникина и др., 1999), наблюдается в августе—сентябре практически одновременно в ТЗ и ОМ (Сапрыгин и др., 2018).

Максимум первичного продуцирования в Азовском море в целом приходится на август (в отдельные годы в ТЗ он может смещаться на июль, а в ОМ — на сентябрь). Практически ежегодно в это время отмечается так называемое «цветение» моря, особенно выраженное в мелководном ТЗ. По оценкам на основе спутниковых снимков MERIS за 2003–2011 гг., в современный период летне-осенний интервал развития фитопланктона продолжительнее

весеннего и характеризуется более высокими значениями концентрации хл-*a* на всей акватории моря (Сапрыгин, 2011; Сапрыгин и др., 2018).

В ОМ продолжительность годового цикла развития фитопланктона больше, чем в ТЗ, так как его акватория позднее покрывается льдом. Минимальные значения ПП за период март–ноябрь отмечаются в начале весны и в конце осени. Долгое время считалось, что в зимний период подо льдом фитопланктон в Азовском море практически не развивается (Студеникина и др., 1999). Позднее в результате ледокольных рейсов были получены новые данные (Матишов и др., 2007, 2012) о достаточно активной вегетации фитопланктона зимой, в том числе отмечено даже «цветение» льда, связанное с массовым развитием диатомовых водорослей (Ковалева и др., 2014). Исследования распределения концентрации хл-*a* по ДДЗ и подспутниковым наблюдениям, выполненные на акватории, свободной ото льда, подтвердили высокую численность микроводорослей в Азовском море зимой (Сапрыгин, 2011). Следует отметить, что пока ещё очень мало данных исследований в холодный сезон, для того чтобы давать состоятельные оценки доли ПП в общей годовой величине. А высокие значения облачности в регионе зимой и ледовый покров (Дашкевич и др., 2016) не позволяют полноценно оценить по спутниковым снимкам зимнюю ПП водоёма в целом.

В многолетней динамике за 2003–2011 гг. (см. *рис. 4*) наименее продуктивным (и в ТЗ, и в ОМ) был 2003 г. с самым холодным весенне-летним периодом за последние 20 лет. Максимум годовой ПП в ТЗ пришёлся на жаркий 2010 г. (до  $110 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мес}^{-1}$  в июле), так как основу первичной продуктивности в этом районе моря образуют теплолюбивые водоросли и цианопрокариоты. Наибольшая годовая ПП в ОМ отмечена в 2006 г. (до  $63 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мес}^{-1}$  в сентябре), когда была зарегистрирована минимальная средняя годовая солёность вод за рассматриваемое десятилетие. После чего с ростом солёности моря, наблюдающейся до настоящего времени (Дашкевич и др., 2017), отмечается снижение среднегодовой ПП. В среднем за рассматриваемое десятилетие величина годовой ПП для ТЗ составила  $314 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ , а для ОМ —  $236 \text{ гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ . Распределение значений ПП для Азовского моря в целом по годам и месяцам представлено в *табл. 2*.

*Таблица 2.* Месячные ( $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мес}^{-1}$ ) значения ПП Азовского моря в 2003–2011 гг. и сравнение годовых значений ПП ( $\text{гС}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ), полученных по среднемноголетним сезонным картам  $Z_6$  ( $PP_{Zd\ mean}$ ) и  $Z_6$ , пересчитанной по концентрации взвеси ( $PP_{Zd\ TSM}$ )

Год	Месяцы									$PP_{Zd\ TSM}$	$PP_{Zd\ mean}$	$PP_{Zd\ TSM} - PP_{Zd\ mean}$
	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Ноябрь			
2003	8*	14	24*	27	26	22	24	9	3*	157	206	-49
2004	12	9	19	37	33	45	31	14	9	209	247	-38
2005	13	19	37	34	28	40	39	16	4	229	305	-77
2006	14	20	35	44	31	52	60	33	11	301	349	-47
2007	15	14	27	36	49	62	46	27	5	280	371	-91
2008	16	13	31	40	43	50	39	22	6	258	277	-19
2009	10*	9	43	38	50	53	29	22	16	270	265	6
2010	18	12	40	37	55	59	35	12	10	278	291	-13
2011	11	13	31	55	45	43	27	11	5	242	245	-3

\* Месяцы, для которых отсутствовало значение ПП хотя бы в одном из девяти районов моря.

Поскольку при расчётах величин ПП для каждого месяца каждого года выполнялась агрегация на уровне районов моря (см. *рис. 2*), обоснованными могут считаться значения для тех месяцев, когда покрытие спутниковых снимков обеспечивает присутствие значений в каждом из девяти районов. Месяцев, когда отсутствовали значения хотя бы в одном районе, за период 2003–2011 гг. всего четыре: март 2003 г. (районы 1, 2, 3), май 2003 г. (район 6), ноябрь 2003 г. (районы 8, 9) и март 2009 г. (район 6). В связи с чем оценка годовой ПП для 2003 г. является заниженной, так как в трёх из девяти рассматриваемых месяцев спутниковые

снимки не обеспечивали полного покрытия моря. Однако можно предположить, что занижена она ненамного, поскольку случаи неполного охвата моря пришлось на малопродуктивные месяцы.

Погрешность расчёта ПП складывается из ошибок параметров и переменных модели (1). Использование среднемесячных величин компенсирует эти ошибки, и погрешность расчёта начинает определяться диапазоном естественной изменчивости параметров в районах по месяцам. Изменчивость концентрации хл-*a* по сезонам и районам Азовского моря как по данным наблюдений, так и по оценкам на основе спутниковых снимков MERIS представлена в работе (Сапрыгин и др., 2018).

Для сравнения двух методов расчёта величин  $Z_6$  и их влияния на итоговую оценку ПП в табл. 2 приведена разность годовых оценок. Использование среднееголетних сезонных карт  $Z_6$  даёт более высокие годовые значения ПП. Максимальная разница между расчётами (около 25 %) приходится на 2003, 2005, 2007 гг. В 2004 и 2006 гг. разница составила порядка 15 %, после 2008 г. — от 1 до 7 % (не более  $20 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ). Основное различие приходится на весенние месяцы (в среднем 65 % от годовой разницы) и связано с высокими значениями  $Z_6$  на среднееголетних картах в ОМ.

Однако наибольшую неопределённость в оценку ПП по формуле (1) вносит параметр  $\alpha$ . Вариация АЧ по данным наблюдений (Бердников и др., 2018) в холодное время года достаточно велика (январь — март,  $cv = 74 \%$ ) и снижается для месяцев активной вегетации (апрель — октябрь,  $cv = 40 \%$ ). Снижение неопределённости возможно за счёт уточнения зависимости АЧ от разных факторов при получении большего числа данных измерений.

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, так как в районах под облаками снижается освещённость и процессы фотосинтеза могут идти медленнее.

Также для месяцев с малым числом снимков могут быть получены смещённые оценки ПП. Из табл. 1 следует, что оценка ПП летних месяцев в Азовском море достаточно надёжна, поскольку обеспечена одним снимком на каждые 2–3 дня.

## Заключение

Данные спутников в сравнении с экспедиционными измерениями при определении продуктивности водоёма позволяют получить более детальную картину для всего моря одновременно с гораздо большей регулярностью наблюдений. По данным снимков спектрометра MERIS с использованием предложенной модели расчёта ПП впервые были построены среднегодовые и сезонные среднееголетние пространственные распределения для всей акватории Азовского моря в современный период. Отмечено, что начиная с 2006 г. наиболее продуктивные зоны смещаются в центральную часть Таганрогского залива.

Сравнение оценок ПП, полученных с применением двух методов расчёта величин  $Z_6$ , показало, что использование среднееголетних сезонных карт  $Z_6$  даёт более высокие годовые значения ПП, чем применение для оценки  $Z_6$  стандартного продукта MERIS по концентрации взвешенного вещества. Разница между расчётами в годовых величинах ПП изменится от 1 до 25 %.

Несмотря на то что спектрометр MERIS завершил свою работу в 2012 г., многолетний ряд ПП, рассчитанный по предлагаемой методике, может быть продолжен благодаря спутникам Sentinel-3 Европейского космического агентства (ESA). В состав их оборудования входит инструмент OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) — аналог спектрометра MERIS. Число спектральных каналов в OLCI увеличено с 15 до 21, конструкция прибора оптимизирована для минимизации влияния солнечных лучей, пространственное разрешение соответствует снимкам MERIS — 300 м. Относительно недавно стали доступны снимки второго уровня обработки с учётом атмосферной коррекции. Для OLCI предложена формула оценки концентрации хл-*a* (Moses et al., 2019) по данным наблюдений *in situ* в Азовском море в 2016–2018 гг.



На основе представленной в данной статье методики региональной оценки ПП для Азовского моря после завершения валидации алгоритма определения концентрации хл-*a* по снимкам OLCI второго уровня обработки можно будет продолжить работу по изучению продуктивности водоёма в современный период.

Исследование выполнено в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 01201363188; часть работы, связанная с выполнением расчётов и подготовкой карт, выполнена В. В. Кулыгиным при поддержке РФФИ (№ 16-35-60043 мол\_а\_дк).

## Литература

1. Бердников С. В., Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В., Поважный В. В. Оценка первичной продукции Азовского моря по данным дистанционного зондирования // Наука Юга России. 2018. Т. 14. № 2. С. 55–65. DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-2-55-65.
2. Гидрометеорологический справочник Азовского моря / под ред. Аксенова А. А. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1962. 856 с.
3. Дашкевич Л. В. Анализ многолетней изменчивости температурного режима вод открытой части Азовского моря с использованием геоинформационных технологий и математического моделирования: дис. ... канд. геогр. наук. Ростов н/Д, 2008. 212 с.
4. Дашкевич Л. В., Немцева Л. Д., Бердников С. В. Оценка ледовитости Азовского моря в XXI веке по спутниковым снимкам Terra/Aqua MODIS и результатам математического моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13 № 5. С. 91–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-91-100.
5. Дашкевич Л. В., Бердников С. В., Кулыгин В. В. Многолетнее изменение средней солёности Азовского моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 563–572. DOI: 10.7868/S0321059617040046.
6. 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.
7. Ермолаева Е. В. Распределение и сезонная динамика продукции и деструкции органического вещества в Азовском море в 2008–2010 гг. // Экосистемные исследования среды и биоты Азовского бассейна / отв. ред. Д. Г. Матишов. Ростов н/Д: Южный науч. центр РАН, 2012. С. 131–139.
8. Заика В. Е., Макарова Н. П. К определению первичной продукции по содержанию хлорофилла в море // Экология моря. Киев: Наукова думка, 1982. Вып. 11. С. 9–15.
9. Ковалева Г. В., Поважный В. В., Золотарева А. Е., Макаревич П. Р., Матишов Д. Г. Ледовое сообщество микроводорослей в Таганрогском заливе Азовского моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 659–664. DOI: 10.7868/S0030157414050086.
10. 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.
11. Кушнир В. М., Бердников С. В. Концентрация взвеси и хлорофилла *a* в Азовском море по данным контактных измерений и космических снимков // Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования: сб. тр. конф. Ростов н/Д: Южный науч. центр РАН, 2012. С. 50–57.
12. Лобанова П. В., Башмачников И. Л., Броташ 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.
13. Матишов Г. Г., Степаньян О. В., Поважный В. В., Ковалева Г. В., Кренева К. В. Функционирование экосистемы Азовского моря в зимний период // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413. № 1. С. 112–115.
14. Матишов Г. Г., Поважный В. В., Бердников С. В., Мозес В. Дж., Гительсон А. А. Оценки концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных // Доклады Академии наук. 2010. Т. 432. № 4. С. 563–566.
15. Матишов Г. Г., Степаньян О. В., Ковалева Г. В., Поважный В. В., Кренева К. В. Особенности структуры пелагического сообщества Азовского моря в условиях аномально холодной зимы 2005–2006 гг. // Вестн. Южного науч. центра РАН. 2012. № 4. С. 66–75.

16. Сапрыгин В. В. Изучение распределения хлорофилла-а в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и результатам судовых измерений: дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск, 2011. 125 с.
17. Сапрыгин В. В., Бердников С. В., Кулыгин В. В., Дашкевич Л. В., Местецкий Л. М. Пространственное распределение и сезонная динамика концентрации хлорофилла «а» в Азовском море по данным спутниковых снимков спектрометра MERIS // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 5. С. 1–12. DOI: 10.1134/S0030157418050131.
18. Сорокина В. В., Кулыгин В. В. Долговременная изменчивость относительной прозрачности вод Азовского моря // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 3. С. 324–331. DOI: 10.7868/S003015741303012X.
19. Студеникина Е. И., Алдакимова А. Я., Губина Г. С. Фитопланктон Азовского моря в условиях антропогенных воздействий. Ростов н/Д: Эверест, 1999. 175 с.
20. Friedrichs M. A. M., Carr M.-E., Barber R. T., Scardi M., Antoine D., Armstrong R. A., Asanuma I., Behrenfeld M. J., Buitenhuis E. T., Chai F., Christian J. R., Ciotti A. M., Doney S. C., Dowell M., Dunne J., Gentili B., Gregg W., Hoepffner N., Ishizaka J., Kameda T., Lima I., Marra J., Mélin F., Moore J. K., Morel A., O'Malley R. T., O'Reilly J., Saba V. S., Schmeltz M., Smyth T. J., Tjiputra J., Waters K., Westberry T. K., Winguth A. Assessing the uncertainties of model estimates of primary productivity in the tropical Pacific Ocean // *J. Marine Systems*. 2009. V. 76. Iss. 1–2. P. 113–133. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.05.010.
21. Lee Y. J., Matrai P. A., Friedrichs M. A. M., Saba V. S., Antoine D., Ardyna M., Asanuma I., Babin M., Belanger S., Benoit-Gagne M., Devred E., Fernandez-Mendez M., Gentili B., Hirawake T., Kang S.-H., Kameda T., Katlein C., Lee S. H., Lee Z., Melin 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. Geophysical Research: Oceans*. 2015. V. 120. P. 6508–6541. DOI: 10.1002/2015JC011018.
22. Matishov G., Matishov D., Gargopa Yu., Dashkevich L., Berdnikov S., Kulygin V., Arkhipova O., Chikin A., Shabas I., Baranova O., Smolyar I. G. Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008. Intern. Ocean Atlas and Information Series. V. 11. NOAA Atlas NESDIS 65. Washington, D.C.: U.S. Government Publishing Office, 2008. 148 p.
23. 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., Shatohin B. M., Plotnikov V. V., Vakulskaya N. M., Luchin V. A., Kruts A. A. Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013). Intern. Ocean Atlas and Information Series. V. 14. NOAA Atlas NESDIS 78. USA: National Oceanographic Data Center User Services Team NOAA/NESDIS E/OC1, 2014. 131 p.
24. MERIS Product Handbook. European Space Agency. Iss. 3.0. 2011. URL: <http://envisat.esa.int/handbooks/meris/CNTR.html> (January 15, 2018).
25. Moses W. J., Gitelson A. A., Berdnikov S. V., Povazhnyi V. V. Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS — the Azov Sea case study // *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*. 2009. V. 4. P. 845–849.
26. 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. V. 121. P. 118–124.
27. Moses W. J., Saprygin V. V., Gerasyuk V. S., Povazhnyi V. V., Berdnikov S. V., Gitelson A. A. OLCI-Based NIR-red Models for Estimating Chlorophyll-a Concentration in Productive Coastal Waters — A Preliminary Evaluation // *Environmental Research Communications*. 2019. 1. 011002. URL: <https://doi.org/10.1088/2515-7620/aaf53c>.

## Seasonal and long-term dynamics of primary production in the Sea of Azov from MERIS data

S. V. Berdnikov, V. V. Kulygin, L. V. Dashkevich

Federal Research Centre the Southern Scientific Centre RAS  
Rostov-on-Don 344006, Russia  
E-mail: berdnikov@ssc-ras.ru

This paper is devoted to the study of the primary production in the Sea of Azov from the MERIS data (for the whole period of its operation). The method of primary production assessment is based on depth-integrated mathematical model. The model has two input parameters: chlorophyll *a* concentration in the surface layer and transparency (Secchi disk depth). Regional algorithm for highly productive waters was used to assess the chlorophyll *a* concentration in the Sea of Azov by MERIS data. Transparency was determined by the standard MERIS processing product — the concentration of total suspended matter (TSM), and the empirical relationship between transparency and TSM. For the first time the long-term seasonal and annual average spatial distributions of primary production for the Sea of Azov in the modern period were obtained. The features of the primary production' dynamics for the period 2003–2011 were considered. It was noted that starting from 2006 the most productive zones shifted to the central part of the Taganrog Bay. Average seasonal values of primary production by sea regions were assessed. The average annual primary production (from March to November) in the Sea of Azov for considered period is  $247 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ .

**Keywords:** primary production, the Sea of Azov, satellite images, MERIS spectrometer

Accepted: 18.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-173-185

### References

1. Berdnikov S. V., Dashkevich L. V., Kulygin V. V., Povazhnyi V. V., Otsenka pervichnoi produktssii Azovskogo morya po dannym distantsionnogo zondirovaniya (Assessments of primary productivity in the Sea of Azov based on remote sensing data), *Nauka Yuga Rossii*, 2018, Vol. 14, No. 2, pp. 55–65, DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-2-55-65.
2. *Gidrometeorologicheskii spravochnik Azovskogo morya* (Hydrometeorological reference of the Sea of Azov), A. A. Aksenov (ed.), Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izd., 1962, 856 p.
3. Dashkevich L. V., *Analiz mnogoletnei izmenchivosti temperaturnogo rezhima vod otkrytoi chasti Azovskogo morya s ispol'zovaniem geoinformatsionnykh tekhnologii i matematicheskogo modelirovaniya: Dis. kand. geogr. nauk* (Analysis of long-term variability of the temperature regime of the waters of the open part of the Azov Sea using geoinformation technologies and mathematical modeling. Cand. geogr. sci. thesis), Rostov-on-Don, 2008, 212 p.
4. Dashkevich L. V., Nemtseva L. D., Berdnikov S. V., Otsenka ledovitosti Azovskogo morya v XXI veke po sputnikovym snimkam Terra/Aqua MODIS i rezul'tatam matematicheskogo modelirovaniya (Assessment of the Sea of Azov ice cover in the XXI century using Terra/Aqua MODIS images and numerical modelling), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 91–100.
5. Dashkevich L. V., Berdnikov S. V., Kulygin V. V., Many-Year Variations of the Average Salinity of the Sea of Azov, *Water Resources*, 2017, Vol. 44, No. 5, pp. 749–757, DOI: 10.1134/S0097807817040042.
6. Demidov A. B., Mosharov S. A., Artemyev V. A., Stupnikova A. N., Simakova U. V., Vazyulya S. V., Integrirovannyye i razreshayushchie po glubine modeli pervichnoi produktssii Karskogo morya (Depth-Integrated and Depth-Resolved Models of Kara Sea Primary Production), *Okeanologiya*, 2016, Vol. 56, No. 4, pp. 563–576.
7. Ermolaeva E. V., Raspreделение i sezonnaya dinamika produktssii i destruktssii organicheskogo veshchestva v Azovskom more v 2008–2010 gg. (Spatial distribution and seasonal dynamics of organic matter production and destruction in the Sea of Azov in 2008–2010), In: *Ekosistemnye issledovaniya sredi i bioty Azovskogo basseina* (Environmental studies and biota investigations in the Azov Sea basin), D. G. Matishov (ed.), Rostov-on-Don: Yuzhnyi nauchnyi tsentr RAN, 2012, pp. 131–139.

8. Zaika V. E., Makarova N. P., K opredeleniyu pervichnoi produktsii po sodержaniyu khlorofilla v more (On determining primary production by chlorophyll content in the sea), *Ecology of the Sea*, 1982, Vol. 11, pp. 9–15.
9. Kovaleva G. V., Povazhnyi V. V., Zolotareva A. E., Makarevich P. R., Matishov D. G., Ledovoe soobshchestvo mikrovodoroslei v Taganrogskom zalive Azovskogo morya (Ice community of microalgae in the Taganrog Gulf of the Azov Sea), *Okeanologiya*, 2014, Vol. 54, No. 5, pp. 659–664, DOI: 10.7868/S0030157414050086.
10. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Sheberstov S. V., Razrabotka i ispol'zovanie regional'nykh algoritmov dlya rascheta bioopticheskikh kharakteristik morei Rossii po dannym sputnikovykh skanerov tsveta (Development and use of regional algorithms for calculating the bio-optical characteristics of the seas of Russia according to satellite color scanners), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 2, pp. 99–105.
11. Kushnir V. M., Berdnikov S. V., Kontsentratsiya vzvesi i khlorofilla a v Azovskom more po dannym kontaktnykh izmerenii i kosmicheskikh snimkov (The concentration of suspended matter and chlorophyll-a in the Sea of Azov derived from contact measurements and space images), *Azovskoe more, Kerchenskiy proliv i predprolivnye zony v Chernom more: problemy upravleniya pribrezhnyimi territoriyami dlya obespecheniya ekologicheskoi 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), Proc. Conf., Rostov-on-Don: Yuzhnyi nauchnyi tsentr RAN, 2012, pp. 50–57.
12. Lobanova P. V., Bashmachnikov I. L., Brotash V., Analiz modelei pervichnoi produktsii na osnove sputnikovykh dannykh v severo-vostochnoi chasti Atlanticheskogo okeana (Validation of satellite derived primary production models in the Northeast Atlantic), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 114–126.
13. Matishov G. G., Stepanyan O. V., Povazhnyi V. V., Kovaleva G. V., Kreneva K. V., Funktsionirovanie ekosistemy Azovskogo morya v zimnii period (Functioning of the Sea of Azov ecosystem in winter), *Doklady Akademii nauk*, 2007, Vol. 413, No. 1, pp. 112–115.
14. Matishov G. G., Povazhnyi V. V., Berdnikov S. V., Moses W. J., Gitelson A. A., Satellite estimation of chlorophyll-a concentration and phytoplankton primary production in the sea of Azov, *Doklady Biological Sciences*, 2010, Vol. 432, No. 1, pp. 216–219.
15. Matishov G. G., Stepanyan O. V., Kovaleva G. V., Povazhnyi V. V., Kreneva K. V., Osobennosti struktury pelagicheskogo soobshchestva Azovskogo morya v usloviyakh anomal'no kholodnoi zimy 2005–2006 gg. (Specific structural features of the Sea of Azov pelagic community during the abnormally cold winter of 2005–2006), *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, No. 4, pp. 66–75.
16. Saprygin V. V., *Izuchenie raspredeleniya khlorofilla-a v Azovskom more po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa i rezul'tatam sudovykh izmerenii: Dis. kand. geogr. nauk* (A study of the distribution of chlorophyll-a in the Sea of Azov according to the data of remote sensing of the Earth from space and the results of ship measurements. Cand. geogr. sci. thesis), Murmansk, 2011, 125 p.
17. Saprygin V. V., Berdnikov S. V., Kulygin V. V., Dashkevich L. V., Mestetskiy L. M., Prostranstvennoe raspredelenie i sezonnaya dinamika kontsentratsii khlorofilla “a” v Azovskom more po dannym sputnikovykh snimkov spektrometra MERIS (Spatial Distribution and Seasonal Dynamics of Chlorophyll-a Concentration in the Sea of Azov based on Satellite Images by MERIS Spectrometer), *Okeanologiya*, 2018, Vol. 58, No. 5, pp. 751–762, DOI: 10.1134/S0030157418050131.
18. Sorokina V. V., Kulygin V. V., Dolgovremennaya izmenchivost' otnositel'noi prozrachnosti vod Azovskogo morya (Long-Term Variability of the Water Transparency (Secchi Depth) in the Sea of Azov), *Okeanologiya*, 2013, Vol. 53, No. 3, pp. 324–331, DOI: 10.7868/S003015741303012X.
19. Studenikina E. I., Aldakimova A. Ya., Gubina G. S., *Fitoplankton Azovskogo morya v usloviyakh antropogennykh vozdeistvii* (Phytoplankton of the Sea of Azov under anthropogenic influences), Rostov-on-Don: Everest, 1999, 175 p.
20. Friedrichs M. A. M., Carr M.-E., Barber R. T., Scardi M., Antoine D., Armstrong R. A., Asanuma I., Behrenfeld M. J., Buitenhuis E. T., Chai F., Christian J. R., Ciotti A. M., Doney S. C., Dowell M., Dunne J., Gentili B., Gregg W., Hoepffner N., Ishizaka J., Kameda T., Lima I., Marra J., Mélin F., Moore J. K., Morel A., O'Malley R. T., O'Reilly J., Saba V. S., Schmeltz M., Smyth T. J., Tjiputra J., Waters K., Westberry T. K., Winguth A., Assessing the uncertainties of model estimates of primary productivity in the tropical Pacific Ocean, *J. Marine Systems*, Vol. 76, Issue 1–2, 2009, pp. 113–133, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.05.010.
21. Lee Y. J., Matrai P. A., Friedrichs M. A. M., Saba V. S., Antoine D., Ardyna M., Asanuma I., Babin M., Belanger S., Benoit-Gagne M., Devred E., Fernandez-Mendez M., Gentili B., Hirawake T., Kang S.-H.,

- Kameda T., Katlein C., Lee S. H., Lee Z., Melin 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. Geophysical Research: Oceans*, 2015, Vol. 120, pp. 6508–6541, DOI: 10.1002/2015JC011018.
22. Matishov G., Matishov D., Gargopa Yu., Dashkevich L., Berdnikov S., Kulygin V., Arkhipova O., Chikina A., Shabas I., Baranova O., Smolyar I. G., *Climatic Atlas of the Sea of Azov 2008, Intern. Ocean Atlas and Information Series, Vol. 11. NOAA Atlas NESDIS 65*, Washington, D. C.: U. S. Government Publishing Office, 2008, 148 p.
  23. 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., Shatohin B. M., Plotnikov V. V., Vakulskaya N. M., Luchin V. A., Kruts A. A., *Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013), Intern. Ocean Atlas and Information Series, Vol. 14, NOAA Atlas NESDIS 78*, USA: National Oceanographic Data Center User Services Team NOAA/NESDIS E/OC1, 2014, 131 p.
  24. <http://envisat.esa.int/handbooks/meris/CNTR.html> (Jan. 15, 2018).
  25. Moses W. J., Gitelson A. A., Berdnikov S. V., Povazhnyy V. V., Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS — the Azov Sea case study, *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2009, Vol. 4, pp. 845–849.
  26. 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, pp. 118–124.
  27. Moses W. J., Saprygin V. V., Gerasyuk V. S., Povazhnyy V. V., Berdnikov S. V., Gitelson A. A., OLCI-Based NIR-red Models for Estimating Chlorophyll-a Concentration in Productive Coastal Waters — A Preliminary Evaluation, *Environmental Research Communications*, 2019, 1, 011002, available at: <https://doi.org/10.1088/2515-7620/aaf53c>.