

## 6.2. МНОГОЛЕТНЯЯ И СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *a* В АЗОВСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

**В.В. Сапрыгин, С.В. Бердников, В.В. Кулыгин,  
Л.В. Дашкевич, В.В. Поважный, В.С. Герасюк**

**Аннотация.** Представлены результаты оценки концентрации хлорофилла *a* (КХа) в Азовском море по данным снимков спектрометра MERIS и сканера цвета OLCI. Для расчета КХа применяли региональные двухканальные алгоритмы. Представлены рассчитанные по снимкам средние месячные поля КХа в Азовском море за период наблюдений сканера MERIS. Отмечены сезонные отличия КХа в Азовском море по данным дистанционного зондирования и литературным источникам, а именно: летне-осенний период развития фитопланктона продолжительнее весеннего и характеризуется более высокими значениями на всей акватории моря.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование; концентрация хлорофилла *a*; MERIS; OLCI; Азовское море

В последние десятилетия спутниковые данные о цвете океана всё шире используются для оценок биологической продуктивности морских акваторий, контроля их экологического состояния. При этом основным показателем является концентрация хлорофилла *a* (КХа) – главного фотосинтезирующего пигмента, содержащегося в фитопланктоне. Для этого широко используются эмпирические соотношения (связи) КХа и спектральных характеристик восходящего излучения моря.

Разработанные к настоящему времени «универсальные» (широко применяемые для Мирового океана) алгоритмы оценки КХа по данным дистанционного зондирования Земли из космоса нуждаются в корректировке для учета региональных особенностей морей, для которых они используются [Копелевич и др., 2006]. Особенно это касается так называемых вод II типа [Morel, Prieur, 1977] – высокопродуктивных и мутных прибрежных, внутренних вод и эстуариев, где фитопланктон является не единственным фактором, определяющим их оптические свойства.

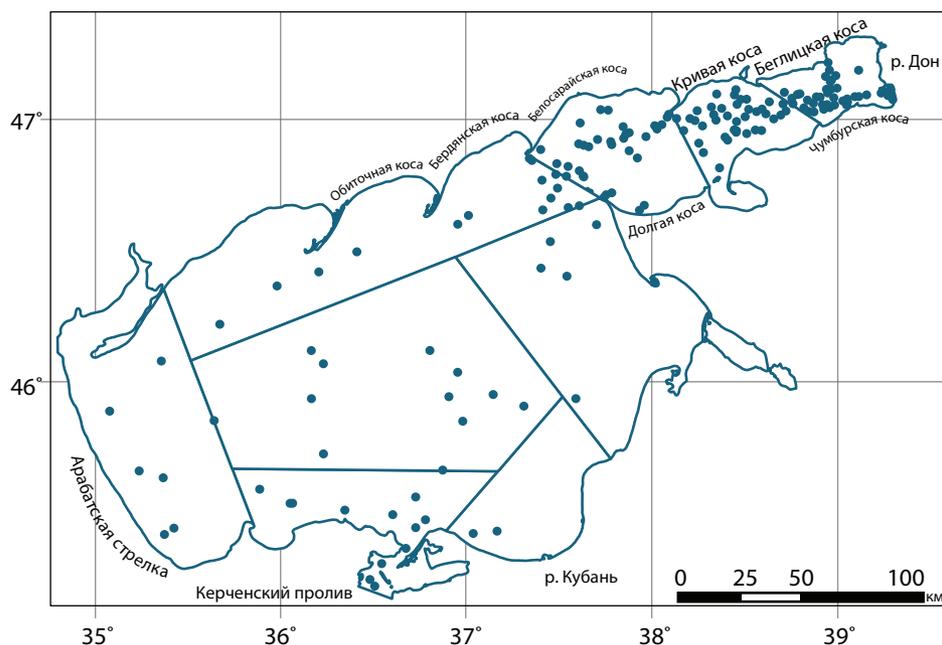
Воды Азовского моря относят ко II типу. Отмечается, что применяемые ранее для его акватории алгоритмы оценки КХа по данным спутниковых сканеров цвета приводили к ошибочным результатам [Moses, 2009].

В работах [Студеникина и др., 1998; Александрова, Баскакова, 2002] подчеркивалось, что в Азовском море КХа адекватно отражает сезонные и пространственные изменения биомассы фитопланктона, поэтому, рассматривая динамику и особенности её пространственного распределения, можно судить об изменениях, происходящих с фитопланктонным сообществом. При

этом данные экспедиционных наблюдений за КХа в экосистеме Азовского моря обрывочны и методически разнородны. Имеются сведения, что в 1992 г. З.В. Александровой начаты и проводились систематические исследования КХа, но результаты опубликованы в очень сжатом виде [Александрова, Баскакова, 2002]. Практически все опубликованные данные о КХа обобщены в диссертационном исследовании В.В. Сапрыгина [2011].

С 2008 г. в ходе экспедиционных исследований, проводимых Южным научным центром РАН, были предприняты систематические измерения КХа в Азовском море для калибровки и последующей верификации предложенных проф. А. Гительсоном алгоритмов дешифрирования спутниковых снимков [Gitelson et al., 2008].

На основе данных спектрометра MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer [Delwart, Bourg Lu, 2011]) и судовых измерений в Азовском море в 2008–2009 гг. были разработаны двух- и трехканальные алгоритмы для определения КХа, подробное описание которых рассмотрено в работах [Матишов и др., 2010; Moses et al., 2009a; 2009b; 2012; Gitelson et al., 2011a; 2011b]. Верификация алгоритмов базировалась на данных подспутниковых экспедиционных наблюдений (рис. 1), выполненных в 2008–2010 гг. в Таганрогском заливе (ТЗ) и открытых районах Азовского моря (СМ) [Moses et al., 2012].



**Рис. 1.** Районирование Азовского моря

Примечание: *районы открытой части Азовского моря*: 1 – центральный; 2 – Прикерченский; 3 – западный; 4 – северный; 5 – восточный; 6 – Темрюкский; *районы Таганрогского залива*: 7 – западный; 8 – центральный; 9 – восточный).

Полые кружки – станции подспутниковых наблюдений в 2008–2010 гг.

В работах [Gitelson et al., 2011b; Gurlin et al., 2011; Yacobi et al., 2011] разработанные для Азовского моря алгоритмы без повторной калибровки были применены для точной оценки КХа по судовым спектрометрическим измерениям в озерах штата Небраска, Чесапикском заливе (США) и озере Кинерет (Израиль) и по синтетическим модельным данным. В работе [Moses, 2009] было показано, что использованный в настоящей работе двухканальный алгоритм оценки КХа дает наиболее точную оценку для мутных вод Азовского моря в сравнении со стандартными алгоритмами (algae\_2 для MERIS).

На смену спектрометру MERIS, завершившему свою работу в 2012 г., пришел сканер цвета OLCI (Ocean and Land Colour Instrument), функционирующий на борту спутника Sentinel-3. Число спектральных каналов в OLCI увеличено до 21 (из них 15 соответствуют каналам MERIS), конструкция прибора оптимизирована для минимизации влияния солнечных лучей, пространственное разрешение соответствует снимкам MERIS – 300 м. Относительно недавно стали доступны снимки второго уровня обработки с учетом атмосферной коррекции. В работе [Moses et al., 2019] был предложен региональный алгоритм оценки КХа для Азовского моря по данным сканера цвета OLCI. Для его калибровки и верификации использовались спектрофотометрические измерения КХа в приповерхностном слое акватории Азовского моря в ходе экспедиций ЮНЦ РАН в июне, июле и сентябре 2016 г., апреле и июле 2017 г., мае и июне 2018 г.

В настоящей работе представлены результаты оценки КХа в Азовском море по данным снимков спектрометра MERIS за все время его работы на орбите (2002–2012 гг.) и сканера цвета OLCI за 2016–2018 гг. Представлены рассчитанные по снимкам среднемесячные поля КХа в Азовском море для современного периода. Результаты этого исследования частично опубликованы в работе [Сапрыгин и др., 2018].

### **Материалы и методы**

Исходными данными являются архивные снимки спектрометра MERIS за период с июля 2002 г. по апрель 2012 г. [<https://earth.esa.int>], предоставленные Европейским космическим агентством (ESA). Всего было отобрано 847 снимков, покрывающих акваторию Азовского моря полностью или частично. Обработка производилась с помощью программного продукта BEAM (the Basic ENVISAT and ERS (A) ATSR and MERIS toolbox). Преимущество использования снимков MERIS для определения КХа заключается в возможности охватить всю акваторию Азовского моря одновременно, использовать информацию по излучению на длине волны около 708 нм и достаточно высокое для сканеров цвета пространственное разрешение (260 × 290 м). Для оценок КХа использовались снимки второго уровня обработки с учетом атмосферной коррекции. Особенности их обработки описаны в [MERIS Product Handbook, 2011].

Наибольшее количество снимков относится к летнему календарному сезону, несколько меньше представлено в весенний и осенний периоды, снимки за зимние месяцы представлены единичными экземплярами (табл. 1).

**Таблица 1.** Распределение по годам и сезонам числа обработанных снимков MERIS и средней КХа в приповерхностном слое Азовского моря по данным сканера MERIS ( $\text{мг/м}^3$ ) по районам.

Год	Таганрогский залив (ТЗ)				Открытая часть Азовского моря (СМ)				Число снимков MERIS			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
2002	–	–	37,1	–	6,8	–	16,2	7,4	1	0	2	2
2003	–	25,5	25,0	30,9	5,2	15,0	8,7	9,0	1	9	16	14
2004	21,0	20,0	29,4	38,0	10,7	10,1	10,5	12,9	8	32	35	20
2005	–	22,5	35,2	35,3	7,8	14,4	11,5	16,5	15	29	48	28
2006	32,4	20,7	48,1	48,2	12,6	10,6	12,4	29,6	6	32	48	16
2007	21,1	26,5	58,5	45,5	17,0	9,8	16,8	23,4	9	33	37	19
2008	25,0	26,9	54,5	41,3	10,1	8,4	12,0	14,3	12	18	42	24
2009	30,9	23,4	56,0	55,9	11,1	6,0	12,2	14,8	9	29	41	23
2010	19,8	25,7	60,3	52,2	22,2	12,5	12,3	13,7	5	29	39	14
2011	20,5	23,9	59,6	50,7	9,8	7,5	11,7	10,3	10	22	40	19
2012	–	24,6	–	–	9,1	10,7	–	–	4	7	0	0
Среднее число снимков	24,4	24,0	46,4	44,2	11,1	10,5	12,4	15,2	80	240	348	179

Примечание: – нет данных.

Расчеты КХа ( $\text{мг/м}^3$ ) в Азовском море по снимкам спектрометра MERIS выполнялись при помощи разработанного двухканального алгоритма [Moses et al., 2012]:

$$\text{КХа} = 61.324[R_{rs}^{-1}(665) \times R_{rs}(708)] - 37,94 \quad (1)$$

где  $R_{rs}(665)$  – коэффициент спектральной яркости (КСЯ) около максимума поглощения хлорофилла *a* в красном диапазоне спектра на 665 нм (7-й канал MERIS), а  $R_{rs}(708)$  представляет собой пик коэффициента спектральной яркости около 708 нм, обусловленный совместным поглощением света хлорофиллом *a* и водой (9-й канал MERIS).

Расчет проводили в 5 этапов:

- исключали пиксели, для которых процедура атмосферной коррекции приводила к отрицательным значениям КСЯ на длине волны 490 нм;
- исключали пиксели, распознанные стандартными алгоритмами как суша, облака, лед или дымка;
- для оставшихся пикселей вычисляли КХа по формуле (1);
- исключали пиксели, в которых рассчитанные значения КХа оказались отрицательными;

– значения  $KXa$ , большие  $150 \text{ мг/м}^3$ , заменяли на 150 (максимальную величину, измеренную спектрофотометрическим методом за 2008–2010 гг.).

Для исключения выбросов, обусловленных, по-видимому, ошибками атмосферной коррекции, полученные поля  $KXa$  подвергались процедуре фильтрации на основе разработанного алгоритма [Бердников и др., 2012], опирающегося на данные наблюдений *in situ*.

Подспутниковые измерения для определения  $KXa$ , положенные в основу разработанного алгоритма, проводили экстрактным спектрофотометрическим методом. На борту судна пробы фильтровали для осаждения клеток фитопланктона. Фильтры высушивали в эксикаторе в присутствии силикагеля и хранили при температуре  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$  на борту судна, а на берегу – при температуре  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  для последующей обработки в лаборатории. Использовали стекловолокнистые фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0,7 мкм. Определение концентрации фотосинтетических пигментов проводили в соответствии с ГОСТ 17.1.04.02.-90 [1990] на спектрофотометре “Nicolet Evolution 300”.  $KXa$  рассчитывали по трихроматическому алгоритму без подкисления. Углекислый барий и углекислый магний не применяли.

При разработке регионального алгоритма оценки  $KXa$  для Азовского моря по данным сканера цвета OLCI использовали снимки второго уровня обработки, содержащие КСЯ с учетом атмосферной коррекции “Bright pixel”, применявшейся и для снимков MERIS [Moore et al., 1999; Aiken, Moore, 2000]. Отбирали снимки, попадающие во временной диапазон  $\pm 3$  дня относительно дат выполнения подспутниковых измерений. Также при сопоставлении измерений  $KXa$  с данными в соответствующих им пикселях снимков применяли следующие критерии отбора [Moses et al., 2009a]:

- расстояние от станции отбора пробы до береговой линии водоема должно составлять не менее двух пикселей на соответствующем снимке;
- пиксел снимка должен быть свободен от облаков/ дымки;
- КСЯ для данного пикселя после применения атмосферной коррекции в диапазоне длин волн 443–800 нм должны быть положительными;
- форма и амплитуда спектра КСЯ в пикселе должны быть типичными для внутренних и прибрежных вод.

С учетом перечисленных критериев для экспедиций 2016–2018 гг. получено 49 пар измерений *in situ* и со спутника, из них с временной разницей в 0 дней – 17 пар, 1 день – 9 пар, 2 дня – 16 пар и 3 дня – 7 пар.

Для калибровки алгоритма (2) выбрали 15 станций из экспедиций июня 2016 и апреля 2017 г., чтобы охватить широкий диапазон концентраций ( $1,8\text{--}96,4 \text{ мг/м}^3$ ), коэффициент детерминации составил 0,95:

$$KXa = 45.60[R_{rs}^{-1}(665) \times R_{rs}(708)] - 26.45, \quad (2)$$

где  $R_{rs}(665)$  – 8-й канал OLCI, а  $R_{rs}(708)$  – 11-й канал OLCI.

Оставшиеся 34 станции использовали для верификации алгоритма (2). Среднеквадратичная ошибка составила  $6,5 \text{ мг/м}^3$ , средняя абсолютная ошиб-

ка – 4,5 мг/м<sup>3</sup> или 7,9 и 5,5 % соответственно от диапазона КХа для этих 34 станций (1,3–84,3 мг/м<sup>3</sup>).

Для целей настоящей работы каждый снимок, после вычисления КХа, осредняли согласно схеме районирования (см. рис. 1), которая является упрощенной версией классического районирования Азовского моря [Гидрометеорологический справочник ... 1962]. Границы районов ТЗ, а также Темрюкского, Прикерченского и центрального районов СМ оставлены без изменений. При этом для СМ были выделены районы: *северный* (объединены три северных района СМ в район 4 на рисунке 1); *западный* (объединены два западных района СМ – в район 3) и *восточный* (объединены два восточных района СМ – в район 5). Такие изменения обусловлены общностью гидрометеорологических условий для развития фитопланктона в выделенных районах [Дашкевич, 2008; Climatic Atlas ... 2008; Atlas of Climatic Changes ... 2014]. В результате для девяти районов Азовского моря были рассчитаны стандартные статистические показатели КХа по данным снимков спектрометра MERIS.

Для количественного сравнения содержания хлорофилла *a* в разных районах моря рассчитаны средние значения для каждого месяца рассматриваемых лет. Расчет проводился при условии, что области, для которых имелись рассчитанные значения КХа, в сумме превышали 50 % площади района (см. рис. 1). Затем были рассчитаны средние значения КХа для каждого календарного сезона по годам для каждого района (см. табл. 1).

Для построения среднесезонных месячных полей распределения КХа в 2002–2012 гг. акватория Азовского моря была разделена на квадраты размером 10 × 10 км. Сначала для каждого месяца каждого года рассчитывались среднемесячные значения в узлах регулярной сетки по формуле (3):

$$x_j^{ym} = \frac{\sum_{i \in I_j^{ym}} w_{ij} \cdot x_i}{\sum_{i \in I_j^{ym}} w_{ij}}, \quad w_{ij} = e^{-\left(\frac{d_{ij}}{r}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $x_j^{ym}$  – среднее месячное значение КХа в  $j$ -ом узле сетки,  $m$  – индекс месяца (1–12),  $y$  – индекс года (2002–2012 гг.);  $x_i$  – значения КХа в ячейках дешифрированных спутниковых снимков;  $I_j^{ym}$  – множество ячеек спутниковых снимков, удаленных от  $j$ -го узла сетки не более чем на расстояние  $r = 30$  км и приходящихся на месяц года с соответствующим индексом  $ym$ ;  $d_{ij}$  – расстояние от  $j$ -го узла сетки до  $i$ -й ячейки спутникового снимка со значением КХа, км.

Затем рассчитывались среднесезонные значения за период 2002–2012 гг.

## Результаты и обсуждение

Представленные на рисунке 2 графики КХа по данным космических снимков MERIS для ТЗ (8-й район) в сопоставлении с данными экспеди-

ционных наблюдений за период 2008–2010 гг. дают основания считать, что полученные оценки могут быть использованы для характеристики пространственно-временной изменчивости  $KXa$  в Азовском море в рассматриваемый период.

По данным спутниковых съемок в акватории Азовского моря за 2002–2012 гг. можно выделить два ежегодно повторяющихся пика (весенний и летне-осенний) в развитии фитопланктона (и следующие за ними периоды депрессии). 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]. По данным спутниковых наблюдений в ТЗ и северном районе моря весенний максимум  $KXa$  наблюдается обычно на месяц позже, чем в СМ (рис. 3), вероятно это связано с более поздним прогревом поверхностного слоя и сходом льда в северной части Азовского моря.  $KXa$  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.

Второй пик развития фитопланктонного сообщества Азовского моря, связанный с бурным ростом теплолюбивых видов и «цветением» синезеленых водорослей [Студеникина и др., 1999], наблюдается в августе-сентябре практически одновременно в ТЗ и СМ. При этом высокие  $KXa$  могут наблюдаться в отдельных районах как в июле, так и в октябре, а также в ноябре (например, в ноябре 2009 г. в 8-м районе средняя  $KXa$  составила  $61 \text{ мг/м}^3$ ). В СМ фитопланктон продолжает годовой цикл развития дольше, чем в ТЗ, так как его акватория позднее покрывается льдом.

Исходя из двух обобщающих работ по фитопланктону Азовского моря [Студеникина и др., 1999; Макаревич, 2007], интенсивность весеннего развития (максимума биомассы) фитопланктона оценивалась значительно выше осеннего с вкладом в годовую биомассу более 30 %. Вместе с тем в работе [Сапрыгин, 2011] впервые отмечено, что сложившиеся представления о преимуществе весеннего пика цветения над летне-осенним не соответствуют действительности в современный период. По нашим оценкам на основе спутниковых снимков, в современный период летне-осенняя фаза развития фитопланктона продолжительнее весенней и характеризуется более высокими значениями  $KXa$  на всей акватории моря. Это удалось доказать с помощью анализа нелинейного тренда в сезонном распределении  $KXa$  [Сапрыгин и др., 2018]. За десять лет спутниковых наблюдений исключение составили только два случая, когда первый пик развития фитопланктона был более мощным: весной 2010 г. в акватории СМ (районы 1, 3, 4 и 5) и марте 2008 г. в ТЗ (район 9).

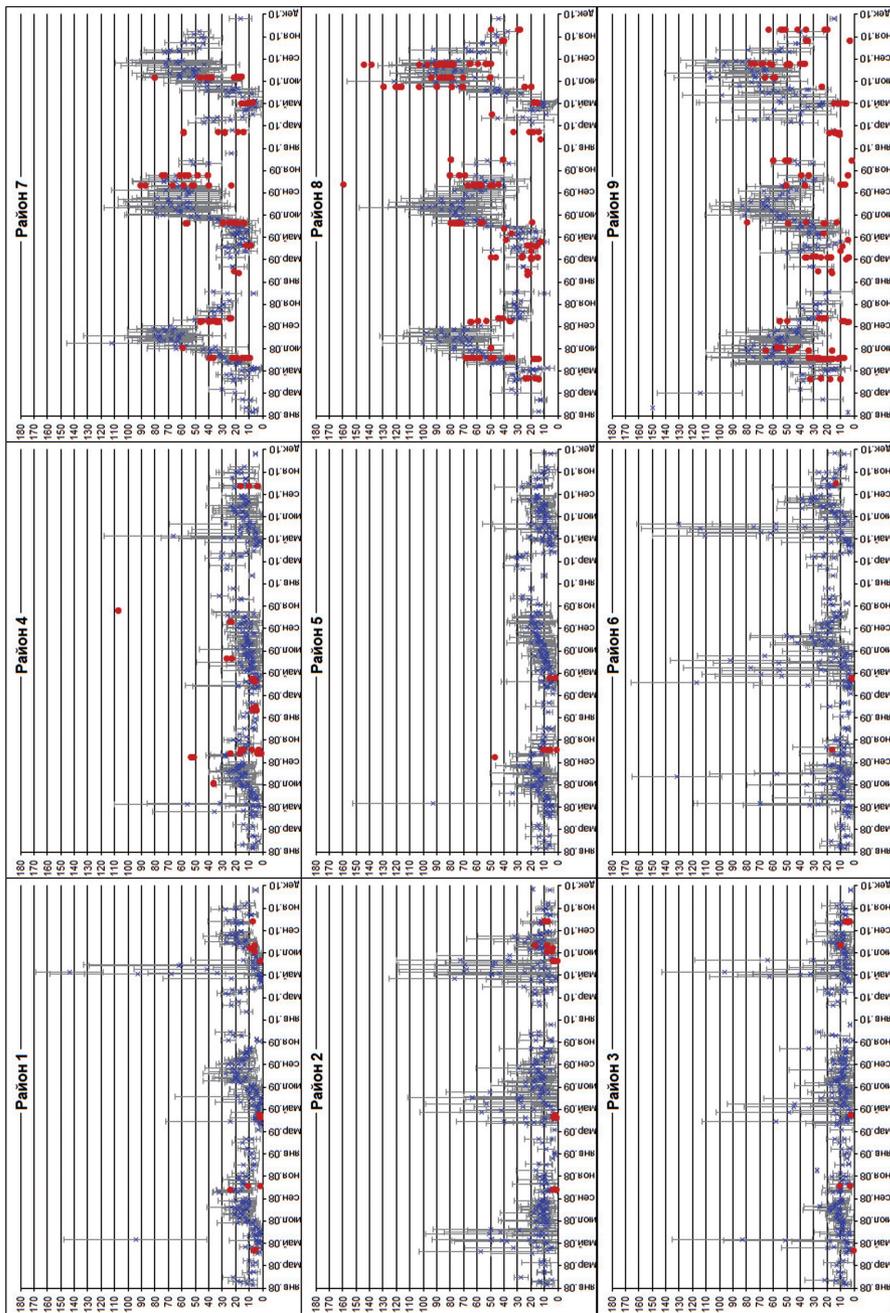
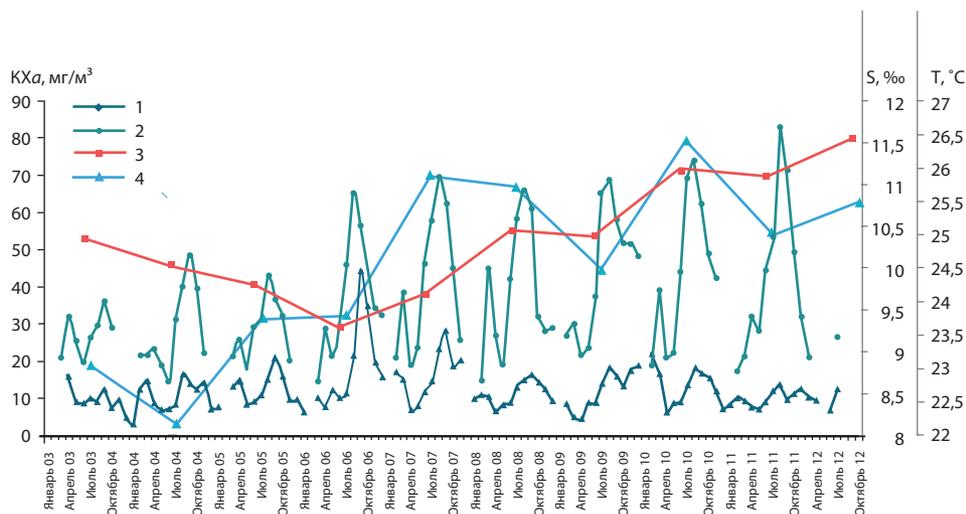


Рис. 2. Оценка  $K_{Ha}$  по судовым измерениям (красные кружки) и спутниковым снимкам (серые столбики и синие крестики – стандартное отклонение и среднее значение) для девяти районов Азовского моря



**Рис. 3.** Сезонная изменчивость средних значений КХл (мг/м<sup>3</sup>) по районам Азовского моря в 2003–2012 гг.: 1 – СМ; 2 – ТЗ; 3 – средняя годовая солёность, ‰; 4 – средняя за лето температура воды (Таганрог)

Данные спутников позволяют получить более детальную картину для всего моря одновременно и с гораздо большей регулярностью наблюдений. Также полученные результаты могут свидетельствовать о климатически обусловленных изменениях, происходящих в экосистеме Азовского моря в современный период.

Ранее считалось, что «процессы жизнедеятельности всех групп и видов водорослей затухают в преддверии биологической зимы... Зима характеризуется не только низкой биомассой фитопланктона, но и весьма бедным качественным составом водорослей» [Студеникина и др., 1999, с. 56]. Однако это представление следует пересмотреть в связи с результатами экспедиций на ледоколах в зимний период [Ковалёва и др., 2014], опубликованными данными [Теренько, 2010], данными спутниковых наблюдений (рис. 3; табл. 1) и судовыми спектрофотометрическими измерениями КХл [Сапрыгин и др., 2018].

В случае мягкой зимы первый пик развития фитопланктона в СМ может приходиться на февраль, после чего вспышки развития в календарную весну не произойдет (пример – зима 2008/ 2009 г.), или она будет слабо выражена (весна 2011 г.) (рис. 3). На основе проведенного анализа спутниковой информации выявлена тенденция к повышению средних месячных значений КХл в ТЗ за весь период наблюдений (рис. 3) и смещение весеннего пика развития фитопланктона на несколько недель к началу года, обусловленные, по-видимому, наблюдающимся потеплением моря [Гинзбург и др., 2011; Dashkevich, Berdnikov, 2016].

Средние величины  $KXa$  в ТЗ превышают таковые в СМ во все месяцы года (за единичными исключениями), в большинстве случаев – в несколько раз. С 2002 по 2006 г. зоны максимальных значений  $KXa$  в ТЗ наблюдались в 7-м и 8-м районах, с 2007 г. отмечено их смещение на восток, к устью р. Дон. Возможно, это связано с наблюдаемым ростом солености Азовского моря [Dashkevich, Berdnikov, 2016; Дашкевич и др., 2017] и, соответственно, смещением зоны, наиболее благоприятной для развития синезеленых водорослей. В СМ наибольшие значения  $KXa$  наблюдаются как в прибрежных зонах, заливах, так и в центральной части моря. Отмечено повышение  $KXa$  в СМ с начала периода наблюдений в 2002 г., с резким пиком в 2006 г. и последующий ее спад (рис. 3). Возможно, это связано с динамикой солености моря в этот период.

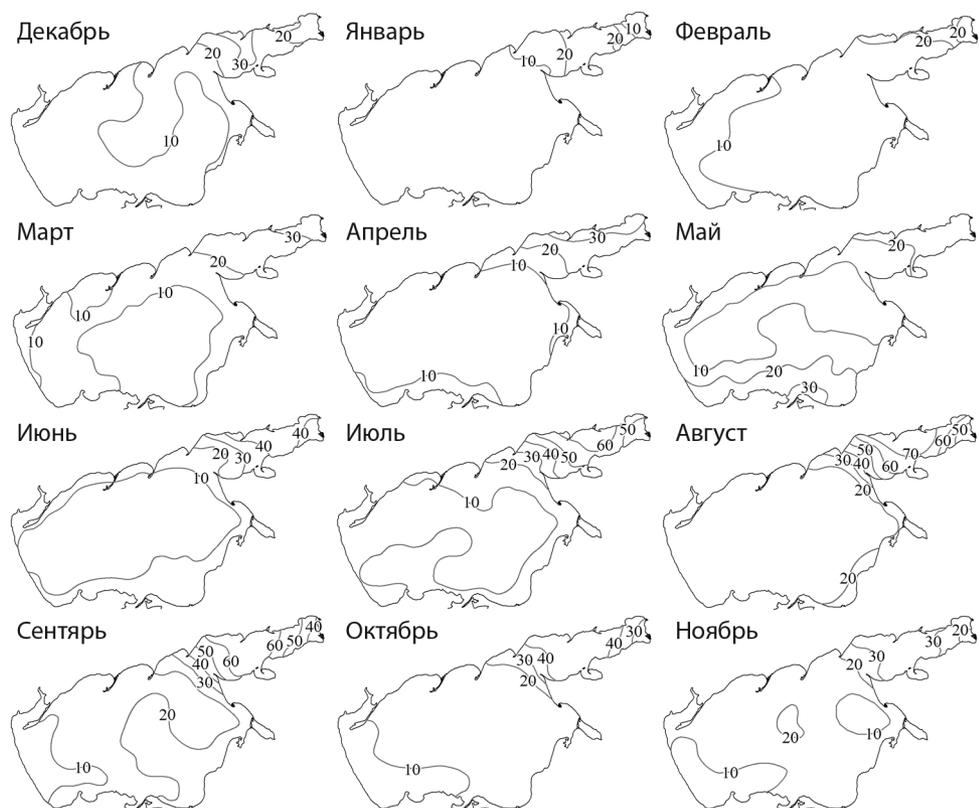
Максимальные за 10 лет наблюдений средние месячные  $KXa$  составили:

- в СМ (сентябрь 2006 г.) – в 6, 5, 2 и 1-м районах соответственно 74,6; 47,0; 39,7; 37,3 мг/м<sup>3</sup> при среднем значении по морю осенью 29,6 мг/м<sup>3</sup>;
- в ТЗ (август 2011 г.) в 8-м и 9-м районах соответственно 109,8 и 101,5 мг/м<sup>3</sup>, при среднем значении летом в заливе 66,6 мг/м<sup>3</sup>.

Распределение  $KXa$  по снимкам MERIS в акватории Азовского моря имеет пятнистую структуру, что соответствует результатам непрерывных измерений флуориметрическим методом в работе [Шавыкин и др., 2010]. Для пространственного распределения средней за рассматриваемый период  $KXa$  по месяцам (рис. 4) характерны следующие особенности. На протяжении года в западном секторе моря наблюдаются более низкие значения  $KXa$ , в сравнении с центральным и восточным. Это объясняется отсутствием в западной части моря стока крупных рек и, соответственно, более низким уровнем содержания биогенных веществ.

В декабре-январе в СМ  $KXa$  соответствует 5–10 мг/м<sup>3</sup>, минимальные значения (меньше 5 мг/м<sup>3</sup>) отмечены у Арабатской стрелки. Локальные максимумы (до 30 мг/м<sup>3</sup>) наблюдаются в центральном районе ТЗ. В феврале акваторию СМ занимает зона с  $KXa$  10–15 мг/м<sup>3</sup>, которая сменяется в марте локальным минимумом (менее 10 мг/м<sup>3</sup>) над наиболее глубокими районами моря.

В весенний пик развития фитопланктона максимумы  $KXa$  отмечаются в восточном районе ТЗ, зона минимума располагается в западной и центральной частях акватории СМ. В период апрельской депрессии практически всё СМ занимает зона с  $KXa$  5–10 мг/м<sup>3</sup>. Локальные минимумы (менее 5 мг/м<sup>3</sup>) отмечаются в его юго-восточной и северо-западной частях. В это же время в вершине ТЗ наблюдаются значения  $KXa$  более 30 мг/м<sup>3</sup>. В мае по картам можно проследить заток через Керченский пролив вод из Чёрного моря, благоприятствующих массовому развитию здесь диатомовых водорослей, площадь зоны с  $KXa$  менее 10 мг/м<sup>3</sup> в СМ сокращается.



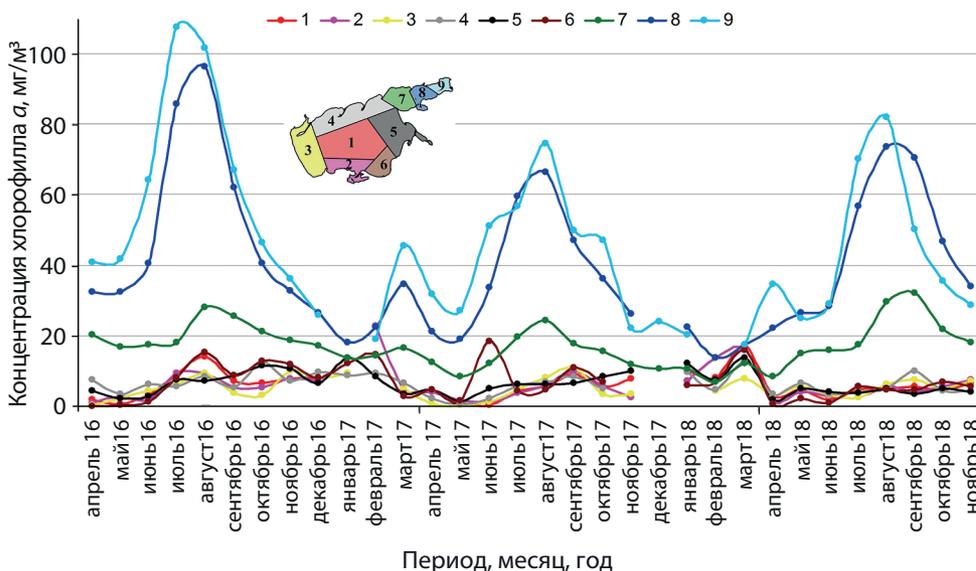
**Рис. 4.** Карты пространственного распределения КХa ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) по сезонам по данным сканера MERIS за десять лет наблюдений

В июне зона депрессии в СМ расширяется, наблюдаются локальные минимумы КХa (менее  $5 \text{ мг}/\text{м}^3$ ). В это же время в центральном районе ТЗ по мере прогрева вод отмечается начало летнего развития фитопланктона с локальным максимумом в районе Беглицкой косы (более  $45 \text{ мг}/\text{м}^3$ ). Рост биомассы фитопланктона продолжается в июле с достижением летнего максимума в августе (более  $70 \text{ мг}/\text{м}^3$ ) в центральном районе ТЗ. В июле – августе в СМ значения КХa находятся в пределах  $10\text{--}20 \text{ мг}/\text{м}^3$ , за исключением более продуктивного юго-восточного побережья. Максимум КХa в СМ (до  $25 \text{ мг}/\text{м}^3$  и более) отмечен в сентябре в центральной и юго-восточной его части. В сентябре – октябре в ТЗ наблюдается постепенное снижение значений КХa с сохранением локального максимума в его центральном районе со смещением в направлении косы Кривой. В октябре – ноябре в восточной и центральной частях СМ значения КХa находятся в пределах  $10\text{--}20 \text{ мг}/\text{м}^3$ , локальные минимумы отмечаются в западной части СМ.

С использованием спутниковых снимков сканера OLCI были выявлены особенности пространственно-временного распределения КХа в Азовском море в 2016–2018 гг. Доминирование летне-осеннего периода развития фитопланктона над весенним (как по продолжительности, так и по значениям КХа) остается характерным для акватории Таганрогского залива, как и для периода 2002–2012 гг. В открытой части Азовского моря данная закономерность больше не наблюдается (рис. 5).

Повышение средних месячных значений КХа в ТЗ, ежегодно наблюдавшееся в период 2003–2011 гг., сменилось спадом после 2016 г., возможно связанным с увеличением стока р. Дон в 2017–2018 гг.

Средние величины КХа в центральном и восточном районах ТЗ, как и ранее, превышают таковые в СМ во все месяцы года (за единичными исключениями), в большинстве случаев – в несколько раз. С 2007 г. отмечалось смещение зоны максимальных КХа в ТЗ, к устью р. Дон, связываемое с повышением солености моря. Это смещение продолжилось в 2016–2018 гг: средние значения КХа в западном районе ТЗ существенно снизились (рис. 5).



**Рис. 5.** Сезонная изменчивость средних значений КХа по районам Азовского моря в 2016–2018 гг. (номера и цвета районов соответствуют рисунку 1 и врезке). Районы открытой части Азовского моря: 1 – центральный; 2 – Прикерченский; 3 – западный; 4 – северный; 5 – восточный; 6 – Темрюкский. Районы Таганрогского залива: 7 – западный; 8 – центральный; 9 – восточный

### Заключение

Таким образом, по результатам проведенной работы на основе спутниковых снимков сканера MERIS за период 2002–2012 гг. и данных экс-

педиционных исследований, выявлены особенности пространственно-временного распределения КХа в Азовском море. Показано, что в начале XXI в. летне-осенний период развития фитопланктона продолжительнее весеннего и характеризуется более высокими значениями на всей акватории моря. Выявлена тенденция к повышению средних месячных значений КХа в ТЗ за весь период наблюдений и смещение весеннего пика на несколько недель к началу года, обусловленные, по-видимому, наблюдающимся потеплением моря. Средние величины КХа в ТЗ превышают таковые в СМ во все месяцы года (за единичными исключениями), в большинстве случаев – в несколько раз. Отмечено смещение зоны максимальных КХа в ТЗ к устью р. Дон с 2007 г., возможно в связи с отмечающимся повышением солености моря.

Полученные результаты могут свидетельствовать о существенных изменениях, происходящих в экосистеме Азовского моря в начале XXI в., вероятно обусловленных изменениями климата.

По результатам экспедиционных исследований 2016–2018 гг. на НИС «Денеб» завершена калибровка и валидация алгоритма оценки КХа в Азовском море по данным сканера OLCI, установленного на спутнике Sentinel-3 Европейского космического агентства. Этот алгоритм позволяет продолжить дистанционный мониторинг продукционных процессов, начатый при использовании данных сканера MERIS.

### **Благодарности**

*В ходе работ использовалось оборудование ЦКП ЮНЦ РАН «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)». Авторы благодарят команды НИС «Денеб» и «Профессор Панов», ледокола «Капитан Демидов», а также участников экспедиций, отбиравших пробы, и сотрудников лаборатории, проводивших их обработку (Шавыкина А.А., Сёмина В.Л., Саяпина В.В., Савикина А.И., Сойера В.Г., Ермолаеву Е.В., Московкину И.О.), проф. Л.М. Местецкого за помощь в выявлении сезонных особенностей распределения хлорофилла а.*

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

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

*Александрова З.В., Баскакова Т.Е.* Оценка тенденций химических основ биологической продуктивности Азовского моря // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: сб. науч. тр. АЗНИИРХ (2000–2001 гг.). Ростов н/Д., 2002. С. 26–37.

*Бердников С.В., Сапрыгин В.В., Поважный В.В., Кулыгин В.В., Gitelson A., Moses W.* Сезонная динамика и пространственное распределение концентрации хлорофилла *a* в Азовском море в 2008–2010 гг. по данным судовых наблюдений и дистанционного зондирования сканером MERIS // Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Чёрном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования: сб. науч. ст. / гл. ред. акад. Г.Г. Матишов, акад. В.А. Иванов. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. С. 58–71.

Гидрометеорологический справочник Азовского моря / под ред. А.А. Аксенова. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 856 с.

*Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А.* Чёрное и Азовское моря: сравнительный анализ изменчивости температуры поверхности (1982–2009 гг., спутниковая информация) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 209–218.

ГОСТ 17.1.04.02.–90 Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: Изд-во стандартов, 1990. 16 с.

*Дашкевич Л.В.* Анализ многолетней изменчивости температурного режима вод открытой части Азовского моря с использованием геоинформационных технологий и математического моделирования: дис. ... канд. географ. наук / Мурман. морской биол. ин-т КНЦ РАН; Мурманск, 2008. 164 с.

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

*Ковалёва Г.В., Поважный В.В., Золотарева А.Е., Макаревич П.П., Матишов Д.Г.* Ледовое сообщество микроводорослей в Таганрогском заливе Азовского моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 659–664.

*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.

*Макаревич П.П.* Планктонные альгоценозы эстуарных экосистем: Баренцево, Карское и Азовское моря / Мурман. морской биол. ин-т КНЦ РАН. М.: Наука, 2007. 223 с.

*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.

*Сапрыгин В.В.* Изучение распределения хлорофилла *a* в Азовском море по данным дистанционного зондирования Земли из космоса и результатам судовых измерений: дис. ... канд. географ. наук / Мурман. морской биол. ин-т КНЦ РАН; Ростов н/Д., 2011. 125 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. 751–762. Doi: 10.1134/S0030157418050131.

*Студеникина Е.И., Сафронова Л.М., Губина Г.С.* Содержание хлорофилла и особенности его распределения в Азовском море // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: сб. науч. тр. АзНИИРХ (1996–1997 гг.). Ростов н/Д., 1998. С. 104–112.

*Студеникина Е.И., Алдакимова А.Я., Губина Г.С.* Фитопланктон Азовского моря в условиях антропогенных воздействий. Ростов н/Д.: Эверест, 1999. 175 с.

Теренько Г.В. Современное состояние фитопланктонного сообщества Украинского сектора Азовского моря в декабре 2009 г. // Наук. записки Тернопільськ. нац. пед. університету ім. В. Гнатюка. Сер.: Біологія. 2010. № 3(44). С. 275–277.

Шавыкин А.А., Бердников С.В., Сапрыгин В.В., Вербицкий П.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.

Aiken J., Moore G. ATBD case 2s bright pixel atmospheric correction, Center for Coastal & Marine Sciences, Plymouth Marine Laboratory, U.K. Rep. PO-TN-MEL-GS-0005. 2000. 14 p.

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.

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.

Dashkevich L.V., Berdnikov S.V. Climatic changes and salinity of the Sea of Azov for 100 years // 16<sup>th</sup> Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM-2016. URL: www.sgem.org. SGEM-2016 Conf. Proc. (30 June – 6 July, 2016). B. 3. Vol. 2. P. 719–726.

Delwart S., Bourg Lu. Radiometric calibration of MERIS // SPIE Proceedings. 2011. Vol. 8176. P. 817613–817613.

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

Gitelson A.A., Dall'Olmo G., Moses W., Rundquist D.C., Barrow T., Fisher T.R., Gurlin D., Holz J. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-*a* in turbid waters: validation // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. P. 3582–3593.

Gitelson A., Gurlin D., Moses W., Yacobi Y. Remote estimation of chlorophyll-*a* concentration in inland, estuarine, and coastal waters // Advances in environmental remote sensing: sensors, algorithms and applications / Weng Q. (Ed.). Chapter 18. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2011a. P. 449–478.

Gitelson A.A., Gao B.C., Li R.R., Berdnikov S.V., Saprygin V.V. Estimation of chlorophyll-*a* concentration in productive turbid waters using a Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean – the Azov Sea case study // Environment Research Letters. 2011b. Vol. 6. No. 024023.

Gurlin D., Gitelson A.A., Moses W.J. Remote estimation of chlorophyll-*a* concentration in turbid productive waters Return to a simple two-band NIR-red model? // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115 (12). P. 3479–3490.

MERIS Product Handbook // European Space Agency. Iss. 3.0. Aug. 2011. URL: <http://envisat.esa.int/handbooks/meris/CNTR.html> (accessed: 12 Jan. 2019).

Moore G.F., Aiken J., Lavender S.J. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in Case II waters: application to MERIS // Int. Journal of Remote Sensing. 1999. T. 20. № 9. P. 1713–1733.

Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color // Limnology and Oceanography. 1977. Vol. 22. No. 4. P. 709–722.

Moses W.J. Satellite-based estimation of chlorophyll-*a* concentration in turbid productive waters, PhD dissertation / University of Nebraska-Lincoln. Lincoln, NE, 2009.

Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Povazhnyy V. Satellite estimation of chlorophyll-*a* concentration using the red and NIR bands of MERIS – the Azov Sea case study // IEEE Geosci. Remote Sensing Letters. 2009a. Vol. 6. No. 4. P. 845–849.

*Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S.V., Povazhnyy V.V.* Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data – successes and challenges // Environment Research Letters. 2009b. Vol. 4. No. 4(045005). 8 p.

*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.

*Moses W.J., Saprygin V., Gerasyuk V., Povazhnyy V., Berdnikov S., Gitelson A.A.* OL-CI-Based NIR-red models for estimating chlorophyll-a concentration in productive coastal waters – a preliminary evaluation // Environmental Research Communications. 2019. No. 1(011002). Doi.org/10.1088/2515-7620/aaf53c.

*Yacobi Y.Z., Moses W.J., Kaganovsky S., Sulimani B., Leavitt B.C., Gitelson A.A.* NIR-red reflectance-based algorithms for chlorophyll-a estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake Kinneret case study // Water Research. 2011. Vol. 45 (7). P. 2428–2436.

### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Сапрыгин Владислав Валерьевич** – к.г.н., н.с. ЮНЦ РАН; saprygin@ssc-ras.ru

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

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

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

**Поважный Василий Владимирович** – к.б.н., руководитель Российско-германской лаборатории полярных и морских исследований им. О.Ю. Шмидта (ОШЛ), г. С.-Петербург; cornigerius@live.com

**Герасюк Виктория Сергеевна** – м.н.с. ЮНЦ РАН; gerasyuk.v@mail.ru