Особенности цветения цианобактерий в центральной части Азовского моря по спутниковым данным

Н. В. Василенко, А. В. Медведева, А. А. Алескерова, А. А. Кубряков, С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mail: nadinkot.nk@gmail.com

В центральной части Азовского моря за период 2003—2018 гг. по спутниковым данным высокого и среднего разрешения были выявлены случаи интенсивного цветения цианобактерий. Такие события наблюдались с 2005 по 2010 г. и в 2012—2013 гг. Максимальная продолжительность цветений (более 1 мес) отмечалась в 2005, 2006 и 2009 гг. Рассмотрено влияние температурных и ветровых условий поступающего речного стока на развитие цветений цианобактерий. Наиболее часто интенсивные цветения фиксировались при высоких значениях температуры поверхностного слоя вод (от 24—26 °C), однако в 2005 и 2006 гг. они наблюдались также при температуре вод 18—20 °С. Было выявлено, что устойчивые низкие скорости ветра являются благоприятным условием для развития интенсивных цветений цианобактерий. Возрастание значений скорости ветра (от 8—10 м/с и более) вызывает их резкое прекращение. Одной из причин сокращения случаев интенсивных цветений в последние годы исследуемого периода может быть уменьшение объёма речного стока.

Ключевые слова: цианобактерии, MODIS, Азовское море, Таганрогский залив

Одобрена к печати: 12.07.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-166-180

Введение

Азовское море — водоём полузамкнутого и внутреннего типа. Физико-географические и гидрологические особенности акватории, такие как малый размер ($S = 39\,000\,\mathrm{km}^2$), небольшие глубины (до 13 м), выраженное влияние речного стока, низкая солёность моря (порядка 11 ‰) и др., обуславливают интенсивный прогрев вод, а также интенсивное ветровое перемешивание (Гершанович и др., 1991; Добровольский, Залогин, 1982). Эти характеристики способствуют высокому биоразнообразию и биопродуктивности моря (Гаргопа, 2003).

По физико-географическим признакам Азовское море традиционно разделяют на два основных района: собственно море и Таганрогский залив (Ковалева, 2016).

Для Азовского моря характерен ежегодный сезонный рост концентрации фитопланктона в период гидрологического лета (с мая по сентябрь включительно) (Василенко, 2018; Василенко, Медведева, 2019). Этот процесс обуславливается как влиянием речного пресноводного стока (Дон, Кубань и менее крупные реки), несущего биогенные элементы (азот, фосфор, кремний) (Сорокина, Бердников, 2014, 2018), так и гидрометеорологическими условиями на протяжении всего года (Василенко, Медведева, 2018; Havens et al., 2019).

Самое большое видовое разнообразие фитопланктона прослеживается у представителей диатомовых, зелёных, сине-зелёных (цианобактерий), динофитовых и золотых микроводорослей. Диатомовые водоросли составляют основную видовую часть фитопланктона Азовского моря в течение всего года, однако их численное преобладание прослеживается в зимне-весенний период. Наибольшая масса динофитовых встречается в летние месяцы, преимущественно в центральной и прикерченской частях акватории. Цианобактерии и зелёные водоросли достигают максимальной массы в наиболее опреснённом районе акватории, а именно в Таганрогском заливе, и пик их цветения приходится на период гидрологического лета (Ковалёва, 2020). Наличие цианобактерий в большом количестве в водах Азовского моря подтверждается в ряде исследований, базирующихся на натурных измерениях (Матишов и др., 2009; Сафронова, Лужняк, 2016; Селифонова, 2008; Сухинов, Никитина, 2011; Ясакова, 2015).

Цветение фитопланктона представляет собой массовое размножение планктонных микроскопических водорослей. Плотность популяции фитопланктона достигает 300—500 млн кл/м³, что может представлять угрозу для нормального функционирования экосистемы, так как данное явление способствует развитию гипоксии в толще воды и приводит к заморным явлениям (массовой гибели гидробионтов) (Ковалева, 2020).

Среди типичного фитопланктона Азовского моря существует ряд представителей цианобактерий, которые способны выделять в окружающие воды биологические токсины различной направленности (нейротоксины, гепатоксины и др.) (Вершинин, Орлова, 2008; Ковалева, 2008). Их воздействие на биоту акватории также проявляется отравляющим и/или смертельным эффектом: наблюдаются заморные явления (массовая гибель рыбы), поражение птиц и млекопитающих, в том числе и человека (Ковалева, 2020; Sayers et al., 2016). Цветения цианобактерий нередко занимают значительные по площади участки акватории: от сотен до тысяч и десятков тысяч квадратных километров в зависимости от акватории, в отдельных случаях это выраженные нитевидные формирования, распространяющиеся по всему бассейну или его лиманам/заливам (Алескерова и др., 2018; Медведева и др., 2017). Такого рода интенсивные цветения цианобактерий создают угрожающую ситуацию для экологического равновесия акватории или её части. Это обуславливает необходимость регулярного наблюдения за такими цветениями, а также изучения факторов, способствующих их развитию.

Цель данного исследования заключается в выявлении интенсивных цветений цианобактерий в центральной части Азовского моря по спутниковым данным, а также в характеристике условий, при которых цветения цианобактерий возникают. В настоящей работе рассматриваются температурные и ветровые условия, межгодовая изменчивость объёма поступающего речного стока.

Методы и материалы

Для исследования случаев цветения цианобактерий в Азовском море использовались оптические данные дистанционного зондирования высокого и среднего разрешения (MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua, MODIS Terra, ETM+ (англ. Enhanced Thematic Mapper Plus) Landsat-5, ETM+ Landsat-7, OLI (англ. Operational Land Imager) Landsat-8, MSI (англ. Multispectral Instrument) Sentinel-2). В данной работе рассматривались тёплые периоды 2003—2018 гг.

Для получения информации о пространственном распределении концентрации хлорофилла a в Азовском море за исследуемый период 2003-2018 гг. были использованы спутниковые данные MODIS Aqua.

Концентрация хлорофилла a — один из показателей биомассы фитопланктона в акватории (Сапрыгин и др., 2018). В водах Азовского моря, помимо значительного содержания фитопланктона, также присутствует большое количество взвесей, как приносимых речным стоком, так и существующих в результате ветрового перемешивания и взмучивания донного ила (Сорокина, Кулыгин, 2013; Aleskerova et al., 2017). В связи с этим оценивать содержание фитопланктона в Азовском море по данным MODIS о концентрации хлорофилла a некорректно (Moses et al., 2012). Однако высокие значения содержания хлорофилла a могут выступать индикатором наличия цианобактерий в водах акватории.

Для детальной выборки явлений цветения фитопланктона рассматривались ежесуточные спутниковые данные MODIS Aqua, MODIS Terra, VIIRS (англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) Suomi-NPP (англ. Suomi National Polar-orbiting Partnership) в оптическом диапазоне. Оценивались особенности цвета, характер структуры цветений, изменения поверхностной неоднородности в отражённой компоненте.

Для характеристики выявленных случаев цветений фитопланктона (цветений цианобактерий включительно) за исследуемый период также использовались спутниковые данные высокого разрешения MSI Sentinel-2 в оптическом диапазоне.

В частности, плавающие цианобактерии (т.е. развивающиеся на поверхности вод) обнаруживались по спутниковым данным оптического диапазона MODIS Aqua. В видимом

диапазоне цианобактерии обнаруживались на RGB-композитах (R- англ. red, красный; G- англ. green, зелёный; B- англ. blue, синий) в псевдонатуральных цветах как нитевидные структуры жёлтого или зелёного цвета. В ближнем инфракрасном диапазоне выявление осуществлялось за счёт увеличенного контраста яркости (Алескерова и др., 2018; Hu, 2009; Kahru, Elmgren, 2014).

Для анализа влияния температурного режима вод акватории на возникновение интенсивных цветений цианобактерий были использованы данные MODIS Aqua.

Воздействие ветра на формирование и деградацию интенсивных цветений цианобактерий определялось с помощью данных о скорости ветра (осреднённых по акватории), полученных на основе оперативного продукта NCEP (англ. National Centers for Environmental Prediction — Национальный центр экологических прогнозов) High Resolution Global Forecast System с пространственным разрешением $1\times1^\circ$. Данные NCEP основаны на расчётах модели Weather Research and Forecasting Non-hydrostatic Mesoscale Model (WRF-NMM).

Для исследования влияния речного пресноводного стока на возникновение цветений цианобактерий использовались среднемесячные данные о стоке рек за период 1998—2016 гг., полученные из архива данных Государственного океанографического института имени Н. Н. Зубова (ГОИН).

Выявление цветений цианобактерий в Азовском море

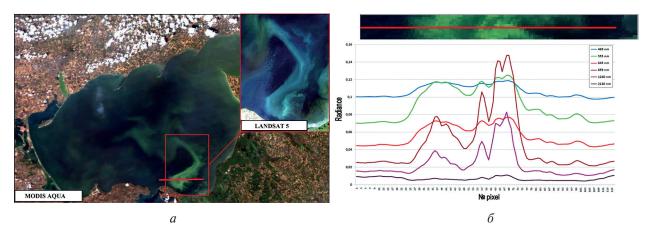
По оптическим спутниковым данным высокого разрешения ежегодно в тёплый период года в акватории Азовского моря регистрируются цветения цианобактерий, как экстремальные, так и слабовыраженные (в виде отдельных нитевидных структур) (см. пример на *puc. 1*).



 $Puc.\ 1.$ Цветение цианобактерий в Таганрогском заливе (фрагмент спутникового изображения Sentinel-2 от 06.10.2018)

Свойство положительной плавучести некоторых типов цианобактерий (например, Nodularia spumigena) позволяет отделять их от иных видов фитопланктона в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне (Алескерова и др., 2018; Ни, 2009; Каhru, Elmgren, 2014). Для демонстрации на рис. 2 (см. с. 169) изображён разрез спектров яркости на различных длинах волн во время интенсивного цветения цианобактерий, построенный по данным Aqua MODIS от 24 июля 2009 г. Разрез пролегал как через зону цветения, так и через область вод, свободных от цветения. На спектре отчётливо видны различия в значениях яркости восходящего излучения и в видимом диапазоне (см. рис. 2), и в ближнем ИК-диапазоне. Выраженный отклик на участке с цветением проявляется ростом значений в зелёном и красном каналах (555 и 645 нм соответственно), но практически отсутствует в синем канале (469 нм). В ближнем

ИК-диапазоне отклик присутствует на длинах волн 859 и 1240 нм, причём на длине волны 859 нм он максимален $(0,15 \text{ Bt}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{crep}^{-1}\cdot\text{мкm}^{-1})$.



Puc. 2. Данные Aqua MODIS, Landsat-5 от 24.07.2009: a — пролегание профиля через область цветения цианобактерий; δ — изменение значений яркости восходящего излучения на разных каналах по ходу профиля

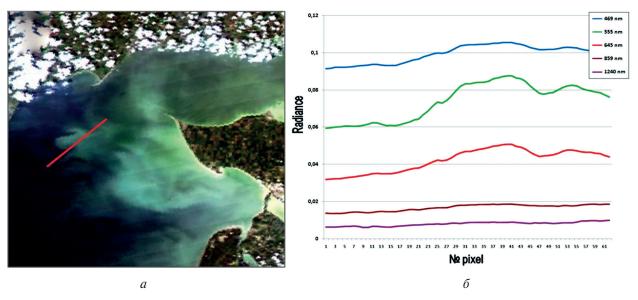


Рис. 3. Данные MODIS Aqua от 30.05.2009: a — пролегание профиля через область цветения (типичного фитопланктона); δ — изменение значений яркости восходящего излучения на разных каналах по ходу профиля

Увеличение контраста яркости в ИК-диапазоне свидетельствует о значительной биомассе фитопланктона на водной поверхности, что является отличительной особенностью цианобактерий и нехарактерно для иных видов фитопланктона.

Другой пример спектров через зону высоких значений хлорофилла a 30 мая 2009 г. изображён на puc. 3. Увеличение яркости на всех каналах (и в видимом диапазоне, и в ближнем инфракрасном) было относительно плавным. В ИК-канале резкого различия между областью цветения и окружающими водами практически не наблюдалось, в отличие от вышеописанного случая (см. puc. 3).

В этой ситуации в совокупности с визуальной оценкой RGB-композита делается вывод, что основу данного цветения составляют иные типичные для акватории виды фитопланктона, без цианобактерий или с их незначительным количеством. Подобным образом были оценены спектры и для иных случаев предполагаемых цветений цианобактерий.

Как правило, цветения цианобактерий формируются преимущественно в приустьевых зонах с высоким содержанием поступающих с речным стоком биогенных элементов. Однако при детальном рассмотрении ежесуточных спутниковых данных в оптическом диапазоне в тёплые периоды 2003—2018 гг. были выявлены случаи интенсивного цветения и в центральной части Азовского моря. Такие цветения отмечались с 2005 по 2010 г., затем в 2012 и 2013 гг. Сроки их существования указаны в *таблице*.

Год	Начало	Окончание	Год	Начало	Окончание	Год	Начало	Окончание
2005	30 мая	11 июня	2007	18 июля	26 июля	2009	22 июля	21 августа
	29 августа	20 сентября		18 июля	5 августа		19 августа	2 сентября
	7 сентября	20 сентября		29 июля	6 августа		24 августа	2 сентября
2006	3 августа	31 августа		21 августа	3 сентября		25 августа	2 сентября
	6 августа	9 августа	2008	28 июня	2 июля	2010	25 июля	15 августа
	15 августа	18 августа		8 июля	26 июля		28 июля	5 августа
	21 августа	31 августа		5 августа	29 августа		3 августа	6 августа
	13 сентября	18 октября		18 августа	20 августа	2012	16 июля	17 июля
	5 октября	14 октября		21 августа	24 августа		16 июля	25 июля
							5 августа	23 августа
							26 августа	29 августа
						2013	13 июля	24 июля

Периоды цветения цианобактерий в Азовском море (исключая Таганрогский залив)

Выявленные случаи цветения цианобактерий также подтверждаются рядом исследований, базирующихся на натурных данных. В 2005, 2007 и 2011 гг. цианобактерии обнаруживались в водах акватории в большом количестве (по отношению ко всей биомассе фитопланктона) в центральной и восточной частях Азовского моря (Матишов и др., 2009; Никитина и др., 2015; Селифонова, 2008; Сухинов, Никитина, 2011), в 2010 г. — в юго-восточном районе (Ясакова, 2015).

В отдельные годы в Азовском море по спутниковым данным наблюдались интенсивные цветения цианобактерий площадью более 8 тыс. км². Продолжительность существования (с момента первого обнаружения цветений по данным дистанционного зондирования до их исчезновения) выявленных интенсивных цветений составила от одного-двух дней до нескольких недель. Максимальная продолжительность наблюдалась в 2005, 2006 и 2009 гг., когда цветения регистрировались на протяжении около одного месяца.

Наиболее часто интенсивные цветения цианобактерий фиксировались в 2006 г., в основном на протяжении августа, несколько реже — с августа по сентябрь и с июля по август. Некоторые цветения наблюдались в мае (2005), июне (2008), сентябре (2005, 2006) и даже в октябре (2006).

В период с 2014 по 2018 г. интенсивные цветения вне Таганрогского залива и прибрежных районов не выявляются. Цианобактерии фиксируются только в виде отдельных нитевидных образований, в основном на границе фронтов (образованных речными стоками) и в зонах конвергенции.

Выявленные районы цветений цианобактерий также соответствуют зонам с наиболее высокими значениями концентрации хлорофилла a. Высокие значения хлорофилла a в определённой степени выступают индикаторами экстремальных цветений фитопланктона. В связи с этим производилась оценка ежегодной изменчивости концентрации хлорофилла a по районам акватории. Как ежегодно (с 2003 по 2018 г.), так и в среднем за указанный период наиболее высокая концентрация хлорофилла a характерна для Таганрогского залива и прилегающих областей — до 25 мг/м³ и более ($puc.\ 4$, см. с. 171).

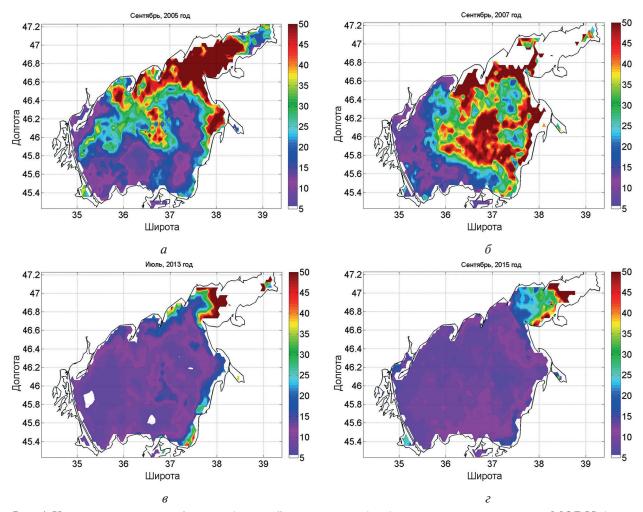


Рис. 4. Концентрация хлорофилла a (осреднённая за месяц) в Азовском море по данным MODIS Aqua: a- в сентябре 2005 г.; b- в сентябре 2007 г.; b- в июле 2013 г.; b- в сентябре 2015 г.



Рис. 5. Концентрация хлорофилла a (осреднённая за исследуемый период) по данным MODIS Aqua: a- более 20 мг/м³; b- более 30 мг/м³

Для анализа пространственного распределения экстремальных значений хлорофилла a были выделены области (осреднённые за исследуемый период 2003—2018 гг.), в которых его содержание превышало 20 и 30 мг/м³ (рис. 5а и δ соответственно). Отмечено, что концентрация хлорофилла a от 20 мг/м³ и выше характерна для Таганрогского залива, приустьевых областей и северо-восточной части моря. Более высокие значения (30 мг/м³ и выше) регулярно наблюдаются в Таганрогском заливе, в зонах влияния речных плюмов и зонах конвергенции

вод. Такое распределение концентрации хлорофилла a совпадает и с выявленными областями цветения цианобактерий.

Влияние гидрометеорологических факторов на развитие цветений цианобактерий в Азовском море

Для определения благоприятных условий возникновения и эволюции интенсивных цветений цианобактерий в Азовском море рассматривались данные о температуре поверхностного слоя воды, ветровом режиме и речном стоке. Анализ показал, что одним из факторов, способствующих развитию интенсивных цветений цианобактерий, является высокий прогрев вод.

Для Азовского моря характерно начало интенсивного прогрева вод в весенний период (апрель — май) с достижением максимума во второй половине лета (июль — август), когда в отдельные периоды температура поверхностного слоя вод достигает $30 \, ^{\circ}$ C (рис. 6).

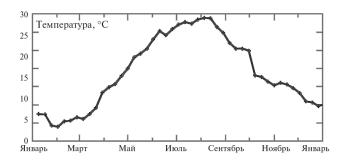


Рис 6. Годовой ход температуры поверхностного слоя вод Азовского моря по данным MODIS Aqua на примере 2010 г.

Цветения цианобактерий также преимущественно формировались в июле и августе на фоне прогрева вод от $24\,^{\circ}$ С и выше. Однако при анализе формирования таких цветений наблюдались некоторые особенности. Так, в частности, в 2005 и 2006 гг. интенсивные цветения цианобактерий возникали при температуре вод порядка $18-20\,^{\circ}$ С (*puc. 7*).

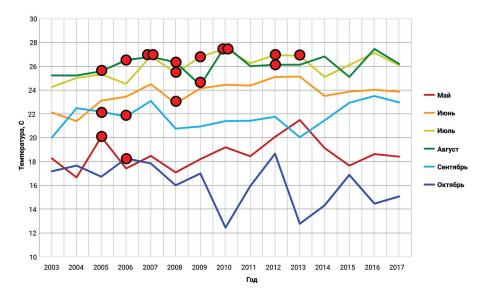


Рис. 7. Время возникновения цветений цианобактерий (отмечено красными кружками) в Азовском море (исключая Таганрогский залив) с мая по октябрь с 2003 г. по 2017 г. по данным о температуре поверхностного слоя вод MODIS Aqua

Ещё одним важным фактором, влияющим в определённой мере на эволюцию цветений цианобактерий, является ветер (его скорость и устойчивость) (Wynne et al., 2010). Так

как оптимальное развитие цианобактерий осуществляется на поверхности, интенсивное ветровое влияние, вызывающее активное перемешивание поверхностного слоя вод (а в случае с Азовским морем с учётом его мелководности — и до дна), в той или иной степени подавляет развитие цветения. Напротив, невысокие и устойчивые скорости ветра становятся благоприятным фактором для возникновения и эволюции цианобактерий, так как поверхностное перемешивание вод отсутствует или не выражено.

При рассмотрении частных случаев подтверждается роль ветра в формировании цветений цианобактерий. Например, в 2007 г., когда интенсивное цветение цианобактерий существовало с 18 июля по 5 августа (puc.~8).

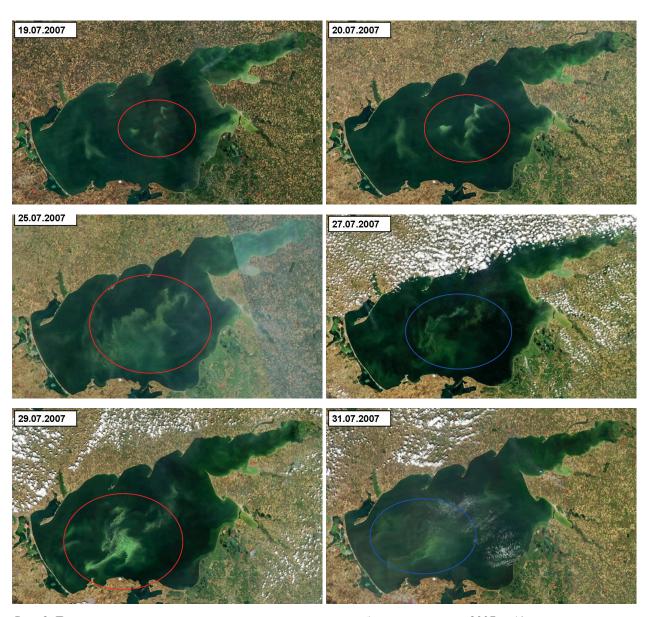


Рис. 8. Динамика развития интенсивного цветения цианобактерий в июле 2007 г. (фрагменты спутниковых снимков Aqua MODIS). Красным цветом выделена стадия развития цветения цианобактерий, синим — стадия деградации

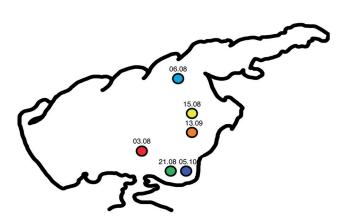
Так, на снимке от 19 июля наблюдается начальная стадия цветения в центральной части моря. В последующие дни цветение цианобактерий интенсивно развивается (снимки от 20 и 25 июля) и занимает значительную часть акватории в условиях слабого влияния ветра (скорости составляют около 2–4 м/с) (рис. 9, см. с. 174). В дальнейшем цветение несколько

деградирует (снимок от 27 июля) в результате локального ветрового всплеска (скорости возросли до 6 м/с), но продолжает развиваться при стабилизации ветровых условий (снимки от 29 и 31 июля). После повторного повышения скорости ветра в начале августа цветение прекращает своё существование.



Рис. 9. Изменчивость скорости ветра над акваторией Азовского моря в июле и августе 2007 г. по данным оперативного продукта NCEP. Красным прямоугольником отмечен период существования цветения цианобактерий, синим — стадии деградации

Подобная динамика развития цианобактерий в Азовском море (вне Таганрогского залива), когда ветер в определённой степени влияет на формирование и разрушение интенсивных цветений, наблюдается и в иные годы. Так, например, в 2006 г. обширные цветения на удалённых от прибрежья пространствах Азовского моря регистрировались по спутниковым оптическим измерениям в августе, сентябре и октябре (отдельные формирования на протяжении некоторого времени существовали одновременно). При этом эти цветения возникали в различных районах акватории. Первый случай интенсивного цветения наблюдался с 3 по 31 августа в центральной части акватории (отмечен красным цветом на рис. 10). Параллельно с 6 по 9 августа развивалось цветение в северо-восточном районе моря (на выходе из Таганрогского залива, отмечено синим цветом), с 15 по 18 августа — в восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом) и с 21 по 31 августа — в юго-восточной части моря (отмечено жёлтым цветом моря (отмечено жёлтым цветом моря (отмечено жёлтым моря (отмечено жёлтым моря (отмечено жёлтым моря моря (отмечено жёлт



мечено зелёным цветом); далее цветения существовали с 13 сентября по 18 октября в восточном районе и с 5 по 14 октября — на юго-западе акватории (отмечено оранжевым и фиолетовым цветом соответственно) (см. рис. 10).

Рис. 10. Схема расположения интенсивных цветений цианобактерий в Азовском море в 2006 г. без учёта Тагонрогского залива (указаны даты с момента обнаружения цветений по оптическим данным MODIS Aqua)



Puc. 11. Изменчивость скорости ветра над акваторией Азовского моря в августе 2006 г. по данным оперативного продукта NCEP High Resolution Global Forecast System. Прямоугольниками выделены периоды цветений цианобактерий

Ветер с июля по октябрь 2006 г. характеризуется чередованием периодов затишья с периодами высоких скоростей. Так, можно выделить достаточно длительный временной интервал с низкими и устойчивыми скоростями (скорость ветра не превышает 5-7 м/с) с 24 июля по 8 августа (присутствует кратковременный рост скорости до 8 м/с 28 июля), в течение которого формируются два цветения цианобактерий — 3 и 6 августа.

Также малые скорости ветра (хотя и непродолжительные) регистрировались 15 августа (дата формирования третьего интенсивного цветения) и с 19 по 22 августа (цветение возникает 21 августа) (рис. 11). В сентябре периодом сравнительного затишья можно назвать интервал с 7 по 12 сентября (цветение появляется 13 сентября), в октябре — с 2 по 5 октября (цветение возникает 5 октября) (см. рис. 11).

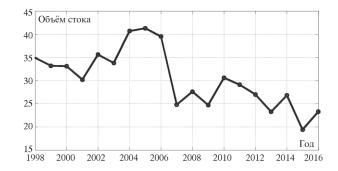
Менее отчётливо проявлена связь ветра с процессом деградации цветений цианобактерий. Хотя почти в каждом индивидуальном случае разрушение цветения происходит при усилении ветра (до скоростей от 8—10 м/с и выше), два случая выделяются отсутствием связи. Первый — продолжительное интенсивное цветение с 3 по 21 августа и второй — также продолжительное цветение с 13 сентября по 18 октября.

При детальном рассмотрении этих двух случаев обнаруживается, что продолжительное цветение в августе было достаточно обширным и хорошо развитым: при интенсивном воздействии ветра формирование цианобактерий частично распадалось и заглублялось, но не исчезало полностью, а при наступлении благоприятных условий оно вновь развивалось.

Помимо рассмотренных выше условий, вносящих вклад в общее развитие фитопланктона, ещё одним фактором, регулирующим частоту возникновений цветений цианобакте-

рий, является воздействие речного стока. На *рис. 12* представлена изменчивость общего объёма стока рек Дон и Кубань в Азовское море с 1998 по 2016 г. по данным, полученным в ГОИН.

Рис. 12. Межгодовая изменчивость объёма речного стока в акваторию Азовского моря по данным ГОИН



В течение рассматриваемого периода отмечается значительное сокращение поступающих речных вод, что связано как с антропогенным воздействием (активное хозяйственное освоение рек Дон и Кубань) (Михайлов, Магрицкий, 2008; Селютин и др., 2009), так и с естественными факторами (изменение климатических условий) (Илич и др., 2018).

Хотя при сопоставлении спутниковых данных об интенсивных цветениях цианобактерий с данными об изменчивости речного стока прямой связи не выявлено, всё же наблюдается некоторое соответствие. Как было описано ранее, цветения цианобактерий в Азовском море наблюдались с 2005 по 2010 г. и в 2012—2013 гг. Максимальный объём стока отмечался с 2004 по 2006 г. и составлял более 40 км 3 /год. Действительно, в 2005 и 2006 гг. зафиксированы продолжительные и выраженные случаи интенсивных цветений цианобактерий, которые соответствуют высоким значениям объёма речного стока. В 2007 г. сток существенно сокращается до 25 км 3 /год, затем в 2008 г. наблюдается незначительное увеличение объёма стока. Далее, с 2010 г. объём речного стока уменьшается с 30 до \sim 22 км 3 /год в 2016 г. Анализ цветений цианобактерий также показывает, что в последующий период интенсивные цветения цианобактерий фиксировались значительно реже.

В первую очередь это приводит к изменению количества и соотношения приносимых со стоком рек биогенных элементов, необходимых для существования и развития многих видов фитопланктона, в том числе и цианобактерий (Ильичев и др., 2015). Кроме этого, при изменении объёма речного стока в Азовское море изменяется солёность вод акватории, что в дальнейшем способствует перестройке видового состава фитопланктона (Ильичев и др., 2015; Косенко и др., 2017; Сафронова, Лужняк, 2016). В условиях сокращения объёма поступающего пресноводного стока и осолонения акватории наблюдается значительное уменьшение биомассы преснолюбивых цианобактерий (Корпакова и др., 2014; Мирзоян и др., 2015).

Таким образом, сокращение объёма поступающих речных вод может быть одной из причин уменьшения наблюдаемых случаев цветений цианобактерий в Азовском море.

Заключение

В Азовском море ежегодно наблюдаются цветения фитопланктона в течение тёплого времени. За исследуемый период 2003—2018 гг. по оптическим данным среднего и высокого разрешения в акватории, исключая Таганрогский залив, были выявлены случаи интенсивного цветения цианобактерий с 2005 по 2010 г., затем в 2012 и 2013 гг. Длительность таких цветений в центральной части акватории варьируется от нескольких дней до нескольких недель. Максимальная продолжительность цветений цианобактерий наблюдалась в 2005, 2006 и 2009 гг.

В большем количестве и чаще цветения цианобактерий выявляются в северо-восточном районе Азовского моря, а также в приустьевых областях акватории, что обуславливается влиянием речного пресноводного стока, несущего биогенные элементы.

Наиболее часто интенсивные цветения в Азовском море формируются в июле и августе, когда наблюдается максимальный прогрев воды (от $24-26\,^{\circ}\mathrm{C}$ и выше). Самое раннее цветение зарегистрировано в мае $2005\,\mathrm{r}$. при температуре вод около $20\,^{\circ}\mathrm{C}$, а наиболее позднее возникло в октябре $2006\,\mathrm{r}$. (температура вод составляла порядка $18\,^{\circ}\mathrm{C}$).

Подтверждена роль ветровых условий в формировании интенсивных цветений цианобактерий. Было установлено, что устойчивые низкие значения скорости ветра становятся благоприятным условием для развития цветений, тогда как возрастание значений скорости ветра от 8-10~м/c и более действуют на них подавляюще и приводит к их разрушению.

При рассмотрении данных о межгодовой изменчивости пресноводного стока было отмечено, что сокращение объёма поступающих речных вод в акваторию может быть одной из причин уменьшения наблюдаемых случаев интенсивных цветений цианобактерий в Азовском море.

Исследование ветровых и температурных условий Азовского моря, а также межгодовой изменчивости объёма поступающего речного стока выполнялось при поддержке гран-

та Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 18-05-80025. Обработка и анализ спутниковых данных выполнены при поддержке гранта РФФИ № 20-35-70034.

Литература

- 1. Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В., Лишаев П.Н., Мизюк А.И. Цветение цианобактерий в Азовском море по данным сенсоров спутников серии Landsat // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 52—64.
- 2. *Василенко Н. В.* Цветение фитопланктона в Азовском море по данным дистанционного зондирования // Ландшафтная география в XXI веке. 2018. С. 477–479.
- 3. *Василенко Н. В.*, *Медведева А. В.* Фитопланктон в водах Азовского моря характеристика по данным дистанционного зондирования // Моря России: методы, средства и результаты исследований. 2018. С. 219.
- 4. *Василенко Н. В.*, *Медведева А. В.* Аномальные цветения сине-зеленых водорослей в Азовском море // Материалы 4-й Всероссийской научной конф. молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана». Севастополь. 22—26 апр. 2019. Севастополь: Изд-во Морского гидрофиз. ин-та РАН, 2019. С. 247—248.
- 5. *Вершинин А. О.*, *Орлова Т. Ю*. Токсичные и вредные водоросли в прибрежных водах России // Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 568–582.
- 6. *Гаргопа Ю. М.* Сопряженность крупномасштабных изменений биопродуктивности Азовского моря и гидрометеорологических условий ее формирования // Изв. высш. учеб. заведений. Северо-Кав-казский регион. Естественные науки. 2003. № 2(122). С. 78–82.
- 7. *Гершанович Д. Е., Гоптарев Н. П., Затучная Б. М., Симонов А. И.* Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море. СПб.: Гидрометеозидат, 1991. 235 с.
- 8. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
- 9. *Илич В. П., Киреева М. Б., Сазонов А. А., Михайлюкова П. Г., Харламов М. А.* Особенности формирования маловодных периодов в бассейне реки Дон (на примере маловодья 2007—2015 гг.) // Международная научная конф. «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии»: сб. докл. Санкт-Петербург. 28—31 марта 2018. СПб., 2018. С. 877—881.
- 10. Ильичев В. Г., Дашкевич Л. В., Кулыгин В. В. Эволюционно-устойчивые характеристики Азовского моря при вариации донского стока // Управление большими системами: сб. тр. 2015. № 55. С. 259—279.
- 11. *Ковалева Г. В.* Фитопланктон Азовского моря и прилегающих водоемов // Азовское море в конце XX—начале XXI веков: геоморфология, осадконакопление, пелагические сообщества. Т. 10. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2008. С. 134—223.
- 12. *Ковалева Г. В.* История изучения микроводорослей Азовского моря: Обзор // Наука Юга России. 2016. Т. 12. № 3. С. 51–66.
- 13. *Ковалева Г. В.* Проблема «цветения» воды в Азовском море // Тр. Южного науч. центра Российской акад. наук. 2020. Т. 8. С. 122-148.
- 14. *Корпакова И. Г.*, *Афанасьев Д. Ф.*, *Цыбульский И. Е.*, *Барабашин Т. О.*, *Белова Л. В.*, *Налетова Л. Ю.*, *Бычкова М. В.* Особенности развития биологических сообществ юго-восточной части Азовского моря в 2013 году // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 11. С. 18—25.
- 15. *Косенко Ю. В.*, *Барабашин Т. О.*, *Баскакова Т. Е.* Динамика гидрохимических характеристик Азовского моря в современный период осолонения // Изв. высш. учеб. заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2017. № 3-1(195-1). С. 76—82.
- 16. *Матишов Г. Г.*, *Матишов Д. Г.*, *Степаньян О. В.*, *Аксёнов Д. С.* Комплексные исследования Азовского, Черного и Каспийского морей на научно-исследовательском судне «Денеб» в 2007 г. // Океанология. 2009. Т. 49. №. 2. С. 313—318.
- 17. *Медведева А. В.*, *Кубряков А. А.*, *Соловьев Д. М.*, *Станичный С. В.* Аномальные цветения фитопланктона в южной части Каспийского моря // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 276.
- 18. *Мирзоян З.А.*, *Сафронова Л.М.*, *Афанасьев Д.Ф.*, *Фроленко Л.Н.*, *Мартынюк М.Л.* Особенности развития биологических сообществ и кормовой базы планктоноядных и бентосоядных рыб в условиях осолонения Азовского моря (2007—2014 гг.) // Вопросы сохранения биоразнообразия водных объектов. 2015. С. 237—243.
- 19. *Михайлов В. Н.*, *Магрицкий Д. В.* Современный водный баланс дельты Кубани и расчет притока кубанских вод в Азовское море // Тр. Гос. океанограф. ин-та. 2008. № 211. С. 222—248.
- 20. *Никитина А. В.*, *Руднева Т. В.*, *Камышникова Т. В.*, *Дурягина В. В.*, *Бокарева Т. А*. К вопросу о формировании заморных зон в восточной части Азовского моря // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 1785.

- 21. *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. 751—762.
- 22. Сафронова Л. М., Лужняк О. Л. Трансформация фитопланктона Азовского моря в условиях современного осолонения // Морские биологические исслед.: достижения и перспективы: сб. материалов Всероссийской научно-практ. конф. с международным участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. С. 417—420.
- 23. *Селифонова Ж. П.* Функционирование экосистемы Азовского моря // Биология внутренних вод. 2008. № 3. С. 3-7.
- 24. *Селютин В. В.*, *Бердников С. В.*, *Кулыгин В. В.* Сравнительный анализ сценариев водопользования на примере водохозяйственной системы Нижнего Дона // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 2. С. 240—252.
- 25. Сорокина В. В., Бердников С. В. К оценке баланса органического вещества в Азовском море // Всероссийская конф. «Экология. Экономика. Информатика»: сб. статей. Т. 1: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 7—12 сент. 2014. Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального ун-та, 2014. С. 236—242.
- 26. *Сорокина В. В., Бердников С. В.* Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 6. С. 670–684.
- 27. *Сорокина В. В., Кулыгин В. В.* Долговременная изменчивость относительной прозрачности вод Азовского моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 3. С. 324—324.
- 28. *Сухинов А. И.*, *Никитина А. В.* Математическое моделирование и экспедиционные исследования качества вод в Азовском море // Изв. Южного федерального ун-та. Технические науки. 2011. Т. 121. № 8. С. 62—73.
- 29. *Ясакова О. Н.* Динамика фитопланктона в районе Темрюкского залива Азовского моря // Ботанический журн. 2015. Т. 100. № 10. С. 1015-1029.
- 30. *Aleskerova A.A.*, *Kubryakov A.A.*, *Goryachkin Y.N.*, *Stanichny S. V.* Propagation of waters from the Kerch Strait in the Black Sea // Physical Oceanography. 2017. No. 6. P. 47–57.
- 31. *Havens K. E., Ji G., Beaver J. R., Teacher C. E., Fulton R. S.* Dynamics of cyanobacteria blooms are linked to the hydrology of shallow Florida lakes and provide insight into possible impacts of climate change // Hydrobiologia. 2019. V. 829. No. 1. P. 43–59.
- 32. *Hu C*. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. No. 10. P. 2118–2129.
- 33. *Kahru M.*, *Elmgren R*. Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea // Biogeosciences, 2014. V. 11. No. 13. P. 3619–3633.
- 34. *Moses W.J.*, *Gitelson A.A.*, *Berdnikov S.*, *Saprygin V.*, *Povazhnyi 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.
- 35. Sayers M., Fahnenstiel G. L., Shuchman R. A., Whitley M. Cyanobacteria blooms in three eutrophic basins of the Great Lakes: a comparative analysis using satellite remote sensing // Intern. J. Remote Sensing. 2016. V. 37. No. 17. P. 4148–4171.
- 36. Wynne T. T., Stumpf R. P., Tomlinson M. C., Dyble J. Characterizing a cyanobacterial bloom in western Lake Erie using satellite imagery and meteorological data // Limnology and Oceanography. 2010. V. 55(5). P. 2025–2036.

Features of cyanobacteria blooms in the central part of the Sea of Azov from satellite data

N. V. Vasilenko, A. V. Medvedeva, A. A. Aleskerova, A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mail: nadinkot.nk@gmail.com

In the central part of the Sea of Azov for the period 2003–2018, cases of intense cyanobacteria blooming were detected in satellite data of high and medium resolution. Such events were observed from 2005 to 2010, and in 2012–2013. The longest of these blooms occurred in 2005, 2006, and 2009. The influence of temperature and wind conditions as well as incoming river discharge on the development of

these cyanobacterial blooms is considered. Intense blooms were most often observed at high temperatures of the surface water layer (from 24–26 °C), but in 2005 and 2006 they were also observed at water temperatures of 18–20 °C. It was found that sustained low wind speeds are favorable conditions for the evolution of intense cyanobacterial blooms. An increase in wind speed values from 8–10 m/s and above causes their degradation. A decrease in the volume of river discharge may be one of the reasons for a decrease in the incidence of intense blooms in the later years of the study period.

Keywords: Azov Sea, cyanobacteria, MODIS, Taganrog Bay

Accepted: 12.07.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-166-180

References

- 1. Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Lishaev P.N., Mizyuk A.I., Cyanobacteria Bloom in the Azov Sea According to Landsat Data, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 1416–1426.
- 2. Vasilenko N. V., Algal bloom in Azov Sea by the data of remote sensing, *Landshaftnaya geografiya v XXI veke*, 2018, pp. 477–479 (in Russian).
- 3. Vasilenko N.V., Medvedeva A.V., Phytoplankton in the waters of the Sea of Azov characteristics based on remote sensing data, In: *Morya Rossii: metody, sredstva i rezul'taty issledovanii*, 2018, p. 219 (in Russian).
- 4. Vasilenko N. V., Medvedeva A. V., Anomalous blooms of blue-green algae in the Sea of Azov, *Kompleksnye issledovaniya Mirovogo okeana* (Integrated research of the World Ocean), Proc. 4th All-Russia Science Conf. Young Scientists, Sevastopol, 22–26 Apr., 2019, Sevastopol, 2019, pp. 247–248 (in Russian).
- 5. Vershinin A. O., Orlova T. Yu., Toxic and harmful algae in the coastal waters of Russia, *Oceanology*, 2008, Vol. 48, No. 4, pp. 524–537.
- 6. Gargopa Yu. M., The conjugation of large-scale changes in the biological productivity of the Sea of Azov and the hydrometeorological conditions of its formation, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*. *Severo-Kavkazskii region*. *Estestvennye nauki*, 2003, No. 2(122), pp. 78–82 (in Russian).
- 7. Gershanovich D. E., Goptarev N. P., Zatuchnaya B. M., Simonov A. I., *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR*, *T. 5*, *Azovskoe more* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR, Vol. 5, Azov sea), Saint Petersburg: Gidrometeozidat, 1991, 235 p. (in Russian).
- 8. Dobrovolskii A. D., Zalogin B. S., *Morya SSSR* (Seas of the USSR), Moscow: Izd. MGU, 1982, 192 p. (in Russian).
- 9. Ilich V. P., Kireeva M. B., Sazonov A. A., Mikhailyukova P. G., Kharlamov M. A., The features of droughts formation in the Don River Basin (the case of drought in 2007–2015), *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Tret'i Vinogradovskie chteniya. Grani gidrologii"* (Intern. Scientific Conf. "Third Vinogradov Readings. Facets of Hydrology"), Proc., Saint Petersburg, 28–20 March, 2018, Saint Petersburg, 2018, pp. 877–881 (in Russian).
- 10. Il'ichev V.G., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Evolutionary stable characteristics of the Sea of Azov with variation of the Don River runoff, In: *Upravlenie bol'shimi sistemami*, 2015, No. 55, pp. 259–279 (in Russian).
- 11. Kovaleva G.V., Phytoplankton of the Azov Sea and adjacent basins, In: *Azovskoe more v kontse XX nachale XXI vv.: geomorfologiya*, *osadkonakoplenie*, *pelagicheskie soobshchestva*, *Vol. 10*, Apatity: Izd. KNTs RAN, 2008, pp. 134–223 (in Russian).
- 12. Kovaleva G. V., The history of the sea of Azov microalgae studies. The review, *Nauka Yuga Rossii*, 2016, Vol. 12, No. 3, pp. 51–66 (in Russian).
- 13. Kovaleva G. V., Problem of water bloom in the sea of Azov, *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2020, Vol. 8, pp. 122–148 (in Russian).
- 14. Korpakova I., Afanas'yev D., Tsybul'skyi I., Barabashin T., Belova L., Naletova L., Bychkova M., Special features of biological communities progression in the south-eastern part of the sea of Azov in 2013, *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2014, No. 11, pp. 18–25 (in Russian).
- 15. Kosenko Yu. V., Barabashin T. O., Baskakova T. E., Dynamics of hydrochemical characteristics of the Sea of Azov in the modern period of salinization, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*, *Severo-Kavkazskii region*, *Estestvennye nauki*, 2017, No. 3-1(195-1), pp. 76–82 (in Russian).
- 16. Matishov G. G., Matishov D. G., Stepanian O. V., Aksenov D. S., Complex studies of the Azov, Black, and Caspian seas performed on the Deneb survey vessel in 2007, *Oceanology*, 2009, Vol. 49, No. 2, pp. 290–295.
- 17. Medvedeva A. V., Kubryakov A. A., Solov'ev D. M., Stanichnyi S. V., Anomalous phytoplankton blooms in the southern part of the Caspian Sea, *15-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy*

- distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (15th All-Russia Open Conf. "Modern Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of abstr., Moscow: IKI RAN, 2017, p. 276 (in Russian).
- 18. Mirzoyan Z.A., Safronova L.M., Afanasyev D.F., Frolenko L.N., Martynyuk M.L., Features of development of biological communities and feeding base of planktivorous and benthophagic fishes in conditions of the Azov Sea salinization (2007–2014), *Voprosy sokhraneniya bioraznoobraziya vodnykh ob"ektov*, 2015, pp. 237–243 (in Russian).
- 19. Mikhailov V. N., Magritskii D. V., Water balance of Kuban river delta and evaluation of Kuban water inflow into the Azov Sea, *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*, 2008, No. 211, pp. 222–248 (in Russian).
- 20. Nikitina A. V., Rudneva T. V., Kamyshnikova T. V., Duriagina V. V., Bokareva T. A., On the problem of anoxia formation on the sea of Azov eastern part, *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, No. 1-1, p. 1785 (in Russian).
- 21. Saprygin V. V., Berdnikov S. V., Kulygin V. V., Dashkevich L. V., Mestetskiy L. M., Spatial distribution and seasonal dynamics of the chlorophyll a concentration in the sea of Azov based on MERIS images, *Oceanology*, 2018, Vol. 58, No. 5, pp. 689–699.
- 22. Safronova L. M., Luzhnyak O. L., Changes in the Azov Sea phytoplankton under present-day conditions of salinization, *Morskie biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy* (Marine biological research: achievements and prospects), Proc. All-Russia Scientific-Practical Conf. with Intern. Participation, Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2016, pp. 417–420 (in Russian).
- 23. Selifonova J. P., Functioning of the Azov Sea Ecosystem, *Biologiya vnutrennikh vod*, 2008, No. 3, pp. 3–7 (in Russian).
- 24. Selyutin V.V., Berdnikov S.V., Kulygin V.V., Comparative analysis of water-use scenarios for lower Don water management system, *Water Resources*, 2009, Vol. 36, No. 2, pp. 225–237.
- 25. Sorokina V.V., Berdnikov S.V., On the assessment of the balance of organic matter in the Sea of Azov, *Ekologiya. Ekonomika. Informatika*, *T. 1: Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh system* (Ecology. Economy. Informatics, Vol. 1: Systems analysis and modeling of economic and ecological systems), Proc. All-Russia Conf., 7–12 Sept., 2014, Rostov-on-Don: Izd. Yuzhnogo Federal'nogo universiteta, 2014, pp. 236–242 (in Russian).
- 26. Sorokina V.V., Berdnikov S.V., Nutrient loading of the Don and Kuban on the ecosystem of the sea of Azov, *Water Resources*, 2018, Vol. 45, No. 6, pp. 920–934.
- 27. Sorokina V.V., Kulygin V.V., Long-term variability of the water transparency (Secchia depth) in the sea of Azov, *Oceanology*, 2013, Vol. 53, No. 3, pp. 287–293.
- 28. Sukhinov A. I., Nikitina A. V., Mathematical modelling and expeditional investigations of water quality in Azov Sea, *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta*. *Tekhnicheskie nauki*, 2011, Vol. 121, No. 8, pp. 62–73 (in Russian).
- 29. Yasakova O. N., Phytoplankton dynamics in the Temryuk bay of the Azov Sea, *Botanicheskii zhurnal*, 2015, Vol. 100, No. 10, pp. 1015–1029 (in Russian).
- 30. Aleskerova A. A., Kubryakov A. A., Goryachkin Y. N., Stanichny S. V., Propagation of waters from the Kerch Strait in the Black Sea, *Physical Oceanography*, 2017, No. 6, pp. 47–57.
- 31. Havens K. E., Ji G., Beaver J. R., Teacher C. E., Fulton R. S., Dynamics of cyanobacteria blooms are linked to the hydrology of shallow Florida lakes and provide insight into possible impacts of climate change, *Hydrobiologia*, 2019, Vol. 829, No. 1, pp. 43–59.
- 32. Hu C., A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, No. 10, pp. 2118–2129.
- 33. Kahru M., Elmgren R., Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea, *Biogeosciences*, 2014, Vol. 11, No. 13, pp. 3619–3633.
- 34. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Saprygin V., Povazhnyi 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.
- 35. Sayers M., Fahnenstiel G. L., Shuchman R. A., Whitley M., Cyanobacteria blooms in three eutrophic basins of the Great Lakes: a comparative analysis using satellite remote sensing, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, No. 17, pp. 4148–4171.
- 36. Wynne T.T., Stumpf R.P., Tomlinson M.C., Dyble J., Characterizing a cyanobacterial bloom in western Lake Erie using satellite imagery and meteorological data, *Limnology and Oceanography*, 2010, Vol. 55(5), pp. 2025–2036.