

Интенсивное развитие цианобактерий в южной части Каспийского моря

А. В. Медведева, С. В. Станичный, А. А. Кубряков

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия

E-mail: *Suomi-npp@mail.ru*

На основе оптических спутниковых данных среднего разрешения с 2001 по 2022 г. выделены случаи интенсивного развития цианобактерий в южной части Каспийского моря — преимущественно в июле и августе в 2005, 2008, 2010, 2017 и 2018 гг., в 2009 г. интенсивное развитие цианобактерий наблюдалось в сентябре и начале октября, а в 2021 г. первые признаки интенсивного развития цианобактерий регистрировались в июне. Для всех отмеченных случаев выделены стадии развития и описаны пространственно-временные изменения. Также проанализированы фоновые условия, которые могли способствовать интенсивному развитию цианобактерий: изменения температуры поверхности моря, скорость и устойчивость ветра в летний период и повышение концентрации хлорофилла *a* в периоды, предшествующие развитию цианобактерий. В частности, отмечено, что интенсивное развитие цианобактерий осуществляется преимущественно в условиях высокого прогрева поверхностных вод на фоне преобладания слабых и устойчивых ветров. Вероятно, дополнительным источником биогенных элементов становится жизнедеятельность иных видов фитопланктона: перед периодами интенсивного развития цианобактерий регистрируется более высокая концентрация хлорофилла *a*. Кроме того, отмечено повышение температуры поверхности моря в области интенсивного развития цианобактерий: по данным радиометра AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) спутника NOAA-18 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США), температурный контраст между районом с плавающими цианобактериями и окружающими районами может превышать 4 °C.

Ключевые слова: Южный Каспий, цианобактерии, интенсивное развитие цианобактерий, температура поверхности, скорость ветра, концентрация хлорофилла *a*, оптические данные, спутниковые данные, *Nodularia Spumigena* Mert.

Одобрена к печати: 15.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-253-268

Введение

Каспийское море в соответствии с физико-географическими и геолого-геоморфологическими признаками подразделяют на три части: Северный, Средний и Южный Каспий (*рис. 1*, см. с. 254). Первая характерная особенность Северного Каспия — расположение в пределах шельфовой зоны, что обуславливает малую глубину водоёма в этой части (преимущественно до 5 м, максимальные — не более 15–20 м). Вторая особенность связана с поступлением большого количества пресных вод: более 80 % общего стока вносится реками (в основном Волгой) в северную часть моря (Волошко и др., 2010). Южный Каспий, напротив, отличается выраженной глубиной (Южнокаспийская котловина — 1025 м (Каспийское..., 1986)) и незначительным вкладом речных стоков (около 3–5 % от общего стока (Вершинин, Моручков, 2003)).

В разных районах Каспийского моря регулярно (в северной части) или эпизодически (в других районах) наблюдается выраженное развитие цианобактерий (рода *Nodularia Spumigena* Mert.). Эти ситуации требуют мониторинговых мероприятий, так как случаи интенсивного развития (цветения) цианобактерий увеличивают риск эвтрофикации вод бассейна и способствуют формированию вторичного загрязнения водоёма: *Nodularia Spumigena* Mert. развивается в поверхностном слое вод и на поверхности (препятствует поступлению солнечной радиации в нижележащие слои), выделяет нодулярин с гепатотоксическим эффектом (негативное влияние на беспозвоночных, рыб, теплокровных) (Kopylov et al., 2010; Oyama

et al., 2016). В процессе исследования проявления цианобактерий в границах водосборного бассейна Каспийского моря указывалось на их развитие в водах Волги и вынос в Северный Каспий. В частности, выявлены высокое содержание биогенных элементов в водохранилищах Волжского каскада, ухудшение их санитарного состояния и проблема вторичного загрязнения (Богданов и др., 2004).



Рис. 1. Южная часть Каспийского моря: схема расположения географических объектов, упоминаемых в статье

В водах Куйбышевского вдхр. случаи выраженного цветения цианобактерий регистрировались в 1989 и 1990 гг. (Zakharkov et al., 2007). В ранних исследованиях не обнаруживается существенного влияния гидрометеорологических условий на изменения концентрации хлорофилла *a*, но отмечается связь с характеристиками ветра, прогревом вод и понижением их уровня.

В 2009 г. был выполнен отбор проб во время рейса в южной части Каспийского моря (Korelevich et al., 2017). Их анализ показал, что фитопланктон группы *Cyanophyta* составил 98 и 96 % численности и биомассы фитопланктона соответственно. В группе *Cyanophyta* выделяли два вида: *Oscillatoria* sp. и *N. Spumigena* (*Nodularia Spumigena* Mert.), причём последний имел наибольшую численность и массу — более 99 %. Для рода *N. Spumigena* типично развитие в солоноватых водах (Knysh et al., 2008).

В общем виде фоновые условия северной части Каспийского моря становятся близкими к оптимальным для интенсивного развития цианобактерий (и *N. Spumigena*, в частности): солёность вод не превышает 10–11 ‰, глубина ограничивается 5–20 м, биогенные элементы и цианобактерии также вносятся водами Волги. В южной части бассейна имеются некоторые отличия: несколько более высокая солёность (до 13 ‰) (Гидрометеорология..., 1992), выраженная глубина, значительно меньший суммарный объём стока рек. В работе (Nasrollahzadeh et al., 2011) отмечается, что для интенсивного развития цианобактерий в Южном Каспии благоприятными считаются сочетание низкого соотношения растворённого неорганического азота и растворённого неорганического фосфора в поверхностном слое вод, низкая скорость ветра, отсутствие осадков и повышенный уровень солнечной радиации.

В настоящей работе предлагается оценка случаев интенсивного развития цианобактерий с 2001 по 2022 г. в южной части Каспийского моря на основе анализа оптических спутниковых изображений среднего пространственного разрешения.

Материалы и методы

Выделение зон с интенсивным развитием цианобактерий может проводиться как автоматически с использованием комбинаций каналов (Kubryakov et al., 2021; Wynne et al., 2008), так и визуально при построении RGB-композиций (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий) (Aleskerova et al., 2019).

Выявление случаев интенсивного развития фитопланктона осуществлялось с помощью оптических спутниковых данных среднего разрешения (SeaWIFS (*англ.* Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) OrbView-2, MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua, MODIS Terra, AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer) NOAA-18 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США)) за период с апреля по ноябрь с 2001 по 2022 г. Указанные сцены с отсутствующей или незначительной облачностью использовались для построения RGB-композигов в псевдонатуральных цветах, на которых в пределах южной части Каспийского моря визуально определялись области от зелёного до жёлто-зелёного цвета (т. е. с увеличением значений яркости восходящего излучения на длине волны около 555 нм). Это позволило отметить случаи интенсивного развития фитопланктона в 2001, 2005, 2008–2010, 2017, 2018 и 2021 гг. Далее эти случаи проверялись на наличие плавающих цианобактерий путём составления композигов из каналов MODIS Aqua с длинами волн 665 нм (красный), 555 нм (зелёный) и разницы этих каналов (аналогично и для SeaWIFS OrbView-2) — на изображениях плавающие цианобактерии резко контрастировали с цианобактериями в толще вод за счёт разницы в поглощении сигнала на красных и зелёных участках спектра. Кроме того, учитывались цвет областей на RGB-композигах в псевдонатуральных цветах и присутствие характерной для интенсивного развития цианобактерий нитевидной структуры.

В итоге было получено, что в 2001 г. и мае 2010 г., наблюдалось интенсивное развитие, вероятно, типичных для Южного Каспия видов фитопланктона. В остальные отобранные периоды — в 2005, 2008, 2010, 2017, 2018 гг. (июль, август), 2009 г. (сентябрь — начало октября) и 2021 г. (июнь) — развитие фитопланктона было определено как интенсивное развитие цианобактерий.

Получение части данных о гидрометеорологических условиях осуществлялось при помощи ресурсов Giovanni The Bridge Between Data and Science v4.37 (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) и PO.DAAC LAS V8.6.17 (<https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/las/UI.vm>). В частности, анализировалась температура поверхности Каспия по ежесуточным данным: MODIS Aqua (MODISA_L3m_SST Sea Surface Temperature at 11 microns (Day or night)), GHRSSST (*англ.* Group for High Resolution Sea Surface Temperature) Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis, v4.1, NOAA-18 (Environmental Data from Polar-orbiting Satellites (AVHRR)). Дополнительно в пределах Южного Каспия было нанесено 60 точек с шагом в 0,5° по широте и долготе для оценки температуры по данным GHRSSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1). Данные AVHRR NOAA-18 применялись для уточнения значений температуры в областях интенсивного развития цианобактерий и окружающих вод путём нанесения разрезов.

Характеристика синоптической обстановки над южной частью Каспийского моря воспроизводилась по следующим данным: о полях скорости ветра на высоте 10 м NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction) с 6-часовой дискретностью и модели MERRA-2 (*англ.* Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications) Surface wind speed, time average (M2T1NXFLX v5.12.4). По этим данным выполнялась оценка преобладающих значений скорости и направления ветра в тёплое время года, а также характеристики ветра до и во время случаев интенсивного развития цианобактерий. Кроме того, привлекались данные о концентрации хлорофилла *a* за период с 2003 по 2022 г. (MODIS Aqua: Chlorophyll *a* concentration (MODISA_L3m_CHL vR2022.0)).

Обсуждение результатов

За период с 2001 по 2022 г. в южной части Каспийского моря интенсивное развитие цианобактерий выявлялось в 2005, 2008–2010, 2017, 2018 и 2021 гг. Каждый обнаруженный случай имел различную продолжительность, обычно от нескольких недель.

При анализе всех доступных спутниковых изображений с отсутствием или частичным наличием облачного покрова было выделено три стадии интенсивного развития цианобактерий: начального развития, максимального развития и регресса. Для стадии начального

развития (обычно наиболее продолжительной) характерны возникновение и увеличение области с возрастающими значениями яркости восходящего излучения на длине волны около 555 нм и отсутствие плавающих цианобактерий. На стадии максимального развития выделяются плавающие цианобактерии, значения яркости восходящего излучения на длине волны около 555 нм наиболее высоки, область, охваченная цианобактериями, обычно достигает максимальной площади. На стадии регресса происходит сокращение и/или фрагментирование области интенсивного развития цианобактерий, площади участков с плавающими цианобактериями также сокращаются до полного исчезновения (последние дни стадии регресса по оптическим критериям могут соответствовать первым дням стадии начального развития).

В ряде случаев определение даты начала (завершения) той или иной стадии развития имеет погрешности в 1–2 дня из-за наличия на спутниковых изображениях облачного покрова и солнечных бликов (таблица).

Стадии интенсивного развития цианобактерий в Южном Каспии

Год	Стадия		
	начального развития	максимального развития	регресса
2005	7–23 августа	24 августа – 11–17 сентября	11–17 сентября – 26–27 сентября
2008	8–26 сентября	27–28 сентября	29 сентября – 3–4 ноября
2009	6–7 августа – 18 августа	19–22 августа	23 августа – 5–6 сентября
2010	8–22 июля	–	23 августа – 2 сентября
	19 июля – 2 августа	3–7 августа	8–12 августа
2017	17 июля – 4 августа	5–13 августа	14–16 августа
	15 июля – 3 августа	4–10 августа	11–13 августа
2018	9–18 июля	19 июля – 2 августа	3 августа – 8–9 августа
2021	22 июня – 10 июля	11–14 июля	15 июля – 28–31 июля

Наиболее длительное и выраженное развитие цианобактерий регистрировалось в 2005 г. с 7 августа по 26–27 сентября (рис. 2, см. с. 257). Некоторое увеличение яркости восходящего излучения от формирующейся области интенсивного развития цианобактерий стало наблюдаться с конца июля, тогда как её выраженное формирование над глубоководной частью Южного Каспия за счёт влияния динамических процессов уверенно распознаётся с 7 августа. Продолжительность стадии начального развития составила около двух недель, с 24 августа выявляются плавающие цианобактерии. Стадия максимального развития длится до 12–17 сентября, во время которой площадь области интенсивного развития цианобактерий превысила 35 000 км² (по измерениям на 1 сентября), а максимальная протяжённость по условной линии «Ленкорань – Горган» достигла 388 км. Переход к стадии регресса становится постепенным, первые признаки по спутниковым данным распознаются с 11 сентября, когда снижается яркость восходящего излучения и область интенсивного развития цианобактерий становится более разреженной.

Размеры области интенсивного развития цианобактерий и её пространственное положение меняются на протяжении всего периода регистрации. На стадии начального развития значительный вклад вносят вихревые формирования (особенно в период с 13 по 20 августа), и область интенсивного развития цианобактерий быстро увеличивается в северо-западном и юго-восточном направлениях. В период, соответствующий стадии максимального развития, продолжается увеличение её площади с одновременным смещением к южному берегу. Так же как и на предыдущей стадии, фиксируются вихри, в частности хорошо сформированный вихрь диаметром около 90 км (с 28 августа по 8 сентября) и вихри меньшего масштаба (с 1 сентября по 19–20 сентября). На стадии регресса площадь области интенсивного развития цианобактерий сокращается, при этом цианобактерии регистрируются непосредственно у южного берега.

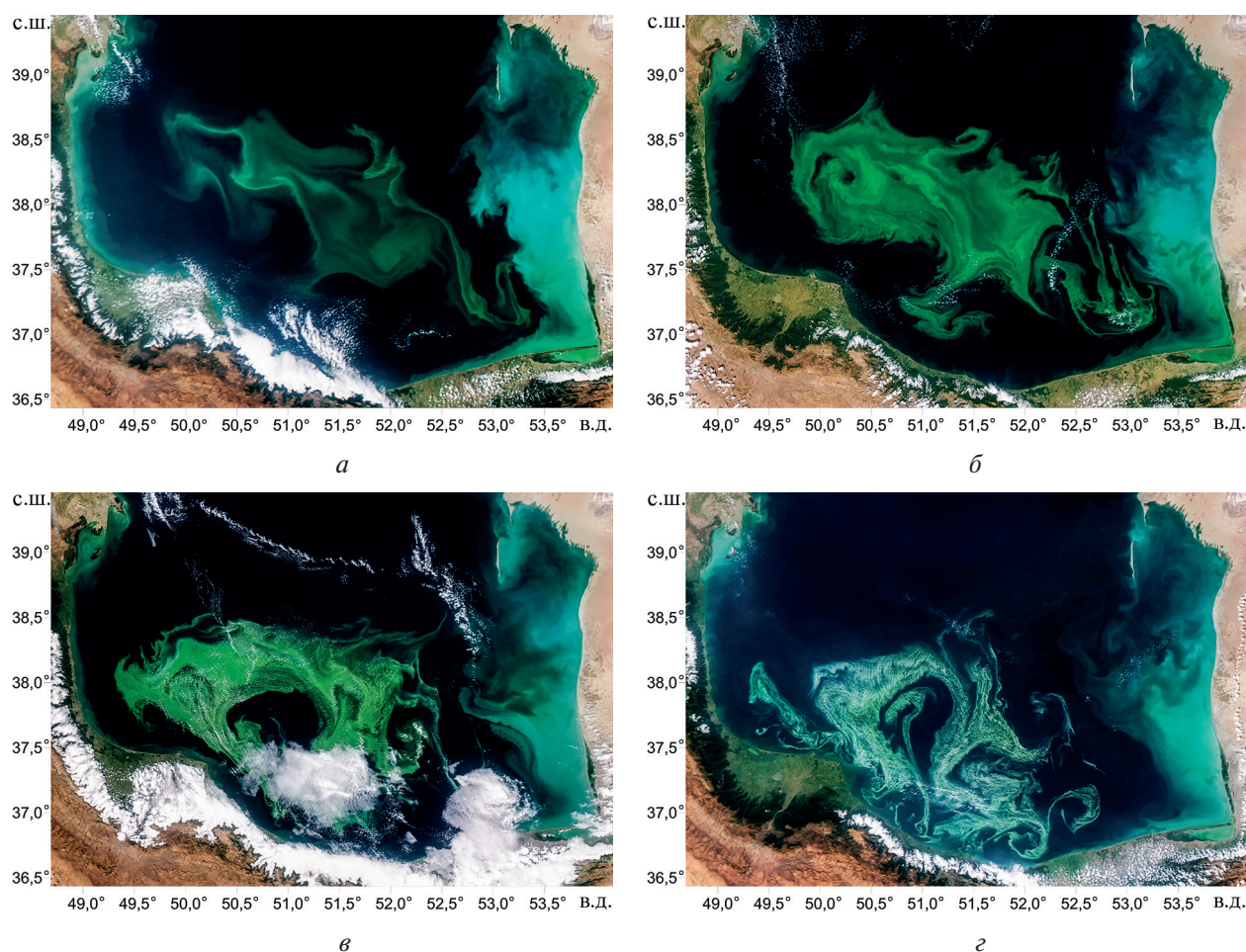


Рис. 2. Интенсивное развитие цианобактерий в южной части Каспийского моря на разных стадиях, фрагменты оптических изображений MODIS Aqua: *а* — от 24.08.2005; *б* — от 01.09.2005; *в* — 10.09.2005; *г* — от 16.09.2005

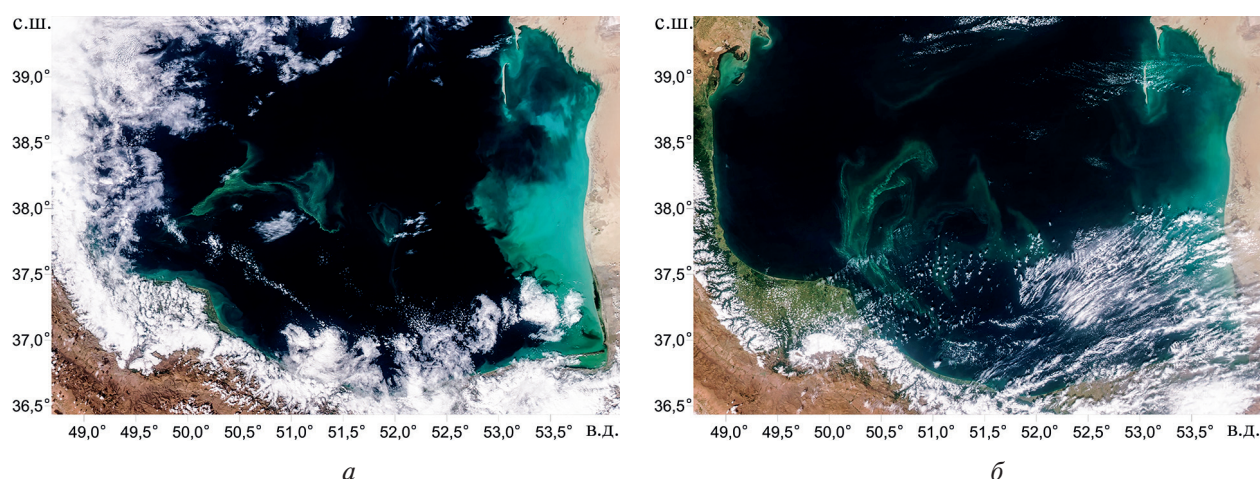


Рис. 3. Интенсивное развитие цианобактерий, проявленное на фрагментах изображений MODIS Aqua: *а* — от 27.09.2008; *б* — от 20.08.2009

Случаи интенсивного развития цианобактерий в 2008 и 2009 гг. (рис. 3, см. с. 257) отличались меньшими масштабами и меньшей продолжительностью, чем в 2005 г. Детальный анализ этих ситуаций затруднён из-за большого количества дней с развитым облачным покровом над южной частью Каспийского моря.

В 2008 г. началом интенсивного развития цианобактерий можно предположить 8 сентября, когда стало наблюдаться стабильное увеличение яркости восходящего излучения отдельной области несколько южнее центра глубоководной части. Начальная стадия длится до 26 сентября, на протяжении которой область интенсивного развития цианобактерий активно трансформируется под влиянием динамических процессов и постепенно смещается на запад. С 27 сентября на поверхности фиксируются плавающие цианобактерии, стадия максимального развития отличается малой временной продолжительностью (до 29 сентября включительно), последующая стадия регресса наблюдается до 3–4 октября.

В 2009 г. первые признаки интенсивного развития цианобактерий обнаруживаются в начале августа в центральной части Южного Каспия. По мере развития области интенсивного развития цианобактерий происходит её смещение на юго-запад к прибрежной зоне, затем расширение в восточном и юго-восточном направлениях. Стадия максимального развития сменяет стадию начального развития с 19 августа и длится примерно до 22–23 августа, а затем — до 5–6 сентября — наблюдается сокращение площади отмеченной области с постепенным исчезновением плавающих цианобактерий.

В 2010 г. (рис. 4) интенсивное развитие цианобактерий проявлялось в разных областях дважды: с 8 июля по 2 августа и с 19 июля по 12 августа. Более ранний случай (начало формирования в районе берега г. Бабольсер) примечателен тем, что плавающие цианобактерии не обнаруживаются. Тем не менее регистрируются типичные признаки интенсивного развития цианобактерий: аномально высокая яркость восходящего излучения и нитевидные структуры. В период с 8 июля по 2 августа в первые дни область интенсивного развития цианобактерий увеличивалась преимущественно вдоль восточного шельфа, а затем быстро смещалась и вытягивалась в северо-западном направлении, с 18–19 июля также росла в западном направлении. В эти же дни — с 19 июля — формируется ещё одна область интенсивного развития цианобактерий в западной части Южного Каспия на расстоянии около 40 км от береговой линии г. Нур. Достоверно не определить, связаны ли случаи между собой и выступает ли более поздний продолжением более раннего, но вторая область с высоким содержанием цианобактерий сформировалась на малом расстоянии от первой (после её развития в западном направлении). Стадия начального развития длится до 2 августа, на протяжении которой происходит значительная трансформация области интенсивного развития цианобактерий: она увеличивается в виде двух «ветвей», одна из которых направлена на юг, а другая — на юго-запад. По мере приближения к прибрежной зоне эти «ветви» смещаются в восточном направлении, увлекаемые вдольбереговым переносом. Со 2 августа регистрируются плавающие цианобактерии в месте формирования области интенсивного развития цианобактерий и в направлении на юго-запад, по оптическим спутниковым данным они определяются по 7 августа включительно, затем интенсивность проявления цианобактерий уменьшается.

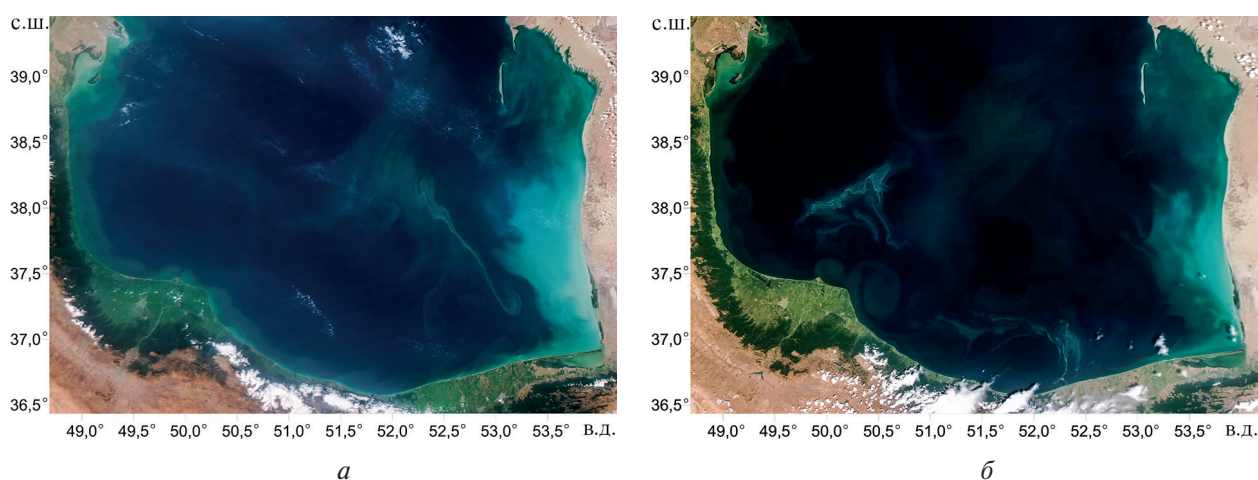


Рис. 4. Интенсивное развитие цианобактерий, проявленное на фрагментах изображений MODIS Aqua: а — от 21.07.2010; б — от 05.08.2010

С 2011–2016 гг. случаи интенсивного развития цианобактерий не наблюдались, затем они были выделены в июле – августе 2017 г. — не только в южной части Каспийского моря, но и в средней (где ранее по спутниковым данным не обнаруживались). В сумме в пределах двух частей акватории фиксировалось пять областей интенсивного развития цианобактерий, из которых две — в западной части Среднего Каспия, две — на юге Южного Каспия и одна — на границе Среднего и Южного Каспия (рис. 5).

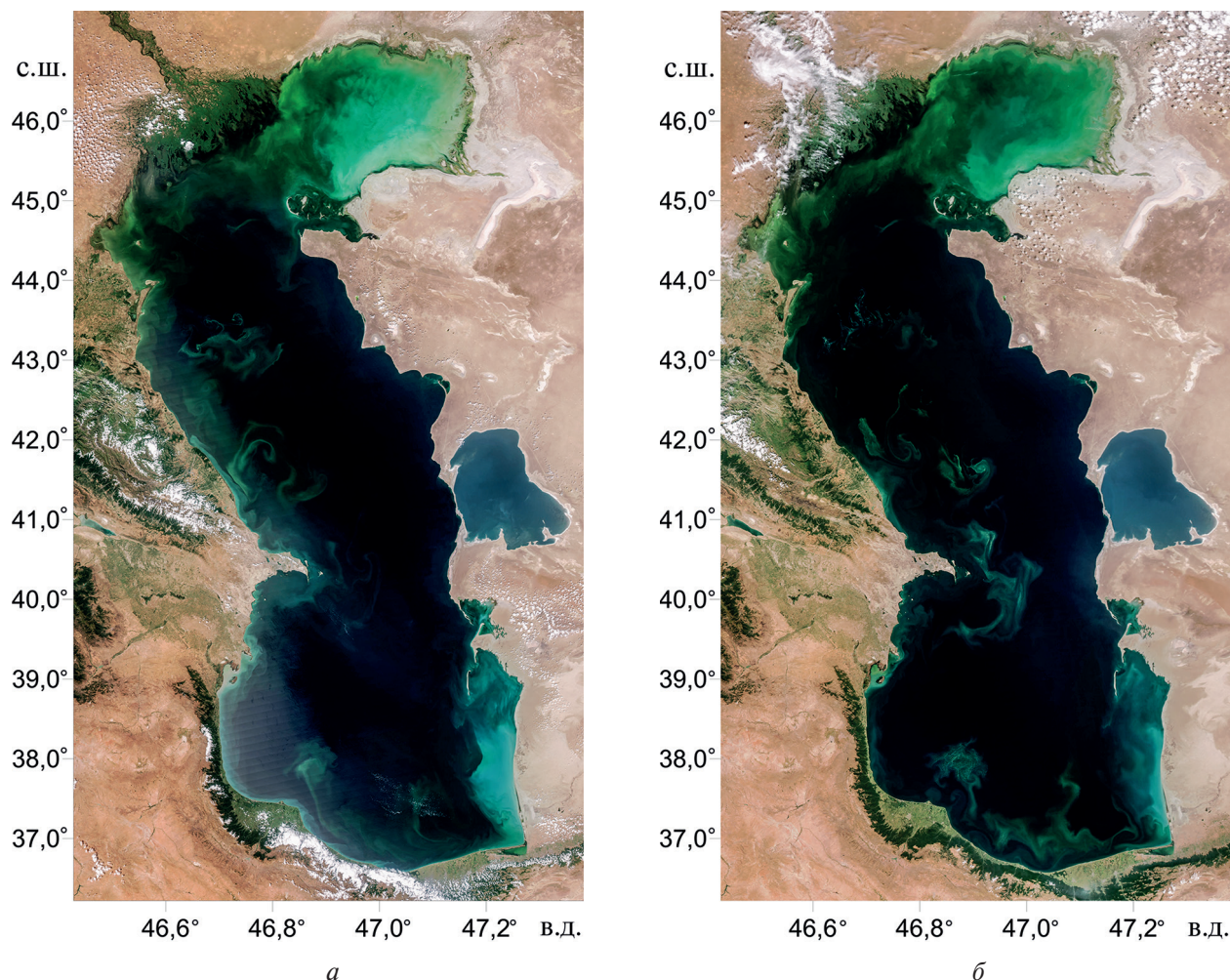


Рис. 5. Интенсивное развитие цианобактерий, проявленное на фрагментах изображений MODIS Aqua: *а* — от 03.08.2017; *б* — от 08.08.2017

В средней части Каспийского моря периоды интенсивного развития цианобактерий определены с 25 июля до 15 августа (со стадией максимального развития с 3 по 9 августа) для области севернее и с 27 июля до 15 августа (со стадией максимального развития с 6 по 9 августа) для области южнее. Обе области интенсивного развития цианобактерий сформировались ближе к западному побережью, но по мере эволюции достигали центральной части Среднего Каспия. Последним днём наблюдения интенсивного развития цианобактерий считается 15 августа из-за наличия выраженного облачного покрова в последующие дни.

С 27 июля также было обнаружено интенсивное развитие цианобактерий в пограничной области между Средним и Южным Каспием. В этом случае стадия максимального развития длилась с 5 до 9 августа, стадия регресса наблюдалась до 15 августа. Территориально область интенсивного развития цианобактерий выявлена восточнее Апшеронского п-ова примерно на 95 км, в процессе эволюции цианобактерии распространялись преимущественно в трёх направлениях: на северо-запад, юго-запад и восток.

В южной части Каспийского моря признаки интенсивного развития цианобактерий прежде появились на расстоянии 15–20 км от южного берега в районе городов Махмудабад и Бабольсер. На начальной стадии развития (с 17 июля) область интенсивного развития цианобактерий хорошо отражала динамику вихревого диполя, его структура выделялась до конца месяца. Во втором случае область интенсивного развития цианобактерий начала формироваться западнее и примерно на расстоянии 30 км от берега.

К августу по оптическим данным хорошо наблюдается выраженное увеличение яркости восходящего излучения вдоль южного берега, «западная» и «восточная» области определяются как общее образование. Но при этом стадия максимального развития формирования восточнее длится с 5 по 13 августа, а формирования западнее — с 4 по 10 августа, в разные дни также регистрируется завершение проявления цианобактерий.

В 2018 г. (рис. 6а) начало интенсивного развития цианобактерий обнаруживается с 9 июля в юго-восточной части Южного Каспия на расстоянии около 35 км от побережья г. Бабольсер. На протяжении начальной стадии развития наблюдается постепенное увеличение области интенсивного развития цианобактерий, положение которой также несколько меняется в связи с влиянием вихревых структур. С 19 июля цианобактерии фиксируются на поверхности в двух районах: на расстоянии от 38 км и более от восточного берега и на расстоянии около 40 км от прибрежной зоны г. Бабольсер. Стадия максимального развития длится примерно до 2 августа, на протяжении которой увеличение области осуществляется преимущественно в северо-западном и западном направлениях. С 3 по 8–9 августа происходит быстрое уменьшение площади и выраженности области развития цианобактерий.

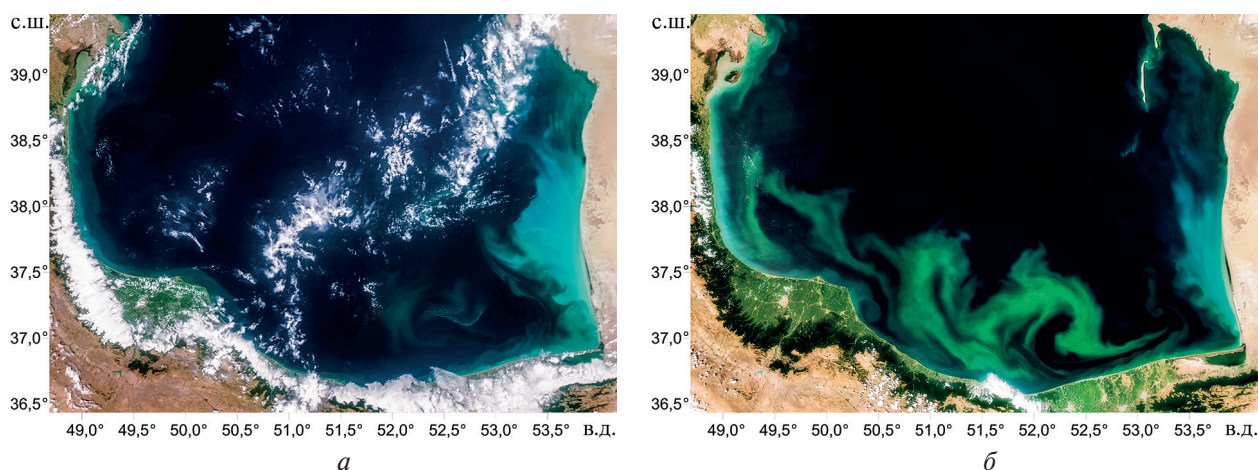


Рис. 6. Интенсивное развитие цианобактерий, проявленное на фрагментах изображений MODIS Aqua: а — от 19.07.2018; б — от 04.07.2021

В 2021 г. (рис. 6б) начало интенсивного развития выделяется 22–23 июня на расстоянии от 20 км от южного берега моря, несколько западнее г. Нур. Область интенсивного развития цианобактерий быстро увеличивается, ко 2 июля ею охватываются практически все районы вдоль южного и юго-западного берегов. Такое распространение распознаваемых цианобактерий сохраняется до стадии регресса, когда область интенсивного развития цианобактерий быстро фрагментируется. Переход от стадии к стадии определяется приблизительно по причине наличия облачного покрова. Плавающие цианобактерии выделены 11 июля, а завершение интенсивного развития цианобактерий приходится на 28–31 июля (из-за облачного покрова цианобактерии последний раз обнаруживаются 28 июля).

Предполагается, что определённое влияние на формирование оптимальных условий для интенсивного развития цианобактерий могут оказывать гидрометеорологические условия и процессы, связанные с поступлением в Южный Каспий биогенных элементов. Таковые могут включать изменения температуры поверхности моря, характеристики приземного ветра, развитие иных видов фитопланктона, частоту и интенсивность пыльных бурь (Калинская

и др., 2021), интенсивность осадков, характеристики материковых стоков (Bigham et al., 2019) и др. Часть из них рассмотрена ниже.

Температура поверхности моря

Считается, что одним из факторов, способных оказывать влияние на возникновение и дальнейшее формирование интенсивного развития цианобактерий, служит температура деятельного слоя акватории (Абдуллаев, 2014; Зонн и др., 2016; Ward et al., 2012). Для южной части Каспийского моря минимальные значения температуры поверхности моря характерны для февраля, а максимальные (до 30 °C и более) — для августа (по данным MODIS Aqua). Анализ межгодовой изменчивости температуры поверхности моря с 2001 по 2020 г. (по данным GHRSSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1)) показал, что наиболее тёплыми были 2010, 2020 и 2019 гг. (среднегодовые значения 18,7; 18,6 и 18,4 °C соответственно), а самыми холодными — 2003, 2009 и 2011 гг. (среднегодовые значения 17,2; 17,5 и 17,7 °C соответственно). При этом интенсивное развитие цианобактерий наблюдалось как в тёплые годы (2005 и 2010 гг.), так и в холодные (2008 и 2009 гг.). Среднемесячная температура со значениями выше 28 °C (по данным MODIS Aqua, с 2003 г.) регистрировалась в августе с 2005 по 2008 г., в июле и августе 2010 и 2011 гг., в августе 2012 г., в августе с 2014 по 2017 г., в июле 2018 г., в июле и августе 2021 г. и в августе 2022 г. Температура ниже 26 °C в июле и/или августе наблюдалась в 2003 и 2004 гг. (июль) и в 2009 г. (июль и август).

При оценке пространственно осреднённых данных по температуре поверхности моря и сравнении с периодами интенсивного развития цианобактерий было получено, что начальные признаки развития регистрировались при температуре вод от 26 °C и выше, а плавающие цианобактерии выделялись при температурах от 26,1 до 29,3 °C. Как указано ранее, случаи интенсивного развития цианобактерий фиксировались с июня по октябрь, но не каждый год. Соответственно, даже при оптимальных фоновых температурах поверхности возможность интенсивного развития цианобактерий ограничивалась иными факторами.

Характеристики ветра

Предполагается, что на свойство цианобактерий пребывать в плавающем состоянии и развиваться на поверхности моря может влиять турбулентное перемешивание верхнего слоя вод из-за воздействия ветра: на фоне ветрового затишья цианобактерии развиваются в подповерхностном слое, а затем и на поверхности, тогда как на фоне ветров высокой скорости или ветров с выраженными изменениями скорости сильное волнение и обрушение волн препятствуют этому развитию (Naghdi et al., 2018). Кроме того, на фоне низких скоростей ветра обычно прогрев поверхностного слоя вод выше, чем на фоне ветров умеренных и высоких скоростей (Rubakina et al., 2019). В летние месяцы над южной частью Каспийского моря преобладают ветры относительно невысоких скоростей, в среднем до 5–8 м/с, но с вариациями в отдельные периоды (дни, недели) от 3–4 до 10–11 м/с. В целом характеристики ветрового поля в летний период преимущественно не препятствуют интенсивному развитию цианобактерий: практически ежегодно в июле и/или августе выявляются продолжительные периоды (около недели и более), когда скорость ветра не превышает 4–5 м/с, а колебания скорости сохраняются в пределах 1–2 м/с. При этом в той или иной степени для всех случаев обнаруживаются периоды с низкими скоростями ветра, которые совпадают со временем интенсивного развития цианобактерий или предшествуют его началу.

Концентрация хлорофилла *a*

Обнаружено, что относительно высокие средние значения концентрации хлорофилла *a* (выше 1,8 мг/м³) для всей южной части Каспийского моря в весенний сезон (по данным MODIS Aqua, с 2003 г.) были в 2003 г. (1,86 мг/м³), 2004 г. (1,84 мг/м³), 2005 г. (1,95 мг/м³), 2006 г.

(1,85 мг/м³), 2009 г. (1,93 мг/м³), 2010 г. (2,21 мг/м³), 2018 г. (2,14 мг/м³) и 2019 г. (1,87 мг/м³) (рис. 7). Наиболее высокие значения (выше 1,9 мг/м³) соответствуют 2005, 2009, 2010 и 2018 гг. Относительно низкие средние значения концентрации хлорофилла *a* за весенние месяцы соответствуют 2008 г. (1,69 мг/м³), 2017 г. (1,53 мг/м³) и 2021 г. (1,70 мг/м³).

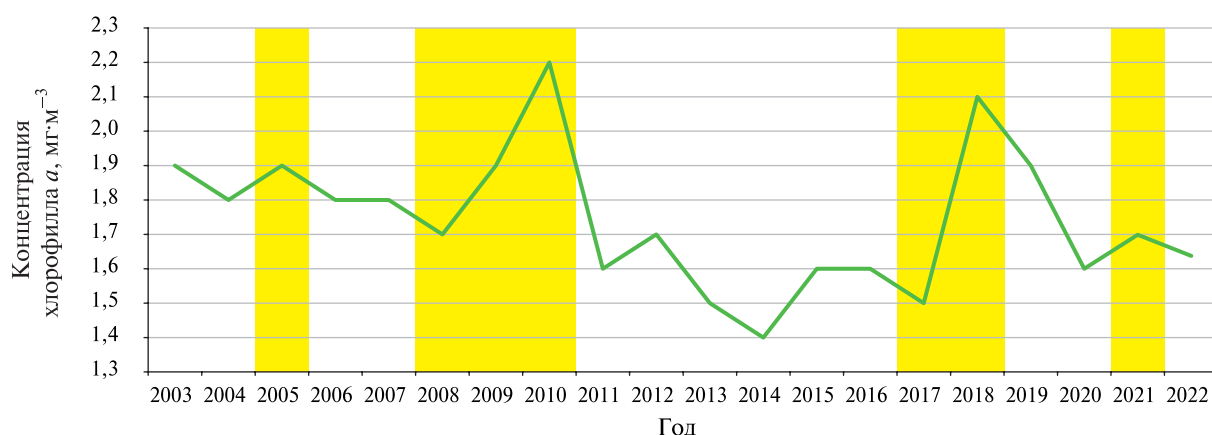


Рис. 7. Изменения концентрации хлорофилла в весенний сезон с 2003 по 2022 г. по данным MODIS Aqua. Жёлтым цветом отмечены годы, в которые выявлялось интенсивное развитие цианобактерий

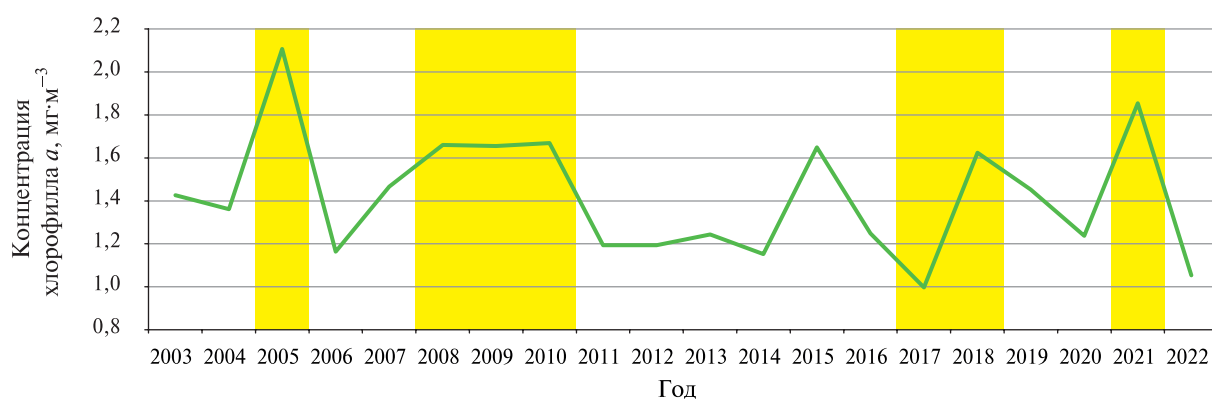


Рис. 8. Изменения концентрации хлорофилла в июне с 2003 по 2022 г. по данным MODIS Aqua. Жёлтым цветом отмечены годы, в которые выявлялось интенсивное развитие цианобактерий

Отчасти схожие результаты (рис. 8) наблюдаются при оценке концентрации хлорофилла *a* в июне в южной части исследуемого района (северная граница по широте 38,5° с. ш.), где обнаруживаются первые признаки интенсивного развития цианобактерий. Максимальные значения концентрации хлорофилла *a* (выше 1,6 мг/м³) выделяются в 2005 г. (2,10 мг/м³), 2008 г. (1,66 мг/м³), 2009 г. (1,64 мг/м³), 2010 г. (1,66 мг/м³), 2015 г. (1,64 мг/м³), 2018 г. (1,60 мг/м³) и 2021 г. (1,82 мг/м³). Несколько ниже значения в 2007 г. (1,46 мг/м³) и в 2019 г. (1,43 мг/м³).

В Каспийском море выявлено 226 видов фитопланктона из пяти групп, которые включают в себя диатомеи, хлорофиты, цианопиты, динофлагелляты и эвгленопиты (Roohi et al., 2010). Предполагается, что дополнительно на развитие цианобактерий может влиять изменение соотношения биогенных элементов из-за жизнедеятельности иных видов фитопланктона или дополнительным источником биогенных элементов могут быть собственно процессы разложения фитопланктона (органическое вещество). Вероятно, в условия для развития цианобактерий большой вклад дают процессы, связанные с жизнедеятельностью фитопланктона, что происходит месяцем ранее. Так, например, интенсивное развитие цианобактерий в 2008 г. зарегистрировано с сентября, тогда как сравнительно высокая среднемесячная концентрация хлорофилла *a* обнаружилась в августе — 4,01 мг/м³. Тем не менее не исключено,

что высокие значения концентрации хлорофилла *a* в июне могут быть результатом возрастания количества цианобактерий в деятельном слое моря в те годы, когда интенсивное развитие цианобактерий регистрируется с июня или начала июля (например, 2021 г.).

Нетипичной представляется ситуация в 2017 г.: значения концентрации хлорофилла *a* — одни из самых низких с 2003 по 2022 г. и весной, и в июне. Вероятно, решающая роль для 2017 г. принадлежит иным факторам (не рассматриваемым в данной работе), таким как материковые стоки, пыльные бури, перенос биогенных элементов и цианобактерий из северной части Каспийского моря.

Температура поверхности моря в областях с интенсивным развитием цианобактерий

Наблюдение за случаями интенсивного развития цианобактерий выявило существенные изменения температуры поверхности в областях с плавающими цианобактериями. В качестве примера выбран случай в 2005 г., для которого был отобран ряд данных AVHRR NOAA-18 с отсутствующим или незначительным облачным покровом. На эти изображения нанесены разрезы, проходящие как через область интенсивного развития цианобактерий, так и за её пределами, по которым оценивались изменения значений температурного канала (3740 нм) в зависимости от интенсивности проявления цианобактерий.

В итоге отобрано четыре спутниковых снимка: от 15 и 20 августа, 10 и 15 сентября. На снимке от 15 августа площадь распознаваемой области интенсивного развития цианобактерий составляет около 9500 км², на снимке от 20 августа она увеличена до 24 600 км². В обоих случаях интенсивное развитие цианобактерий хорошо проявляется на канале с длиной волны 630 нм и частично — на каналах с длинами волн 3740 и 10 800 нм (температура поверхности), разница между температурой вод в области с интенсивным развитием цианобактерий и вне её практически отсутствует.

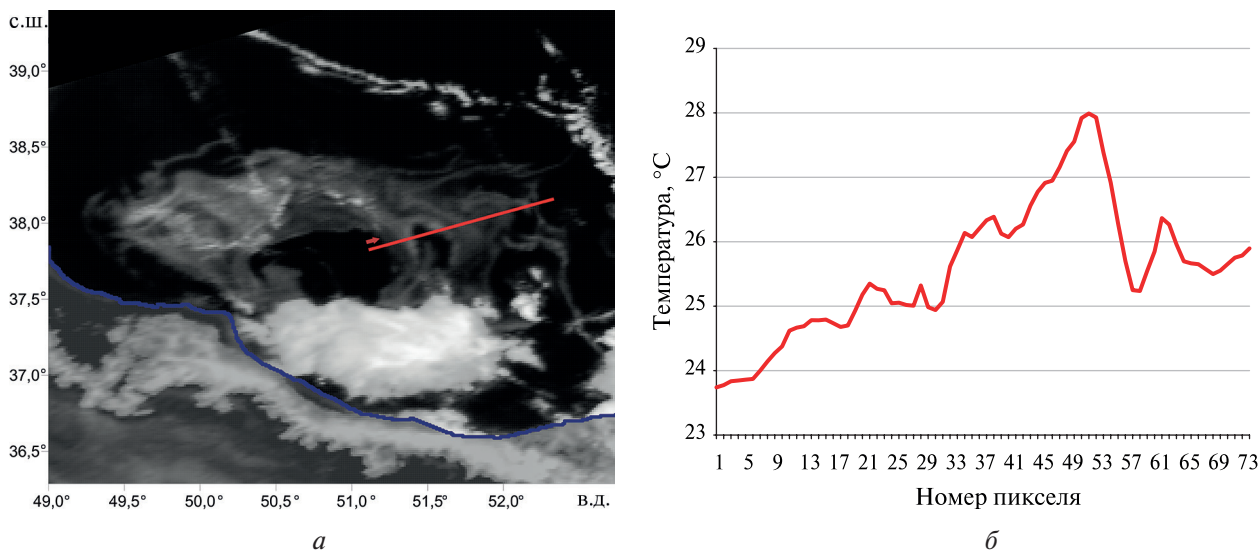


Рис. 9. Изменение температуры поверхности моря 10 сентября 2005 г. в области с интенсивным развитием цианобактерий: *a* — фрагмент изображения AVHRR NOAA-18 с нанесённым разрезом (направление отмечено красной стрелкой, береговая линия — синим цветом); *б* — график изменения температуры поверхности моря, соответствующий разрезу

К 10 сентября площадь видимой области интенсивного развития цианобактерий составляет около 29 800 км², что несколько меньше ранее максимально достигнутой (более 35 000 км² в начале сентября). Интенсивное развитие цианобактерий распознаётся на каналах AVHRR NOAA-18 в видимом и инфракрасном диапазонах, обнаруживаются плавающие

цианобактерии. При оценке значений яркости восходящего излучения и температуры отмечается, что наибольшие величины соответствуют областям с плавающими цианобактериями, где поглощение солнечной радиации увеличено. При сопоставлении величин температуры поверхности моря в пределах всего разреза выявляется, что наименьшее значение — $23,8^{\circ}\text{C}$ (вне области интенсивного развития цианобактерий), наибольшее — $28,0^{\circ}\text{C}$ (в области с плавающими цианобактериями), а разница значений температуры достигает $4,2^{\circ}\text{C}$ (рис. 9, см. с. 263).

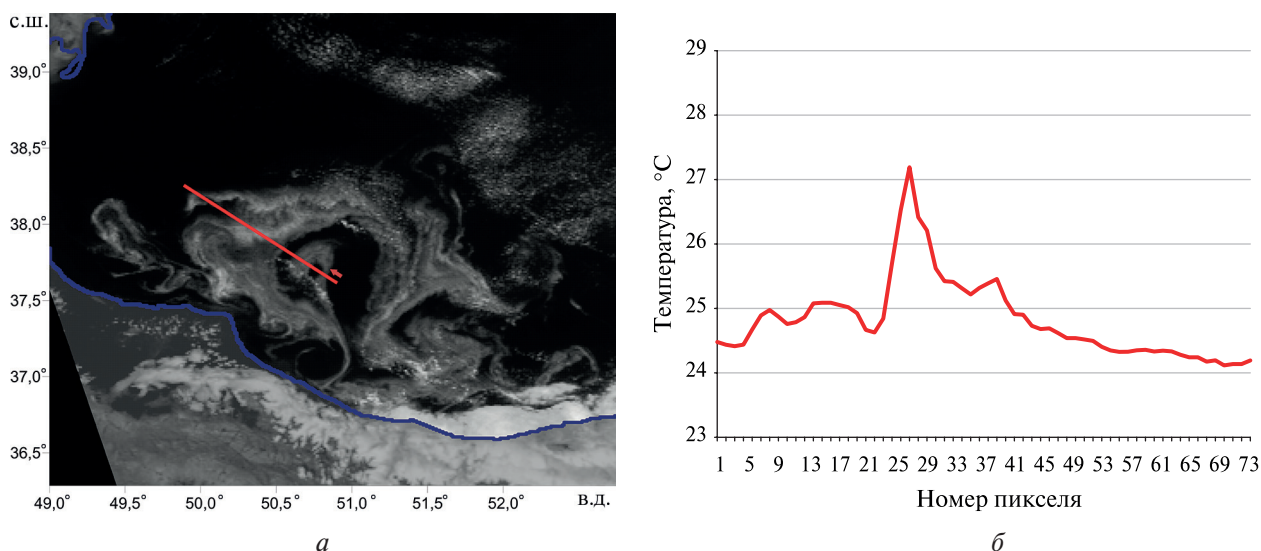


Рис. 10. Изменение температуры поверхности моря 15 сентября 2005 г. в области с интенсивным развитием цианобактерий: *а* — фрагмент изображения радиометра AVHRR спутника NOAA-18 с нанесённым разрезом (направление отмечено стрелкой, береговая линия — синим цветом); *б* — график изменения температуры поверхности моря, соответствующий разрезу

К 15 сентября распознаваемая область интенсивного развития цианобактерий сокращается до $25\,100\text{ км}^2$, цианобактерии выявляются с ослаблением по мере увеличения длины волны на каналах от 630 до $12\,000\text{ нм}$. При оценке величины яркости восходящего излучения и температуры поверхности моря по ходу разреза отмечается сходство с ситуацией от 10 сентября: минимальные значения соответствуют областям вне зоны интенсивного развития цианобактерий, а максимальные — наиболее интенсивным проявлениям цианобактерий. Соответственно, минимальная температура в пределах разреза составляет $24,1^{\circ}\text{C}$, максимальная — $27,2^{\circ}\text{C}$, а разница равна $3,1^{\circ}\text{C}$ (рис. 10).

Заключение

В южной части Каспийского моря с 2001 по 2022 г. случаи интенсивного развития цианобактерий выявлены в 2005, 2008–2010, 2017, 2018 и 2021 гг. Начало интенсивного развития цианобактерий обнаруживается в июле или августе (кроме 2009 г., когда первые признаки развития выявлены сентябре, и 2021 г., когда начало интенсивного развития цианобактерий наблюдается в конце июня), продолжительность развития составляет в среднем около 1 мес (в 2005 более 1,5 мес). На основе особенностей проявления плавающих цианобактерий в оптическом диапазоне и изменений структуры и площади выявляемой области интенсивного развития цианобактерий были выделены стадии начального развития, максимального развития и регресса, где максимальной стадии соответствует обнаружение плавающих цианобактерий, а стадии регресса — сокращение области развития.

Интенсивному развитию цианобактерий в южной части Каспийского моря способствует сочетание ряда гидрометеорологических и биологических факторов, часть из которых про-

анализирована в настоящей статье. В частности, интенсивное развитие цианобактерий осуществляется на фоне прогрева поверхностного слоя моря (температура вод от 26 °С и выше) и слабого или умеренного перемешивания деятельного слоя акватории (средние скорости ветра в летний период — около 5–7 м/с). Нередко обнаруживается, что интенсивное развитие цианобактерий начинается или продолжается на фоне влияния ветров, когда их скорости продолжительно и без существенных изменений (в пределах 1–2 м/с) не превышают 4–5 м/с. Кроме того, выявлено, что интенсивному развитию цианобактерий предшествует увеличение концентрации хлорофилла *a*. Это наблюдение позволяет предположить, что источником биогенных элементов могут быть не только материковые стоки, перенос вод из Северного Каспия и пыльные бури, но и жизнедеятельность иных видов фитопланктона. Вероятно, большой вклад биогенных элементов даёт жизнедеятельность иных видов фитопланктона на 1–2 мес ранее интенсивного развития цианобактерий (2005, 2008–2010, 2018 и 2021 гг.), но не исключается и связь с жизнедеятельностью фитопланктона, осуществляемая в более ранние периоды (весной 2005, 2009, 2010 и 2018 гг.).

По результатам анализа спутниковых данных видимого и инфракрасного диапазонов были выявлены зоны перегрева, совпадающие с областями интенсивного развития цианобактерий, которые возникли из-за увеличенного поглощения цианобактериями солнечной радиации в поверхностном слое вод. При сопоставлении температуры поверхностных вод в областях с плавающими бактериями и в областях с не выявляемыми цианобактериями обнаружена разница до 3–4 °С (максимальная выявленная — 4,2 °С), где максимальные значения температуры были получены в районах с высоким содержанием плавающих цианобактерий.

Исследование интенсивного развития цианобактерий и влияющих факторов выполнено при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 20-54-56053 Иран_т «Изучение современного состояния и функциональных характеристик планктонных сообществ Каспийского моря в условиях антропогенного загрязнения и биологических инвазий». Исследование изменения температуры поверхности в областях интенсивного развития цианобактерий проведено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 23-27-00421 «Развитие методов спутникового мониторинга аномальных процессов в морских экосистемах на основе многоспектрального подхода».

Литература

1. Абдуллаев С. Ф. Комплексные исследования пылевых и газовых примесей в аридных зонах и их влияние на региональный климатический режим юго-восточной части Центральной Азии: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Душанбе, 2014. 315 с.
2. Богданов Н. И., Абрамов Б. В., Парамонов В. К. Биологические аспекты борьбы с «цветением» водоемов синезелеными водорослями // Астраханский вестн. экол. образования. 2004. № 1–2. С. 61–62.
3. Вершинин А. О., Моручков А. А. Потенциально-токсичные водоросли в прибрежном фитопланктоне северо-восточной части Черного моря // Экология моря. 2003. Вып. 64. С. 45–50.
4. Волошко Л. Н., Пиневич А. В., Копецкий И., Титова Н. Н., Хроузек П., Зелик П. Продуцируемые цианобактериями токсины в период «цветения» воды в Нижнем Суздальском озере (Санкт-Петербург, Россия) // Альгология. 2010. Т. 20. № 2. С. 210–233.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6. Каспийское море. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 360 с.
6. Зонн И. С., Костяной А. Г., Косарев А. Н., Жильцов С. С. Каспийское море: Энциклопедия. М.: Восточ. кн., 2016. 560 с.
7. Калинская Д. В., Медведева А. В., Алескерова А. А. Влияние пылевого аэрозоля на интенсивность цветения цианобактерий в Каспийском море // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 9. С. 689–695. DOI: 10.15372/AOO20210904.
8. Каспийское море: Гидрология и гидрохимия / под. ред. С. С. Байдина, А. Н. Косарева. М.: Наука, 1986. 261 с.
9. Aleskerova A. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Lishaev P. N., Mazyuk A. I. Cyanobacteria Bloom in the Azov Sea According to Landsat Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55. No. 9. P. 1416–1426. DOI: 10.1134/S0001433819090056.

10. *Bigham S., Zarei Darki B., Patimar R., Jorjani E.* Physical-Chemical Factors Affecting Diversity and Distribution of Blue-green Algae in the Southern Caspian // *J. Phycological Research*. 2019. V. 3. No. 1. P. 275–286. DOI: 10.29252/JPR.3.1.275.
11. *Knysh V., Ibrayev R., Korotaev G., Inyushina N.* Seasonal variability of climatic currents in the Caspian Sea reconstructed by assimilation of climatic temperature and salinity into the model of water circulation // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2008. V. 44. P. 236–249. DOI: 10.1134/S0001433808020114.
12. *Kopelevich O. V., Vazyulya S. V., Grigoriev A. V., Khrapko A. N., Sheberstov S. V., Sahling I. V.* Penetration of visible solar radiation in waters of the Barents Sea depending on cloudiness and coccolithophore blooms // *Oceanology*. 2017. V. 57. P. 402–409. DOI: 10.1134/S0001437017020096.
13. *Kopylov A. I., Kosolapov D. B., Zabolotkina E. A.* Distribution of picocyanobacteria and virioplankton in mesotrophic and eutrophic reservoirs: The role of viruses in mortality of picocyanobacteria // *Biology Bull*. 2010. V. 37. P. 565–573. DOI: 10.1134/S1062359010060038.
14. *Kubryakov A. A., Lishaev P. N., Aleskerova A. A., Stanichny S. V., Medvedeva A. A.* Spatial distribution and interannual variability of cyanobacteria blooms on the North-Western shelf of the Black Sea in 1985–2019 from satellite data // *Harmful Algae*. 2021. V. 110. P. 102–128. DOI: 10.1016/j.hal.2021.102128.
15. *Naghdi K., Moradi M., Kabiri K., Rahimzadegan M.* The effects of cyanobacterial blooms on MODIS-L2 data products in the southern Caspian Sea // *Oceanologia*. 2018. V. 60. No. 3. P. 367–377. DOI: 10.1016/j.oceano.2018.02.002.
16. *Nasrollahzadeh H., Makhloogh A., Pourgholam R., Vahedi F., Qanqermeh A., Foong S.* The study of *Nodularia spumigena* bloom event in the southern Caspian Sea // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2011. V. 9. P. 141–155. DOI: 10.15666/aeer/0902_141155.
17. *Oyama Y., Matsushita B., Fukushima T.* Cyanobacterial Blooms as an Indicator of Environmental Degradation in Waters and Their Monitoring Using Satellite Remote Sensing. // *Aquatic Biodiversity Conservation and Ecosystem Services*. 2016. P. 71–85. DOI: 10.1007/978-981-10-0780-4_6.
18. *Roohi A., Kideys A. E., Sajjadi A., Hashemian A., Pourghola R., Fazli H., Khanari A. G., Eker-Develi E.* Changes in biodiversity of phytoplankton, zooplankton, fishes and macrobenthos in the Southern Caspian Sea after the invasion of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* // *Biological Invasions*. 2010. V. 12. P. 2343–2361. DOI: 10.1007/s10530-009-9648-4.
19. *Rubakina V. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V.* Seasonal Variability of the Diurnal Cycle of the Black Sea Surface Temperature from the SEVIRI Satellite Measurements // *Physical Oceanography*. 2019. V. 26. No. 2. P. 157–169. DOI: 10.22449/1573-160X-2019-2-157-169.
20. *Ward D. M., Castenholz R. W., Miller S. R.* Cyanobacteria in Geothermal Habitats // *Ecology of cyanobacteria II: their diversity in space and time*. 2012. P. 39–63. DOI: 10.1007/978-94-007-3855-3_3.
21. *Wynne T. T., Stumpf R. P., Tomlinson M. C., Warner R. A., Tester P. A., Dyble J., Fahnenstiel G. L.* Relating spectral shape to cyanobacterial blooms in the Laurentian Great Lakes // *Intern. J. Remote Sensing*. 2008. No. 29. P. 3665–3672. DOI: 10.1080/01431160802007640.
22. *Zakharkov S. P., Selina M. S., Vanin N. S., Shtraikhert E. A., Biebov N.* Phytoplankton characteristics and hydrological conditions in the western part of the Sea of Okhotsk in the spring of 1999 and 2000 based on expeditionary and satellite data // *Oceanology*. 2007. V. 47. P. 519–530. DOI: 10.1134/S0001437007040091.

Intensive development of cyanobacteria in the southern part of the Caspian Sea

A. V. Medvedeva, S. V. Stanichny, A. A. Kubryakov

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia

E-mail: Suomi-npp@mail.ru

On the basis of medium resolution optical satellite data from 2001 to 2022, cases of intensive development of cyanobacteria in the southern part of the Caspian Sea were identified — mainly in July and August in 2005, 2008–2010, 2017, 2018 and 2021. In 2009, intensive development of cyanobacteria was observed in September and early October, and in 2021, the first signs of intensive development of cyanobacteria were recorded in June. For all noted cases, stages of development are detected and spatio-temporal changes are described. We also analyzed the background conditions that could contribute to the intensive development of cyanobacteria — changes in sea surface temperature, wind speed and

stability in summer, and an increase in the concentration of chlorophyll-*a* in periods preceding the development of cyanobacteria. In particular, it was noted that the intensive development of cyanobacteria occurs mainly in conditions of high heating of surface waters, against the background of the predominance of weak and stable winds. Probably, the vital activity of other phytoplankton species is an additional source of nutrients — higher concentrations of chlorophyll *a* are recorded before periods of intensive development of cyanobacteria. In addition, an increase in sea surface temperature was noted in the area of intensive development of cyanobacteria. According to AVHRR NOAA-18 data, the temperature contrast between the area with floating cyanobacteria and the surrounding areas can exceed 4 °C.

Keywords: South Caspian, cyanobacteria, intensive development of cyanobacteria, surface temperature, wind speed, chlorophyll *a* concentration, optical data, satellite data, *Nodularia Spumigena* Mert.

Accepted: 15.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-253-268

References

1. Abdullaev S. F., *Kompleksnye issledovaniya pylevykh i gazovykh primesei v aridnykh zonakh i ikh vliyanie na regional'nyi klimaticheskii rezhim yugo-vostochnoi chasti Tsentral'noi Azii: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (Comprehensive studies of dust and gas impurities in arid zones and their influence on the regional climatic regime of the southeastern part of Central Asia, Dr. phys. math. sci. thesis), Dushanbe, 2014, 315 p. (in Russian).
2. Bogdanov N. I., Abramov B. V., Paramonov V. K., Biological aspects of the fight against “blooming” of water bodies by blue-green algae, *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2004, Vol. 1–2, pp. 61–62 (in Russian).
3. Vershinin A. O., Moruchkov A. A., Potentially toxic algae in the northeastern Black Sea coastal phytoplankton in 2000–2002, *Ehkologiya morya*, 2003, Vol. 64, pp. 45–50 (in Russian).
4. Voloshko L. N., Pinevich A. V., Kopetskii I., Titova N. N., Khrouzek P., Zelik P., Toxins produced by cyanobacteria during the “bloom” of water in the Lower Suzdal Lake (St. Petersburg, Russia), *Al'gologiya*, 2010, Vol. 20, No. 2, pp. 210–233 (in Russian).
5. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. T. VI. Kaspiiskoe more* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. VI. Caspian Sea), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 360 p. (in Russian).
6. Zonn I. S., Kostyanov A. G., Kosarev A. N., Zhil'tsov S. S., *Kaspiiskoe more: Entsiklopediya* (Caspian Sea: Encyclopedia), Moscow: Vostochnaya kniga, 2016, 560 p. (in Russian).
7. Kalinskaya D. V., Medvedeva A. V., Aleskerova A. A., Influence of dust transport on the intensity of cyanobacterial bloom in Caspian Sea, *Optika atmosfery i okeana*, 2021, Vol. 34, No. 9, pp. 689–695 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20210904.
8. *Kaspiiskoe more: Gidrologiya i gidrokhimiya* (Caspian Sea: Hydrology and hydrochemistry), S. S. Baidin, A. N. Kosarev (eds.), Moscow: Nauka, 1986, 261 p. (in Russian).
9. Aleskerova A. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Lishaev P. N., Miziuk 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, DOI: 10.1134/S0001433819090056.
10. Bigham S., Zarei Darki B., Patimar R., Jorjani E., Physical-Chemical Factors Affecting Diversity and Distribution of Blue-green Algae in the Southern Caspian, *J. Phycological Research*, 2019, Vol. 3, No. 1, pp. 275–286, DOI: 10.29252/JPR.3.1.275.
11. Knysh V., Ibrayev R., Korotaev G., Inyushina N., Seasonal variability of climatic currents in the Caspian Sea reconstructed by assimilation of climatic temperature and salinity into the model of water circulation, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2008, Vol. 44, pp. 236–249, DOI: 10.1134/S0001433808020114.
12. Kopelevich O. V., Vazyulya S. V., Grigoriev A. V., Khrapko A. N., Sheberstov S. V., Sahling I. V., Penetration of visible solar radiation in waters of the Barents Sea depending on cloudiness and coccolithophore blooms, *Oceanology*, 2017, Vol. 57, pp. 402–409, DOI: 10.1134/S0001437017020096.
13. Kopylov A. I., Kosolapov D. B., Zabotkina E. A., Distribution of picocyanobacteria and virioplankton in mesotrophic and eutrophic reservoirs: The role of viruses in mortality of picocyanobacteria, *Biology Bull.*, 2010, Vol. 37, pp. 565–573, DOI: 10.1134/S1062359010060038.
14. Kubryakov A. A., Lishaev P. N., Aleskerova A. A., Stanichny S. V., Medvedeva A. A., Spatial distribution and interannual variability of cyanobacteria blooms on the North-Western shelf of the Black Sea in 1985–2019 from satellite data, *Harmful Algae*, 2021, Vol. 110, pp. 102–128, DOI: 10.1016/j.hal.2021.102128.
15. Naghdi K., Moradi M., Kabiri K., Rahimzadegan M., The effects of cyanobacterial blooms on MODIS-L2 data products in the southern Caspian Sea, *Oceanologia*, 2018, Vol. 60, No. 3, pp. 367–377, DOI: 10.1016/j.oceano.2018.02.002.

16. Nasrollahzadeh H., Makhloogh A., Pourgholam R., Vahedi F., Qanqermeh A., Foong S., The study of *Nodularia spumigena* bloom event in the southern Caspian Sea, *Applied Ecology and Environmental Research*, 2011, Vol. 9, pp. 141–155, DOI: 10.15666/aeer/0902_141155.
17. Oyama Y., Matsushita B., Fukushima T., Cyanobacterial Blooms as an Indicator of Environmental Degradation in Waters and Their Monitoring Using Satellite Remote Sensing, *Aquatic Biodiversity Conservation and Ecosystem Services*, 2016, pp. 71–85, DOI: 10.1007/978-981-10-0780-4_6.
18. Roohi A., Kideys A. E., Sajjadi A., Hashemian A., Pourghola R., Fazli H., Khanari A. G., Eker-Develi E., Changes in biodiversity of phytoplankton, zooplankton, fishes and macrobenthos in the Southern Caspian Sea after the invasion of the ctenophore *Mnemiopsis leidyi*, *Biological Invasions*, 2010, Vol. 12, pp. 2343–2361, DOI: 10.1007/s10530-009-9648-4.
19. Rubakina V. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Seasonal Variability of the Diurnal Cycle of the Black Sea Surface Temperature from the SEVIRI Satellite Measurements, *Physical Oceanography*, 2019, Vol. 26, No. 2, pp. 157–169, DOI: 10.22449/1573-160X-2019-2-157-169.
20. Ward D. M., Castenholz R. W., Miller S. R., Cyanobacteria in Geothermal Habitats, *Ecology of cyanobacteria II: their diversity in space and time*, 2012, pp. 39–63, DOI: 10.1007/978-94-007-3855-3_3.
21. Wynne T. T., Stumpf R. P., Tomlinson M. C., Warner R. A., Tester P. A., Dyble J., Fahnenstiel G. L., Relating spectral shape to cyanobacterial blooms in the Laurentian Great Lakes, *Intern. J. Remote Sensing*, 2008, No. 29, pp. 3665–3672, DOI: 10.1080/01431160802007640.
22. Zakharkov S. P., Selina M. S., Vanin N. S., Shtraikhert E. A., Biebov N., Phytoplankton characteristics and hydrological conditions in the western part of the Sea of Okhotsk in the spring of 1999 and 2000 based on expeditionary and satellite data, *Oceanology*, 2007, Vol. 47, pp. 519–530, DOI: 10.1134/S0001437007040091.