

УДК 551.46

АНОМАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В РАЗВИТИИ ФИТОПЛАНКТОНА ЧЕРНОГО МОРЯ, ЗАФИКСИРОВАННЫЕ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2021 г. А. С. Востокова¹, академик РАН Л. И. Лобковский¹, С. В. Востоков^{1,*}

Поступило 10.08.2020 г.

После доработки 21.10.2020 г.

Принято к публикации 03.12.2020 г.

На основе анализа спутниковых данных за период 2000–2020 гг. зафиксированы аномальные явления в развитии фитопланктона в Черном море. В поле хлорофилла *a* выявлены не характерные для летнего периода цветения диатомовых в 2001, 2010 и 2015 г., которые развивались в условиях отрицательной аномалии температуры поверхностного слоя, вызванной активным ветровым перемешиванием. Максимально высокий уровень развития летних цветений кокколитофорид отмечен в 2006, 2012 и 2017 г. Они наблюдались после самых холодных зим. Показано, что в отдельные годы в условиях аномально низких летних температур и активного ветрового перемешивания летняя вегетация кокколитофорид выражена слабо и может замещаться развитием диатомовых. По спутниковым данным за двадцатилетний период выявлены многочисленные признаки массового развития кокколитофорид в холодный период года. Зимние цветения кокколитофорид развиваются в условиях теплых зим с низкой ветровой активностью. Отмечено, что после зимних цветений кокколитофорид их летняя вегетация в значительной степени сглажена. Обсуждается влияние гидрометеорологических факторов на сезонную и межгодовую изменчивость фитопланктона.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, дистанционное зондирование, хлорофилл, фитопланктон, аномальные явления, многолетняя изменчивость

DOI: 10.31857/S2686739721030129

Фитопланктон — основное продукционное звено морской экосистемы. Несмотря на длительный период исследований, изменчивость фитопланктона в Черном море изучена недостаточно. Многие аномальные явления в развитии фитопланктона, имевшие место в последние десятилетия, не были зафиксированы и изучены традиционными методами исследований. Причиной является отсутствие непрерывных наблюдений за количественными характеристиками фитопланктона, особенно в открытых районах моря. Развитие технологий спутникового зондирования позволяет изучать основные закономерности сезонной и межгодовой изменчивости фитопланктона непрерывно на всей акватории моря, выявлять многолетние тренды, региональные особенности и их связь с климатическими факторами [1–6]. Мультисенсорный подход создает возможность для изучения структурных изменений в фитопланктоне Черного моря, а также их

связь с гидрометеорологическими факторами среды в сезонном и многолетнем аспектах [1, 4, 6, 9].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сезонная и многолетняя динамика фитопланктона была изучена по спутниковым данным о распределении и изменчивости концентраций хлорофилла *a* (ХЛ), рассчитанных на основе измерений сканера Modis Aqua, [1, 6]. Развитие кокколитофорид в Черном море оценивалось по показателю отражения на длине волны 551 нм, а также параметру РИС (концентрация взвешенного неорганического углерода), рассчитанному по специальному алгоритму [8]. Верификация спутниковых данных проведена с использованием результатов контактных измерений ХЛ в разные биологические сезоны года [1]. Для оценки многолетней изменчивости гидрометеорологических условий использовались спутниковые данные по температуре и скорости ветра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ряду характерных для Черного моря зимних цветений диатомовых водорослей необходимо

¹ Институт океанологии имени П.П. Ширинова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: Vostokov_S@mail.ru

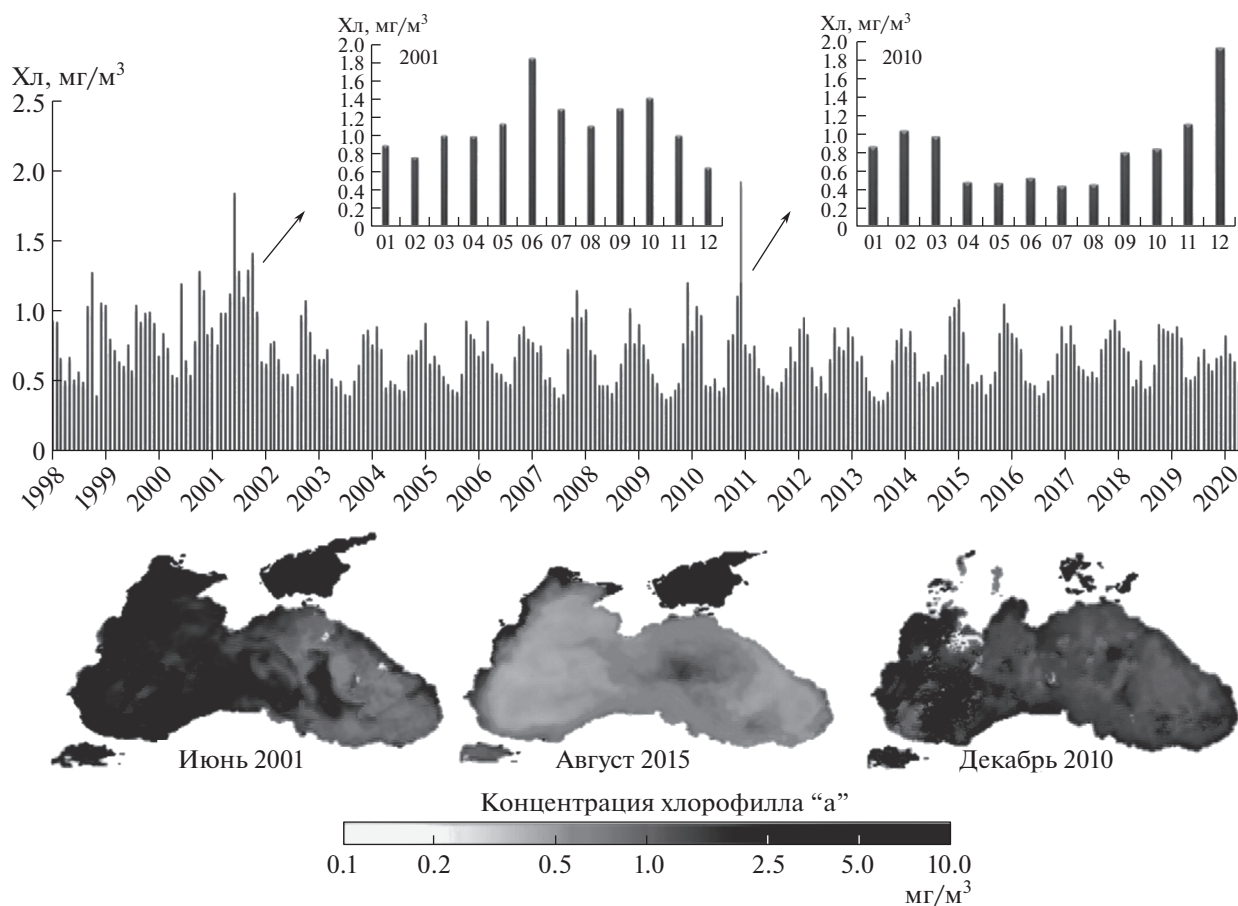


Рис. 1. Аномальные летние и зимние цветения вод фитопланктоном, отразившиеся в поле хлорофилла (данные сканера Modis Aqua).

отметить аномальные зимние цветения 2001 и 2010 г. Судя по содержанию хлорофилла *a*, зимнее цветение 2010 г. достигало наибольшего уровня в декабре (рис. 1), в западной части моря. При этом оно было также зарегистрировано судовыми наблюдениями в северо-восточной части моря [6].

Среди аномальных цветений, выявленных по данным сканеров цвета в летний период, выделяется массовая вегетация диатомовых 2001 г., достигавшая максимума в июне (рис. 1). Максимальные концентрации хлорофилла *a* летом 2001 г. достигали величин, характерных для зимнего продукционного периода (см. рис. 1). Эти цветения обычно связаны с активным ростом мелких диатомовых, чаще всего *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima* [6]. Летнее цветение 2001 г. развивалось в условиях отрицательной аномалии температуры (рис. 2).

По спутниковым данным температура поверхностного слоя воды в период цветения была на 5° ниже характерных для данного сезона многолетних значений (см. рис. 2). Причина данной ано-

малии может заключаться в активном ветровом перемешивании, понижавшем температуру поверхностного слоя и способствующем обогащению слоя фотосинтеза биогенными элементами. Отметим, что 2001 г. отличался высокими концентрациями хлорофилла *a* в течение летне-осеннего сезона, а также пиковыми концентрациями в начале зимнего периода, что характеризует его как максимально продуктивный за весь двадцатилетний период спутниковых наблюдений.

Массовое развитие диатомовых водорослей в летний период является редким необычным явлением. В июле—августе 2015 г. в поле хлорофилла *a* было зафиксировано не характерное для летнего периода пятно цветения, наблюдавшееся в северо-восточной части моря (см. рис. 1). По спутниковым данным в этот период в восточной части моря наблюдались признаки активного ветрового воздействия и сгонных явлений, проявившихся в прибрежной зоне северо-восточной части моря. В поле температуры область цветения была представлена обширным холодным пятном. Таким образом, на основе совместного анализа

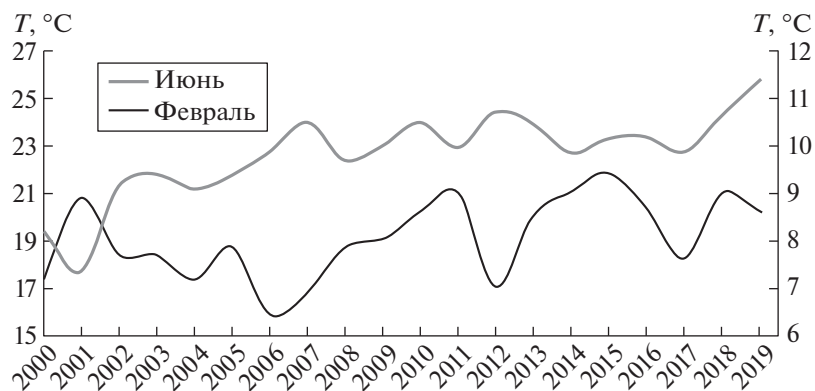


Рис. 2. Многолетняя изменчивость зимней и летней температуры поверхностного слоя Черного моря по данным дистанционного зондирования.

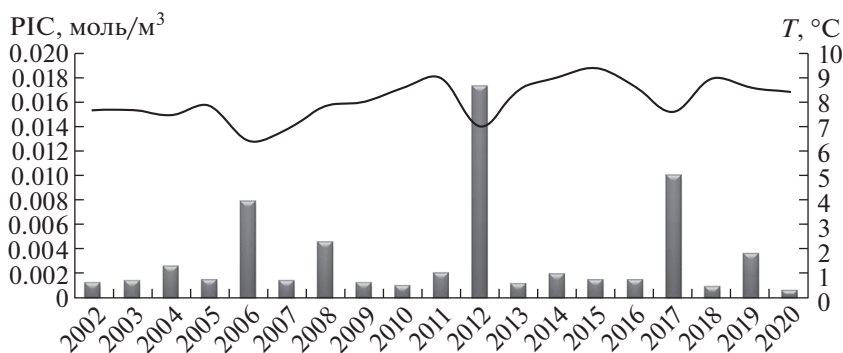


Рис. 3. Динамика летних цветений вод кокколитофоридами и зимняя температура поверхностного слоя (февраль) по данным сканеров Modis Aqua и Modis Terra.

данных спутниковых скатерометров и распределения температуры можно полагать, что цветение было инициировано локальным ветровым воздействием, усилившим перемешивание вод и обогащение слоя фотосинтеза биогенными элементами. Аналогичный вывод сделан на основе анализа спутниковых гидрометеорологических данных и результатов измерений стационарных буев [5]. Подобное пятно цветения было отмечено в том же районе моря и в августе 2010 г. (см. рис. 1). Изучение динамики развития фитопланктона в 2010 и 2015 г. показал, что данные локальные цветения были началом периода осенней вегетации фитопланктона на всей акватории моря, инициированного активным ветровым перемешиванием.

Характерной чертой сезонной сукцессии черноморского фитопланктона является массовое развитие кокколитофорид в раннелетний сезон [1, 2, 6, 9]. За двадцатилетний период выделяются три года – 2006, 2012, 2017 – с максимально высоким уровнем развития кокколитофорид в летний период. Эти цветения слабо выражены в поле хлорофилла *a* и оценивались по расчетному парамет-

ру – PIS. Совместный анализ спутниковых данных по межгодовой динамике PIS и температуры поверхностного слоя ($T^{\circ}\text{C}$) показывает, что летние цветения кокколитофорид достигали максимального уровня развития после самых холодных зим (рис. 3).

Связь интенсивности летней вегетации кокколитофорид с зимними температурами была также отмечена ранее [1, 7, 9]. В этой закономерности отмечается, по крайней мере, одно исключение. После достаточно холодной зимы 2004 г. летнее цветение было выражено слабо (см. рис. 3). Причиной может быть аномальная климатическая ситуация летом 2004 г., значительно отличавшаяся от условий 2006, 2012 и 2017 г. (см. рис. 2). Период летней вегетации кокколитофорид в 2004 г. характеризовался аномально низкими температурами поверхностного слоя воды в большинстве районов Черного моря. При этом температура не являлась фактором прямого воздействия, а свидетельствовала об активном ветровом перемешивании, что могло препятствовать массовому развитию кокколитофорид, для которого необходима устойчивая стратификация водной толщи.

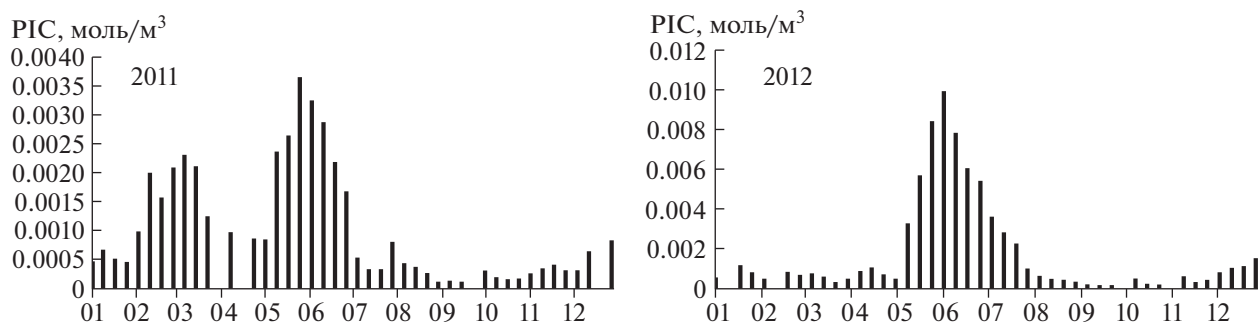


Рис. 4. Динамика развития кокколитофорид (PIC) в годы с теплой (2011 г.) и холодной (2012 г.) зимой по данным сканера Modis Aqua.

Отметим, что летнее цветение кокколитофорид в 2004 г. фиксировалось лишь в крайней юго-восточной части моря, которая являлась в этот период своеобразным теплым сектором и не была подвержена активному ветровому воздействию.

В последние годы в ходе судовых наблюдений были зафиксированы и изучены необычные для Черного моря зимние и зимне-весенние цветения кокколитофорид. Феномен массового развития кокколитофорид в холодный период года был также описан ранее [10], однако это явление не рассматривалось как характерное для Черного моря. Сопоставление полученных в последние годы данных натуральных наблюдений в период зимней вегетации кокколитофорид [3] с измерениями сканеров цвета позволило более определенно интерпретировать многочисленные признаки массового развития кокколитофорид в холодный период года, выявленных на основе спутникового зондирования. Таким образом, были идентифицированы многочисленные зимние цветения кокколитофорид в масштабах всей акватории моря (1998, 2001, 2005, 2012, 2013–2014) и ряд локальных вспышек (2002, 2003, 2006, 2007, 2009, 2013, 2015–2019). Совместный анализ спутниковых данных и результатов натуральных наблюдений показал, что в условиях холодных зим и активной зимней конвекции массового развития кокколитофорид не наблюдается. При повышении температуры и прогреве поверхностного слоя теплыми зимами начинаются стабилизация водной толщи и формирование термоклина. Отсутствие ветрового перемешивания, разрушающего устойчивую стратификацию, является важным фактором для инициации цветения кокколитофорид в зимний период [3]. При этом абсолютные значения температуры, характерные для теплых (8–10°C) и холодных (6–8°C) зим, не являются фактором, ограничивающим массовое развитие этих водорослей [11]. Примеры динамики кокколитофорид в годы с разными зимними условиями представлены на рис. 4.

Развитие кокколитофорид в условиях теплой зимы 2011 г. характеризовалось выраженным максимумом зимней вегетации водорослей и слабым летним цветением в июне (рис. 4). Принципиально иная ситуация наблюдается в годы с холодными зимами и активной конвекцией, усиленной ветровым перемешиванием. Характерным примером развития кокколитофорид в условиях холодной зимы является 2012 г. (см. рис. 4). Холодной зимой 2012 г. с температурой на поверхности около 6°C зимнего цветения кокколитофорид не наблюдалось. При этом в июне 2012 г. было зафиксировано одно из самых мощных летних цветений за весь двадцатилетний период наблюдений [1, 2]. Приведенные данные иллюстрируют два различных типа развития кокколитофорид в течение года в зависимости от климатических особенностей и текущих гидрометеорологических условий.

Таким образом, на основе анализа данных дистанционного зондирования за двадцатилетний период был зафиксирован ряд аномальных явлений в развитии фитопланктона, проявившихся в поле различных биооптических характеристик, измеряемых спутниковыми сканерами цвета. Выявлены аномальные летние цветения (2001, 2010, 2015 г.), проявившиеся в поле хлорофилла *a*. Отмечены годы (2010 и 2001 г.), когда зимняя вегетация диатомовых достигала пиковых уровней развития. Определены параметры летних цветений кокколитофорид, наблюдавшихся после холодных зим. Показано, что в отдельные годы в условиях аномально низких летних температур и активного ветрового перемешивания летняя вегетация кокколитофорид выражена слабо и может замещаться развитием диатомовых. Выявлено, что за последние двадцать лет в зимний период численность кокколитофорид многократно достигала уровня цветения. Одним из основных факторов, определяющих инициацию и развитие зимних цветений кокколитофорид, является стабильность поверхностного слоя, которая реализуется в условиях теплых и маловетренных зим.

Отмечено, что после зимних цветений кокколитофорид их летняя вегетация в значительной степени сглажена.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме госзадания № 0149-2019-0005 и финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90125.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Востоков С.В., Лобковский Л.И., Востокова А.С., Соловьев Д.М.* // Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Черном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла *a* // ДАН. 2019. Т. 485. № 1. С. 99–103.
<https://doi.org/10.31857/S0869-5652485199-103>
2. *Kopelevich O., Burenkov V., Sheberstov S., Vazyulya S., Kravchishina M., Pautova L., Silkin V., Artemiev V., Grigoriev A.* Satellite Monitoring of Coccolithophore Blooms in the Black Sea from Ocean Color Data // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 146. P. 113–123.
3. *Якубенко В.Г., Востоков С.В., Силкин В.А., Паутова Л.А., Востокова А.С.* Гидрофизические условия формирования цветения кокколитофорид в водах Абхазского сектора северо-восточной части Черного моря в марте 2011 г. // Экология гидросферы. 2018. № 1 (2).
<http://hydrosphere-ecology.ru/106>.
4. *Востоков С.В.* Взвешенное вещество как показатель продуктивности в западной части Черного моря // Океанология. 1996. Т. 36. № 2. С. 260–267.
5. *Kubryakov A.A., Zatsepin A.G., Stanichny S.V.* Anomalous Summer-autumn Phytoplankton Bloom in 2015 in the Black Sea Caused by Several Strong Wind Events // Journal of Marine Systems. 2019. V. 194. C. 11–24.
6. *Silkin V.A., Pautova L.A., Giordano M., Chasovnikov V.K., Vostokov S.V., Podymov O.I., Pakhomova S.V., Moskalenko L.V.* Drivers of Phytoplankton Blooms in the Northeastern Black Sea // Marine Pollution Bulletin. 2019. 138. P. 274–284.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11>
7. *Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Вазюля С.В.* Сезонные и межгодовые изменения биооптических характеристик Черного моря по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 190–199.
8. *Gordon H., Boynton G.C., Balch W., Groom S., Harbour D., Smyth T.* Retrieval of Coccolithophore Calcite Concentration from SeaWiFS Imagery // Geophysical Research Letters. 2001. 28. P. 1587–1590.
<https://doi.org/10.1029/2000GL012025>
9. *Mikaelyan S., Pautova L.A., Chasovnikov V.K., et al.* Alternation of Diatoms and Coccolithophores in the North-eastern Black Sea: A Response to Nutrient Changes // Hydrobiologia. 2015. V. 755. P. 89–105.
10. *Суханова И.Н.* Феномен массового развития кокколитофорид в позднеосенний период в Черном море // ДАН. 1995. Т. 340. № 2. С. 256–259.
11. *Neukermans G., Oziel L., Babin M.* Increased Intrusion of Warming Atlantic Water Leads to Rapid Expansion of Temperate Phytoplankton in the Arctic // Glob Change Biol. 2018. 00:1–9.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14075>

ANOMALOUS PHENOMENA IN THE BLACK SEA PHYTOPLANKTON DEVELOPMENT, RECORDED BY REMOTE SENSING METHODS

A. S. Vostokova^{a, #}, Academician of the RAS L. I. Lobkovskiy^a, and S. V. Vostokov^a

^a Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]E-mail: Vostokov_S@mail.ru

On the base of satellite data analysis for the period 2000–2020, anomalous phenomena in the development of phytoplankton in the Black sea were recorded. In the chlorophyll “a” field, anomalous summer blooms were detected in 2001, 2010 and 2015, which developed under conditions of a negative anomaly in the surface layer temperature caused by active wind mixing. The highest level of coccolithophorids summer blooms of development was fixed in 2006, 2012 and 2017. They were observed after abnormally cold winters. It is shown that in conditions of low summer temperatures, mass development of coccolithophorids may not occur. Over a twenty-year period, numerous signs of active winter vegetation of coccolithophorids were revealed on the base of satellite data. Winter blooms of coccolithophorids develop in warm winters with low wind activity. It is noted that after the winter blooms of coccolithophorids, their summer vegetation is largely smoothed. The influence of hydrometeorological factors on seasonal and inter annual variability of phytoplankton is discussed.

Keywords: remote sensing, satellite monitoring long term changes, chlorophyll, phytoplankton