

УДК 551.46

СЕЗОННАЯ И МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФИТОПЛАНКТОНА В ЧЁРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И КОНТАКТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ХЛОРОФИЛЛА *a*

С. В. Востоков^{1,*}, член-корреспондент РАН Л. И. Лобковский¹,
А. С. Востокова², Д. М. Соловьев³

Поступило 26.07.2018 г.

На основании обработки данных сканера цвета Modis Aqua и многолетних наблюдений в северо-восточной части Чёрного моря изучены закономерности сезонной и многолетней изменчивости фитопланктона, в том числе кокколитофорид. Показано, что фитопланктон в прибрежных и открытых водах Чёрного моря достигает наибольшего развития в осенне-зимний и зимне-весенний сезоны, в периоды развитой зимней конвекции. Для прибрежных вод также характерен выраженный весенний пик концентраций хлорофилла *a*, связанный с цветением вод фитопланктоном в марте. Отмечается связь между уровнем развития кокколитофорид в летний период и минимальной температурой поверхностного слоя предшествующей зимой. Наиболее мощные цветения кокколитофорид, зафиксированные в летний период, наблюдались после самых холодных зим. По спутниковым данным и натурным наблюдениям зафиксированы необычные для Чёрного моря зимние и зимне-весенние цветения вод кокколитофоридами, развивающиеся в условиях тёплых зим с ослабленной ветровой активностью.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, фитопланктон, дистанционное зондирование, многолетняя изменчивость.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485199-103>

Фитопланктон — основное продукционное звено морской экосистемы [1]. Пространственно-временная динамика фитопланктона как основного продуцента органического и минерального вещества во многом определяет функционирование и сезонный цикл развития морской экосистемы.

Концентрация хлорофилла *a* характеризует развитие фитопланктона и его продукционные характеристики [2, 3]. Количественные характеристики фитопланктона отличаются значительной пространственно-временной изменчивостью. Несмотря на длительный период исследований, изменчивость фитопланктона в Чёрном море изучена недостаточно. Причинами являются отсутствие регулярных наблюдений и дискретный характер имеющихся данных о сезонной и многолетней динамике фитопланктона, особенно в открытых водах моря. Развитие технологий спутникового зондирования позволяет существенно уточнять черты сезонной и межгодовой изменчивости фитопланктона, выяс-

нять их региональные особенности, выявлять многолетние тренды [3–5].

Для изучения пространственной и временной изменчивости фитопланктона в Чёрном море были использованы материалы спутникового зондирования (Modis Aqua) в период с 2002 по 2017 г. и результаты контактных измерений хлорофилла *a* в северо-восточной части Чёрного моря с 2010 по 2015 г. (рис. 1), выполненных в экспедиционных условиях экстрактным методом с фотометрическим и флуориметрическим окончаниями (ГОСТ 17.1.4.02-90) [7].

Экспедиционные исследования черноморского фитопланктона показали, что за последнее десятилетие в структуре планктонных фитоценозов Чёрного моря происходят серьёзные трансформации. Они проявляются в снижении роли диатомовых водорослей и усилении роли кокколитофорид [8, 9]. Массовое развитие кокколитофорид в Чёрном море, как правило, слабо выражено в поле хлорофилла *a* (рис. 2). Поэтому закономерности развития кокколитофорид в Чёрном море проанализированы по динамике показателя отражения на длине волны 551 нм, а также концентрации взвешенного неорганического углерода (PIC) — параметра, рассчитанного по специальному алгоритму [6] (рис. 3).

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова
Российской Академии наук, Москва

² Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

³ Морской гидрофизический институт
Российской Академии наук, Севастополь

*E-mail: vostokov_s@mail.ru

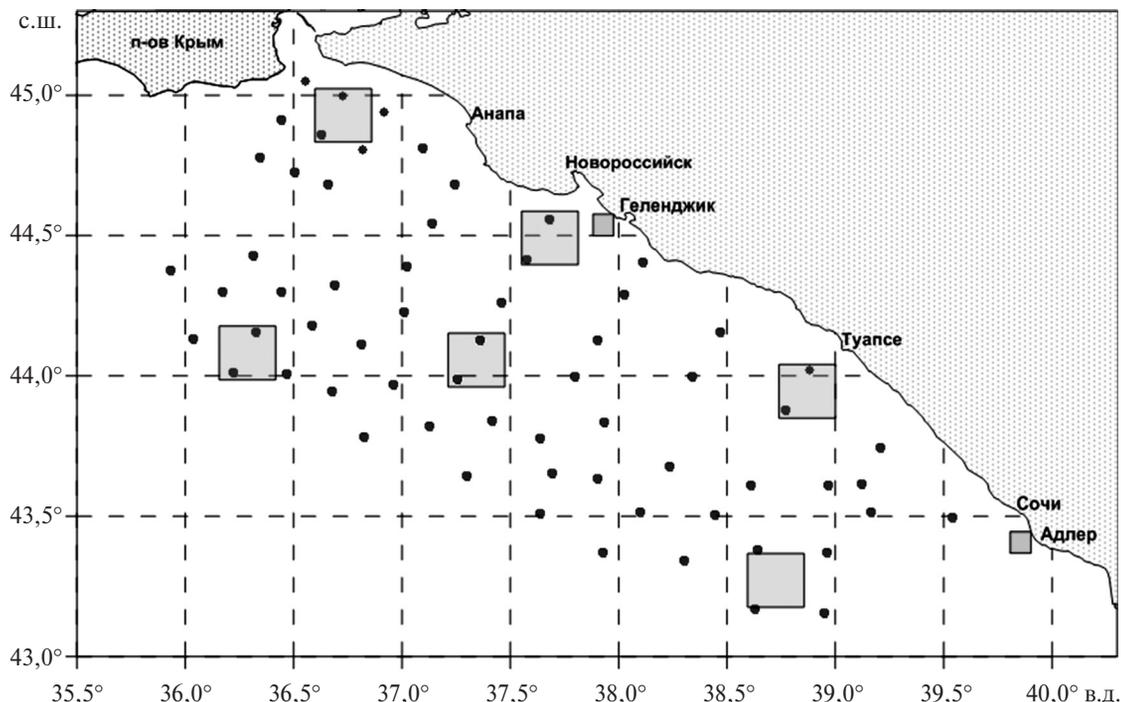


Рис. 1. Расположение точек экспедиционных исследований и спутниковых полигонов в российском секторе Чёрного моря.

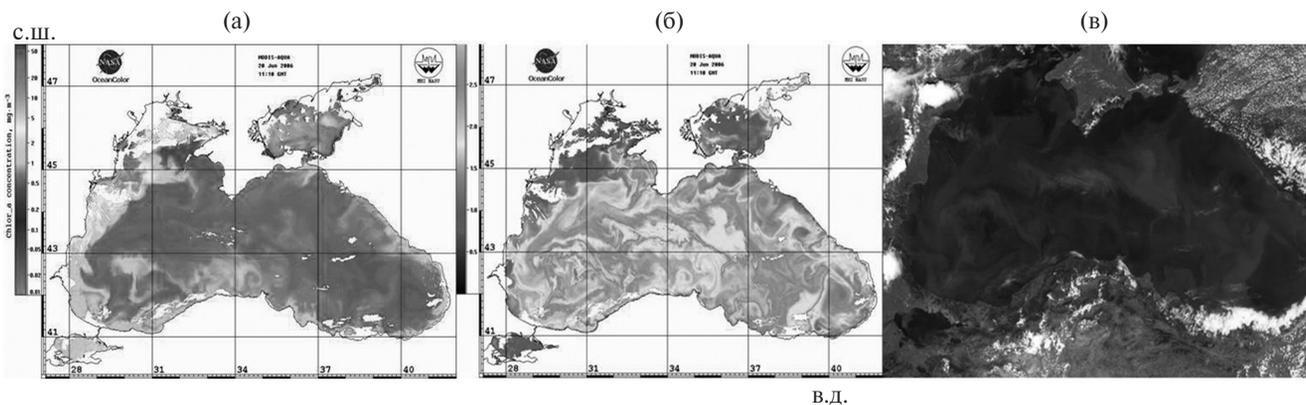


Рис. 2. Распределение параметров, характеризующих развитие фитопланктона в период массового развития кокколитофорид в Чёрном море: а — хлорофилл *a*; б — исходящая радиация на длине волны 551 нм; в — Чёрное море в момент цветения (Modis Aqua 20.06.2006).

Анализ сезонной и межгодовой изменчивости поверхностных концентраций хлорофилла *a* в период с 2002 по 2017 г. в Чёрном море показывает, что наиболее продуктивными сезонами являются осенне-зимний и зимне-весенний периоды. По протяжённости и уровню развития для Чёрного моря большее значение имеют осенне-зимние цветения вод. Исключениями являются 2001 и 2015 гг. В 2001 г. в Чёрном море было отмечено цветение вод фитопланктоном в летний сезон, захватившее большую часть акватории. В августе 2015 г. было зафиксировано очаговое цветение вод в северо-восточной части моря, проявлявшееся в поле хлорофилла *a*

в течение трёх месяцев. Судя по распределению температуры на поверхности моря (данные Modis Aqua), цветение развивалось в районе циклонического вихря, индуцированного локальным ветровым воздействием, усилившим перемешивание вод в поверхностном слое.

По осреднённым спутниковым данным как в прибрежных, так и открытых водах отмечаются осенне-зимний и зимне-весенний периоды активного развития фитопланктона (рис. 3). Существенным отличием сезонной динамики хлорофилла *a* в прибрежной зоне служит выраженный весенний пик концентраций хлорофилла, связанный

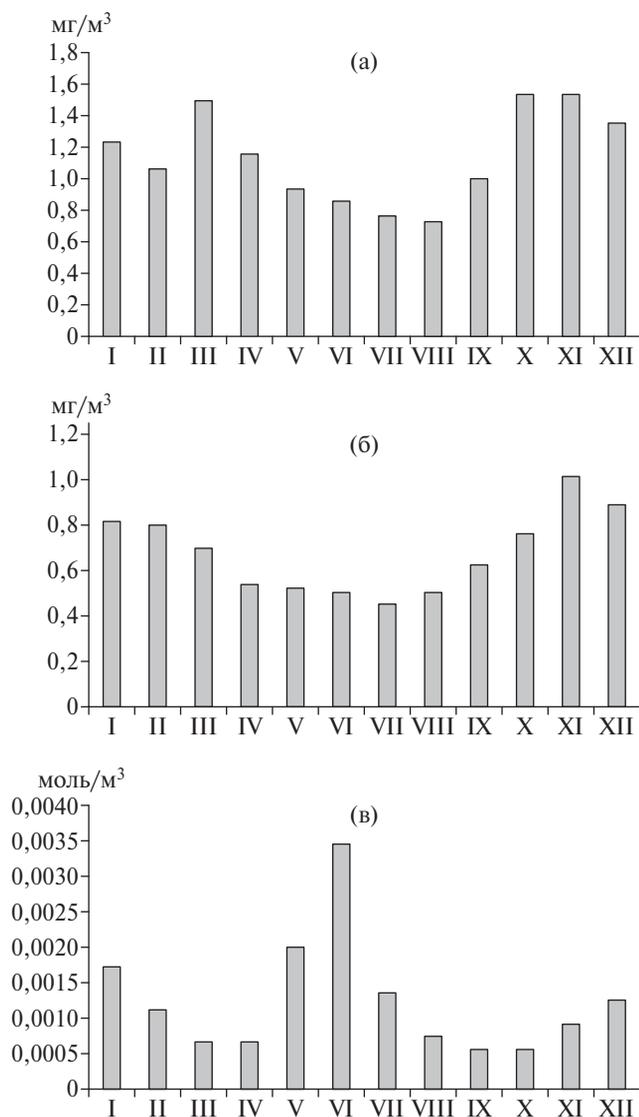


Рис. 3. Изменение средних многолетних концентраций хлорофилла по месяцам в северо-восточной части Чёрного моря: а — в прибрежных водах; б — в открытых водах; в — изменение концентраций взвешенного неорганического углерода (PIC).

с массовым развитием фитопланктона в марте. Данный результат подтверждается результатами прибрежного мониторинга [8].

Анализ данного материала также свидетельствует, что периоды развития кокколитофорид разной интенсивности наблюдались ежегодно летом с мая по июль. При этом примерно с двухлетней периодичностью в 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2012 гг. происходили цветения вод Чёрного моря кокколитофоридами. Отмечено, что развитие кокколитофорид обычно начинается в начале лета в открытой зоне моря, преимущественно в его восточной и северо-восточной частях, которые являются в этот период своеобразным тёплым сектором

Чёрного моря. В дальнейшем развитие кокколитофорид захватывает остальную акваторию моря и часть прибрежных районов, куда кокколитофориды могут заноситься течениями в рамках вихревой циркуляции. В годы наиболее интенсивного развития кокколитофорид в летний период (2006 и 2012 гг.) цветение захватывало практически всю акваторию Чёрного моря за исключением отдельных областей северо-западного и западного шельфов. Из анализа карт следует, что в прибрежных районах уровень развития кокколитофорид во время цветения по характерным оптическим показателям в целом ниже, чем в открытых водах. Данный вывод подтверждает результаты натурных наблюдений. Кроме того, по спутниковым данным выделяются отдельные годы, отличающиеся нехарактерным цветением вод кокколитофоридами в зимний и весенний периоды (декабрь 2001, 2006, 2010 гг., январь, март 2011 г.). Причиной данных явлений могут служить благоприятные гидрохимические, а также гидрометеорологические условия, характерные для тёплых зим со слабой ветровой активностью, которая не препятствует формированию термоклина. В данном случае наличие термоклина является принципиальным фактором среды, позволяющим водорослям оставаться в зоне светового оптимума, что является необходимым условием для развития кокколитофорид в поверхностном слое. Особенности развития фитопланктона и, в частности, кокколитофорид в Чёрном море обсуждались рядом авторов [8, 9, 11]. Совместный анализ спутниковых данных по межгодовой динамике концентраций взвешенного неорганического углерода (PIC) и температуры (T) в зимний период указывает на то, что самые мощные цветения кокколитофорид в летний период наблюдались после самых холодных зим (рис. 4).

Температура воды в зимний период в данном случае является показателем интенсивности зимней конвекции и обогащения поверхностных вод биогенными элементами.

Сравнение концентраций хлорофилла a , рассчитанных на основе данных дистанционного зондирования с использованием комбинации алгоритмов по алгоритму OSX (комбинации алгоритмов CHL_OSC4 и CHL_HU), показывает, что спутниковые значения превышают концентрации хлорофилла a в среднем в 1,7–2,3 раза. Завышение незначительно различается для изученных сезонов года, что не препятствует анализу временной изменчивости фитопланктона по данным дистанционного зондирования.

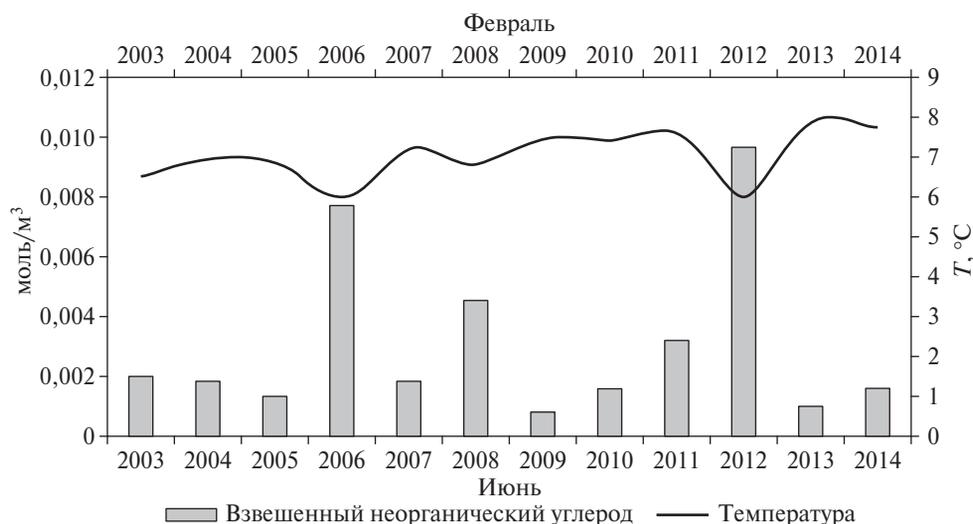


Рис. 4. Концентрации взвешенного неорганического углерода в период максимального развития кокколитофорид в северо-восточной части Чёрного моря и динамика минимальных зимних температур (T) в феврале по данным дистанционного зондирования.

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. По спутниковым данным фитопланктон в открытых водах Чёрного моря достигает наибольшего развития в осенне-зимний и зимне-весенний сезоны, т.е. в период развитой зимней конвекции. Это противоречит представлениям о необходимости устойчивой стратификации для развития зимне-весенних цветений в водах умеренного пояса. Факт бурного развития фитопланктона во всём конвективном слое, толщина которого в зимних условиях значительно превышает глубину компенсационной точки фотосинтеза, не согласуется с моделью Свердруп.

2. Для прибрежных вод характерен выраженный пик концентраций хлорофилла a , связанный с бурным развитием фитопланктона в марте (цветением). В открытых водах Чёрного моря весеннего пика развития фитопланктона в марте по осреднённым спутниковым данным не наблюдается.

3. Массовое развитие кокколитофорид в Чёрном море происходит ежегодно в летний период с мая по июль. При этом примерно с двухлетней периодичностью развитие кокколитофорид достигает уровня цветения.

4. Отмечается связь между уровнем развития кокколитофорид в летний период и минимальной температурой поверхностных вод предшествующей зимой. Самые мощные цветения кокколитофорид в летний период наблюдались после самых холодных зим.

5. В последнее десятилетие по спутниковым и экспедиционным данным зафиксированы не-

обычные для Чёрного моря зимние и ранне-весенние цветения вод кокколитофоридами, которые развиваются в условиях тёплых зим при слабой ветровой активности.

Благодарности. Авторы выражают благодарность С.В. Шеберстову за помощь в численной обработке спутниковых данных и Л.А. Паутовой за полезное обсуждение результатов.

Источник финансирования. Работа выполнена по теме госзадания № 0149–2019–0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раймонд Дж. Э. Планктон и продуктивность океана. Т. 1. Фитопланктон. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983.
2. Ведерников В.И. Особенности распределения первичной продукции и хлорофилла в Черном море в весенний и летний периоды // Изменчивость экосистемы Черного моря. Естественные и антропогенные факторы. М.: Наука, 1991. С. 128–147.
3. Востоков С.В., Лисицын Б.Е., Коновалов Б.В. и др. Мезомасштабная изменчивость концентраций хлорофилла a , взвешенного органического вещества и спектрального показателя поглощения света пигментами фитопланктона в поверхностном слое северо-восточной части Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 235–248.
4. Финенко З.З., Суслин В.В., Ковалева И.В. Сезонные и многолетние изменения концентрации хлорофилла в Черном море по спутниковым наблюдениям // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 596–605.
5. OceanColorWebChlorophylla. URL: https://ocean-color.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/

6. ГОСТ 17.1.4.02-90. Государственный контроль качества воды. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: Изд-во стандартов, 2003.
7. Зернова В.В., Незлин Н.П. Сезонные изменения фитоценоза северо-восточной части Черного моря в 1978 г. // Сезонные изменения черноморского планктона. М.: Наука, 1983. С. 12–34.
8. Паутова Л.А., Микаэлян А.С., Силкин В.А. Структура планктонных фитоценозов шельфовых вод северо-восточной части Черного моря в период массового развития *Emiliania huxleyi* в 2002–2005 гг. // Океанология. 2007. Т. 47. № 3. С. 408–417.
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. Silkin V.A., Pautova L.A., Giordano M., Chasovnikov V.K., Vostokov S.V., Podymova O.I., Pakhomov S.V., Moskalenko L.V. Drivers of Phytoplankton Blooms in the North-Eastern Black Sea // Marine Pollution Bull. 2019. V. 138. P. 274–284.

ESTIMATION OF SEASONAL AND INTER-ANNUAL VARIATIONS OF PHYTOPLANKTON IN THE BLACK SEA ON THE BASE OF REMOTE SENSED DATA PROCESSION AND CHLOROPHYLL *a* *in situ* MEASUREMENTS

S. V. Vostokov, Corresponding Member of the RAS L. I. Lobkovskiy,
A. S. Vostokova, D. M. Solov'ev

Received July 26, 2018

The patterns of the seasonal and inter annual variability in the development of phytoplankton, including coccolithophores, were studied in the northeastern part of the Black Sea in various seasons. The research was carried out on the base of remote sensed data provided by the Modis Aqua ocean color scanner and long-term ship observations. The results indicate that, in the coastal and open waters of the Black Sea, the development of phytoplankton reaches the highest level in the fall–winter and winter–spring seasons, i.e., in the periods of active winter convection. It was noted that there is a relationship between the level of coccolithophore development in the summer period and the minimal temperature of the sea surface layer in the preceding winter. The most active coccolithophore blooms, were observed after the coldest winters. Unusual winter and early spring coccolithophore blooms taking place in mild hydro meteorological conditions were registered in the Black Sea, on the base of satellite data and were confirmed by *in situ* measurements.

Keywords: chlorophyll *a*, phytoplankton, remote sensing, seasonal and inter annual changes.