Спутниковые наблюдения зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря в холодный сезон 2020/2021 гг.

М. И. Митягина, О. Ю. Лаврова

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: mityag@iki.rssi.ru

В настоящей статье рассматривается редко встречающаяся ситуация зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря, выявленная на основе спутниковых данных. В работе показано, что начиная с конца ноября 2020 г. и до февраля 2021 г. признаки цветения кокколитофорид определяются в данных спутниковых сенсоров оптического диапазона, полученных над восточной частью Чёрного моря. Эти наблюдения, так же как и факт аномального зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря, выявленный авторами статьи в 2019 г., свидетельствуют о необходимости пересмотра существовавшего до последнего времени представления, что регулярное массовое развитие и цветение кокколитофорид в Чёрном море происходит в весенний и раннелетний сезоны. Возможности наблюдения цветения кокколитофорид по спутниковым данным оптического диапазона основаны на том, что оно сопровождается аномально интенсивным рассеянием света в приповерхностной толще благодаря обилию известковых чешуек, на которые распадаются оболочки этих водорослей, что позволяет выделить зоны цветения по яркости восходящего излучения. На основе спутниковых данных определены примерные даты начала цветения и его пика, установлена продолжительность цветения и его пространственные характеристики. Кокколитофориды являются одними из основных известняк-продуцирующих организмов в Мировом океане и оказывают влияние на уровень углекислого газа в атмосфере, а тем самым — на температурный режим и климатические условия. Выявление факта интенсивного цветения кокколитофорид в холодный период года должно внести свой вклад в решение задачи установления основных закономерностей их развития в сезонном и климатическом аспектах.

Ключевые слова: Чёрное море, кокколитофориды, цветение кокколитофорид, вихревые структуры, спутниковый мониторинг, Terra/Aqua MODIS, Landsat-8 OLI-TIRS, информационная система See the Sea

Одобрена к печати: 10.02.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-255-260

Кокколитофориды — это микроскопические морские планктонные одноклеточные жгутиковые водоросли, своеобразие которых состоит в том, что на их оболочке расположены различные по форме и размерам известковые образования, называемые кокколитами (Геологический..., 1978). За счёт производства и экспорта карбоната кальция (часто называемого твёрдым неорганическим углеродом) кокколитофориды оказывают значительное влияние на глобальный углеродный цикл и считаются одним из основных двигателей биологического углеродного насоса (Broecker, Clark, 2009). Кроме того, обладая чувствительностью к изменениям концентрации азота и фосфора в морской воде (Doney et al., 2009), кокколитофориды могут рассматриваться в качестве индикатора воздействия изменения климата на морскую среду, в связи с чем исследования динамики развития и всех аспектов жизнедеятельности кокколитофорид приобретают особую значимость. В Чёрном море наблюдаются структурные изменения фито- и зоопланктонного сообщества (Oguz et al., 2006), обусловленные переменах гидрологической и гидрохимической ситуации в море. В частности, кокколитофориды, доля которых в фитопланктоне Чёрного моря до 80-х гг. прошлого века была мизерной и не превышала 3 %, в настоящее время доминируют по численности и биомассе (Микаэлян и др., 2011). Однако задача определения основных закономерностей формирования структуры кокколитофорид в сезонном и климатическом аспектах не решена до сих пор.

Крупномасштабные области цветения кокколитофорид могут быть выявлены с помощью спутниковых сенсоров оптического диапазона по яркости восходящего излучения благодаря эффекту интенсивного обратного рассеяния света в приповерхностном слое воды кокколитами, на которые распадаются известковые панцири этих водорослей на конечной стадии цветения (Карабашев, Евдошенко, 2015; Копелевич и др., 2012).

Ранее существовало убеждение, что регулярные массовые цветения кокколитофорид в северном полушарии происходят в весенне-летний период (Hopkins et al., 2015). Аналогичные результаты были получены и для Чёрного моря (Карабашев и др., 2006; Паутова и др., 2007; Силкин и др., 2009; Чурилова, Суслин, 2013). Отмечались, однако, единичные случаи цветения кокколитофорид в центральной части Чёрного моря в ноябре 1993 г. (Суханова, 1995) и в его северо-западной части в декабре 2006 г. (Yasakova et al., 2017).

Случай интенсивного зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря был выявлен на основе спутниковой информации в январе – феврале 2019 г. авторами данной статьи (Митягина, Лаврова, 2019).

Рис. 1. Спутниковые изображения восточной части Чёрного моря, синтезированные в естественных цветах по данным сенсора MODIS Aqua от 28 ноября 2020 г., 10:55 UTC (а); 29 декабря 2020 г., 10:10 UTC (б); 1 января 2021 г., 10:40 UTC (в); 22 января 2021 г., 11:00 UTC (г)

В настоящей статье рассматривается ситуация зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря в холодный период 2020/2021 гг., выявленного на основе оперативного анализа спутниковых данных, полученных с помощью сенсоров VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) S-NPP, MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra/Aqua, MSI (*англ.* Multispectral Instrument) Sentinel-2A, -B и OLI-TIRS (*англ.* Operational Land Imager и Thermal Infrared Sensor) Landat-8.

Последовательные стадии цветения кокколитофорид, выявленного из космоса, отражены на *рис. 1* (см. с. 256) серией изображений, синтезированных по данным сенсора MODIS (каналы 1, 4, 3).

Первые признаки начала цветения кокколитофорид в восточной части моря были отмечены по данным спектрорадиометра MODIS, полученным 28 ноября 2020 г. На *рис. 1а* отчетливо видны два ядра активного размножения водорослей, выделяющиеся как области повышенных значений яркости восходящего излучения. Центрам ядер зарождения цветения соответствуют точки с координатами $43^{\circ} 50' 1''$ с. ш., $38^{\circ} 51' 2''$ в. д. и $42^{\circ} 38' 11''$ с. ш., $40^{\circ} 5' 51''$ в. д., расположенные примерно над изобатой 1500 м. Определённая по спутниковым данным совокупная площадь морской поверхности, соответствующей областям формирования цветения, составляет около $17\,000\text{ км}^2$.

На изображении, полученном 29 декабря 2020 г. (см. *рис. 1б*), область цветения, проявляющаяся как зона существенного повышения яркости восходящего излучения, продвинулась к северу и приобрела связность: ядра цветения слились. Цветение постепенно распространяется на глубоководную часть моря. На момент проведения спутниковой съёмки область цветения вытянута в направлении юго-восток–северо-запад примерно на 430 км, вплоть до Керченского предпроливья, её ширина местами достигает 150 км, а общая площадь, определённая по спутниковым данным, составляет около $31\,000\text{ км}^2$.

Изображение, полученное 1 января 2021 г. (см. *рис. 1в*), соответствует пику цветения. Общая площадь области цветения, определённая по спутниковым данным, составляет около $39\,000\text{ км}^2$.

Область цветения, наблюдаемая на изображении от 22 января 2021 г. (см. *рис. 1г*), практически полностью расположена в глубоководной части моря, и в ней опять выделяются два компактных ядра. По сравнению с состоянием на 1 января 2021 г. площадь области цветения несколько уменьшилась и составляет $27\,000\text{ км}^2$. Выступая в роли трассеров, вовлечённые в вихревые движения светорассеивающие кокколиты выявляют локальную структуру течений в области цветения.

В заключение отметим, что на момент написания статьи цветение продолжалось, но видимая на спутниковых изображениях площадь цветения постоянно сокращается.

Представленные в статье результаты призваны восполнить имеющиеся пробелы в ныне существующих представлениях об общей картине динамики планктонных сообществ Чёрного моря. Выявление факта интенсивного цветения кокколитофорид в холодный период года должно внести свой вклад в уточнение причин этого явления и служит ещё одним свидетельством необходимости проведения непрерывного спутникового мониторинга морских акваторий. Возможности подобного мониторинга на сегодняшний день обеспечены современными системами и технологиями (Лаврова и др., 2016).

Работа выполнена в рамках госзадания по теме «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164). Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015, 2019) с помощью инструментария информационной системы See the Sea, развитие которой осуществляется в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература

1. Геологический словарь. Т. 1. М.: Недра, 1978. 486 с.
2. Карабашев Г. С., Евдошенко М. А. Проявления Основного Черноморского течения, «цветения» кокколитофорид и континентального стока в среднемесячных распределениях коэффициента яркости Черного моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 44–55. DOI: 10.7868/S0030157415010086.
3. Карабашев Г. С., Шеберстов С. В., Якубенко В. Г. Июньский максимум нормализованной яркости и его связь с гидрологическими условиями и цветением кокколитофорид в Черном море // Океанология. 2006. Т. 46. № 3. С. 331–343.
4. Копелевич О. В., Буренков В. И., Вазюля С. В., Шеберстов С. В. Проблемы индикации кокколитофоридных цветений по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 241–250.
5. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
6. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
7. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашицкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
8. Микаэлян А. С., Силкин В. А., Паутова Л. А. Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 45–53.
9. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Аномальное зимнее цветение кокколитофорид в восточной части Черного моря, выявленное по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 248–253. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-248-253.
10. Паутова Л. А., Микаэлян А. С., Силкин В. А. Структура планктонных фитоценов 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.
11. Силкин В. А., Паутова Л. А., Микаэлян А. С. Рост кокколитофориды *Emiliania huxleyi* (Lohm.) Hay et Mohl. в северо-восточной части Черного моря, лимитированный концентрацией фосфора // Альгология. 2009. Т. 19. № 2. С. 135–144.
12. Суханова И. Н. Феномен массового развития кокколитофорид в позднеосенний период в Черном море // Докл. Акад. наук СССР. 1995. Т. 340. С. 256–259.
13. Чурилова Т. Я., Суслин В. В. О причинах доминирования *Emiliania huxleyi* в фитопланктоне глубоководной части Чёрного моря в начале лета // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 26. С. 195–203.
14. Broecker W., Clark E. Ratio of coccolith CaCO_3 to foraminifera CaCO_3 in late Holocene deep sea sediments // Paleoceanography. 2009. V. 24. No. 3. P. PA3205. DOI: 10.1029/2009PA001731.
15. Doney S. C., Fabry V. J., Feely R. A., Kleypas J. Ocean acidification: The other CO_2 problem // Annual Review of Marine Science. 2009. V. 1. P. 169–192. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>.
16. Hopkins J., Henson S. A., Painter S. C., Tyrrell T., Poulton A. J. Phenological characteristics of global coccolithophore blooms // Global Biogeochemical Cycles. 2015. V. 29. P. 239–253. DOI: 10.1002/2014GB004919.
17. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal timescales // Marine Systems. 2006. V. 60. P. 235–254. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.11.011>.
18. Ysakova O. N., Okolodkov Y. B., Chasovnikov V. K., Increasing contribution of coccolithophorids to the phytoplankton in the northeastern Black Sea // Marine Pollution Bull. 2017. V. 124. No. 1. P. 526–534. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.07.037>.

Satellite survey of winter bloom of coccolithophores in the eastern Black Sea in the cold season of 2020/2021

M. I. Mityagina, O. Yu. Lavrova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: mityag@mx.iki.rssi.ru

This paper describes a rare winter bloom of coccolithophores in the eastern Black Sea, identified via satellite data. From the end of November 2020 to February 2021, signatures of coccolithophores bloom have been detected in the optical satellite data taken over the eastern Black Sea. These observations and the abnormal winter bloom of coccolithophores we revealed in 2019 indicate the need to revise the common belief that regular mass coccolithophores bloom in the Black Sea occurs in spring and early summer seasons. The possibility to observe the bloom of coccolithophores using satellite data in the optical range is based on the fact that it is accompanied by an anomalously intensive scattering of light in the near-surface layer. This increase in light scattering is caused by the abundance of calcareous scales, into which the shells of these algae break down. Hence, it is possible to distinguish the bloom zones by the increase of water-leaving radiance. Based on satellite data, the approximate dates of the beginning of the bloom and its peak are determined. The bloom duration and its spatial characteristics are established. Coccolithophores are one of the primary limestone-producing organisms in the World Ocean. They affect the atmosphere's level of carbon dioxide, and hence the temperature regime and climatic conditions. The revealing of an intensive winter bloom of coccolithophores is a step toward establishing the main patterns of coccolithophores life-cycle in its seasonal and climatic aspects.

Keywords: Black Sea, coccolithophores, coccolithophores bloom, vortex structures, satellite monitoring, Terra/Aqua MODIS, Landsat-8 OLI-TIRS, information system See the Sea

Accepted: 10.02.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-255-260

References

1. *Geologicheskii slovar'* (Dictionary of Geology), Vol. 1, Moscow: Nedra, 1978, 486 p.
2. Karabashev G. S., Evdoshenko M. A., Manifestations of the RIM current, coccolithophore blooms, and continental runoff in the long-term monthly mean distributions of satellite reflectance coefficients of the Black Sea, *Oceanology*, 2015, Vol. 55, No. 1, pp. 36–46, DOI: 10.7868/S0030157415010086.
3. Karabashev G. S., Sheberstov S. V., Yakubenko V. G., The June maximum of normalized radiance and its relation to the hydrological conditions and coccolithophorid bloom in the Black Sea, *Oceanology*, 2006, Vol. 46, No. 3, pp. 305–317.
4. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Vazyulya S. V., Sheberstov S. V., Problemy indikatsii kokkolitoforidnykh tsvetenii po sputnikovym dannym (Problems of detection of coccolithophore blooms from satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 241–250.
5. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostyanov A. G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 335 p.
6. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentri kolektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
7. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kolektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TsKP IKI-Monitoring) (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

8. Mikaelyan A. S., Silkin V. A., Pautova L. A., Coccolithophorids in the Black Sea: their interannual and long-term changes, *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 1, pp. 39–48.
9. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Anomal'noe zimnee tsvetenie kokkolitoforid v vostochnoi chasti Chernogo morya, vyavlennoe po sputnikovym dannym (Abnormal winter bloom of coccolithophores in the eastern Black Sea revealed by satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 248–253.
10. Pautova L. A., Mikaelyan A. S., Silkin V. A., Structure of plankton phytocoenoses in the shelf waters of the northeastern Black Sea during the *Emiliana Huxleyi* bloom in 2002–2005, *Oceanology*, 2007, Vol. 47, No. 3, pp. 377–385.
11. Silkin V. A., Pautova L. A., Mikaelyan A. S., Rost kokkolitoforidy *Emiliana huxleyi* (Lohm.) Hay et Mohl. v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya, limitirovannyi kontsentratsiei fosfora (Phosphorus limited bloom of emiliana huxleyi (lohm.) Hay et mohl. in the northeastern Black Sea), *Al'gologiya*, 2009, Vol. 19, No. 2, pp. 135–144.
12. Sukhanova I. N., Fenomen massovogo razvitiya kokkolitoforid v pozdne-osennii period v Chernom more (The phenomenon of mass development of coccolithophores in the late autumn period in the Black Sea), *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1995, Vol. 340, pp. 256–259.
13. Churilova T. Ya., Suslin V. V., O prichinakh dominirovaniya Emiliana huxleyi v fitoplanktone glubokovodnoi chasti Chernogo morya v nachale leta (On the reasons for the dominance of Emiliana huxleyi in the phytoplankton of the deep-water part of the Black Sea in early summer), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2013, Vol. 26, pp. 195–203.
14. Broecker W., Clark E., Ratio of coccolith CaCO_3 to foraminifera CaCO_3 in late Holocene deep sea sediments, *Paleoceanography*, 2009, Vol. 24, No. 3, p. PA3205, DOI: 10.1029/2009PA001731.
15. Doney S. C., Fabry V. J., Feely R. A., Kleypas J., Ocean acidification: The other CO_2 problem, *Annual Review of Marine Science*, 2009, Vol. 1, pp. 169–192, available at: <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>.
16. Hopkins J., Henson S. A., Painter S. C., Tyrrell T., Poulton A. J., Phenological characteristics of global coccolithophore blooms, *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, Vol. 29, pp. 239–253, DOI: 10.1002/2014GB004919.
17. Oguz T., Dippner J. W., Kaymaz Z., Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal timescales, *Marine Systems*, 2006, Vol. 60, pp. 235–254, available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.11.011>.
18. Yasakova O. N., Okolodkov Y. B., Chasovnikov V. K., Increasing contribution of coccolithophorids to the phytoplankton in the northeastern Black Sea, *Marine Pollution Bull.*, 2017, Vol. 124, No. 1, pp. 526–534, available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.07.037>.