Аномальное зимнее цветение кокколитофорид в восточной части Чёрного моря, выявленное по спутниковым данным

М. И. Митягина, О. Ю. Лаврова

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: mityag@iki.rssi.ru

В представленной работе рассматривается ситуация ранее не наблюдавшегося и не описанного в научной литературе зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря, выявленного на основе спутниковых данных. До сих пор в Чёрном море по данным натурных и спутниковых наблюдений отмечалось регулярное цветение кокколитофорид в первой половине лета, которое начинается в мае, достигает пика в июне и завершается в июле. В работе показано, что начиная с 10 января 2019 г. признаки интенсивного цветения кокколитофорид присутствуют на спутниковых снимках, полученных над восточной частью Чёрного моря. Цветение, которое продолжается уже в течение месяца, можно наблюдать на «безоблачных» изображениях сенсоров оптического диапазона, но его площадь постепенно сокращается. Кокколитофориды участвуют в обмене углерода между океаном и атмосферой и являются важным звеном поглощения неорганического углерода из атмосферы. Задача определения основных закономерностей развития кокколитофорид в сезонном и климатическом аспектах не решена до сих пор. Выявление факта интенсивного цветения кокколитофорид в холодный период года должно внести свой вклад в установление причинно-следственных связей и уточнение причин этого явления.

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

Одобрена к печати: 15.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-248-253

Чёрное море является самым изолированным от Мирового океана, при этом отношение площади его водосбора к площади поверхности больше шести, тогда как среднее по всему миру значение равно 0,4. Деграция Чёрного моря в плане загрязнения во многом обусловлена чрезмерным поступлением азота и фосфорных соединений из сельскохозяйственных, бытовых и промышленных источников в семнадцати странах, расположенных в районе его водосбора. Эвтрофикация поверхностных вод, объясняемая главным образом излишком питательных веществ (фосфора и азота), является важной проблемой для многих внутренних морей, которая с каждым годом становится всё острее (Лаврова и др., 2016). Чёрное море имеет огромное значение для стран региона, поэтому прогноз и контроль его биоресурсов, а также постоянное наблюдение за экологическим состоянием вод является актуальной задачей.

Изменение гидрологической и гидрохимической ситуации приводит к структурным изменениям фито- и зоопланктонного сообщества в Чёрном море (Oguz et al., 2006). Фитопланктон участвует в биологической трансформации многих элементов питания (углерода, азота, фосфора, кремния и т.д.) и формирует биогеохимические циклы этих элементов. В последние годы повышенное внимание уделяется изучению кокколитофорид. Кокколитофориды — это микроскопические морские планктонные одноклеточные жгутиковые водоросли, своеобразие которых состоит в том, что на своей оболочке они несут различные по форме и размерам известковые образования, называемые кокколитами (Геологический..., 1978). Эти водоросли участвуют в обмене углерода между океаном и атмосферой и являются важным звеном поглощения неорганического углерода из атмосферы. Они обладают способностью соединять углекислый газ с кальцием и переводить его в нерастворимую форму — карбонат кальция, являясь одними из основных известняк-продуцирующих организмов в Мировом

океане и оказывая влияние на уровень углекислого газа в атмосфере, а тем самым на температурный режим и климатические условия. Исследования динамики развития и всех аспектов жизнедеятельности кокколитофорид приобретают особую значимость в связи с повышением концентрации атмосферного углекислого газа CO_2 (Engel et al., 2005; Riebesell, 2004), а также с изменчивостью концентраций азота и фосфора в морской воде.

Кокколитофориды начали наблюдать в Чёрном море ещё с 40-х гг. XX в., но до середины 1980-х гг. их доля в фитопланктоне моря была мизерной и не превышала 3 % при средней биомассе 8 мкг/л. За следующее десятилетие средняя биомасса кокколитофорид увеличилась до 106 мкг/л, а начиная с середины 1990-х гг. и по настоящее время кокколитофориды в Чёрном море 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.

Эффективным методом контроля морской среды, выявления событий цветения фитопланктона и наблюдения их развития во времени и пространстве является дистанционное зондирование Земли из космоса. Возможности наблюдения цветения кокколитофорид по спутниковым данным оптического диапазона основаны на том, что оно сопровождается аномально интенсивным рассеянием света в приповерхностной толще благодаря обилию кокколитов, на которые распадаются известковые панцири этих водорослей на конечной стадии цветения, что позволяет выделить зоны цветения по яркости восходящего излучения (Карабашев, Евдошенко, 2015; Копелевич и др., 2012).

По результатам анализа данных многочисленных натурных и спутниковых наблюдений (Карабашев и др., 2006; Паутова и др., 2007; Силкин и др., 2009; Чурилова, Суслин, 2013; Ясакова, Станичный, 2012) сформировалось убеждение, что регулярное массовое развитие — цветение — кокколитофорид в Чёрном море происходит в весенний и раннелетний сезоны. Оно начинается в мае, в июне достигает своего пика, а в июле вступает в фазу завершения, однако продолжительность, площадь и интенсивность цветения существенно меняются год от года. В литературе отмечен также единичный случай цветения кокколитофорид в Чёрном море в ноябре 1993 г. (Суханова, 1995).

Оперативный анализ спутниковых данных, полученных с помощью сенсоров MODIS Terra/Aqua, MSI Sentinel-2A/2B и OLI-TIRS Landat-8 в январе – феврале 2019 г., позволил выявить факт аномального зимнего цветения кокколитофорид в восточной части Чёрного моря. Цветение возникло в глубоководной части моря примерно над изобатой 2000 м, его первые признаки были выявлены по данным спектрорадиометра MODIS, полученным 10 января 2019 г. Развитие картины цветения отражено на *рис. 1*, где представлена серия изображений, синтезированных в естественных цветах по данным сенсора MODIS, полученным в январе – феврале 2019 г.

Рис. 1. Спутниковые изображения восточной части Чёрного моря, синтезированные в естественных цветах по данным сенсора MODIS ИСЗ Terra от 21 января 2019 г., 08:55 UTC (*а*); 5 февраля 2019 г., 08:10 UTC (*б*); 11 февраля 2019 г., 09:10 UTC (*в*)

21 января 2019 г. цветение кокколитофорид выявляется в восточной части моря (см. *рис. 1а*), начиная от $41,5^{\circ}$ с. ш. и примерно до $44,5^{\circ}$ с. ш. Область цветения, проявляющаяся как зона существенного повышения восходящей яркости моря, вытянута в направлении юго-восток — северо-запад примерно на 450 км, её ширина местами достигает 100 км, а общая площадь, определённая по спутниковым данным, составляет около $31\,000\text{ км}^2$.

Область цветения, отчётливо выделяющаяся на изображении от 5 февраля 2019 г. (см. *рис. 1б*), выглядит существенно более компактной. Её площадь уменьшилась почти вдвое и составляет примерно $14\,450\text{ км}^2$, при этом протяжённость в направлении юго-восток — северо-запад практически не изменилась. Выступая в роли трассеров, вовлечённые в вихревые движения светорассеивающие кокколиты выявляют локальную структуру течений в области цветения.

Область цветения, наблюдаемая на изображении от 11 февраля 2019 г. (см. *рис. 1в*), расположена в глубоководной части моря между 42° и 44° с. ш. По сравнению с состоянием на 5 февраля 2019 г., её площадь несколько уменьшилась и составляет $12\,700\text{ км}^2$.

Внутренняя структура области цветения детально просматривается на изображении, синтезированном в естественных цветах по данным сенсора OLI-TIRS ИСЗ Landsat-8 от 4 февраля 2019 г. (*рис. 2*). Отчётливо проявляются субмезомасштабные вихревые структуры в виде диполей, вихревых цепочек и плотных вихревых «упаковок» с диаметрами от 2 до 15 км. (Лаврова, Митягина, 2016). Последовательность полученных в январе — феврале 2019 г. изображений, содержащих проявления кокколитофоридного цветения, позволяет проследить формирование и развитие субмезомасштабных вихревых структур, что практически невозможно сделать для глубоководной части моря на основе спутниковых данных из-за отсутствия визуализирующих трассеров в зимний период.

Рис. 2. Цветение кокколитофорид в восточной части Чёрного моря на изображении, синтезированном в естественных цветах по данным сенсора OLI-TIRS ИСЗ Landsat-8 от 4 февраля 2019 г., 08:01 UTC

Интересно сравнить описанное в статье аномально раннее и интенсивное цветение кокколитофорид в восточной части Чёрного моря с тем, что наблюдалось в 2016 г. в Баренцевом море, для которого аномально ранним считается интенсивное цветение в первой декаде июля. В работе (Копелевич и др., 2016) авторы объясняют столь раннее, обширное и интенсивное цветение рекордно высокой температурой поверхности моря (ТПМ) в мае — начале июля 2016 г. Для рассматриваемого нами явления такое объяснение вряд ли подходит, поскольку, как показывает анализ данных о ТПМ в восточной части Чёрного моря за несколько лет, никаких аномальных повышений температуры в январе — феврале 2019 г. не наблюдалось.

Так что вопрос о причинах столь раннего и интенсивного цветения кокколитофорид остаётся открытым.

В заключение отметим, что на момент написания статьи цветение продолжается, остаётся локализованным в том же, что и ранее, районе, но видимая на спутниковых изображениях площадь постоянно сокращается.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164). Для анализа спутниковых данных применялся инструментарий, предоставляемый информационной системой See The Sea (Лупян и др., 2012), входящей в состав центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

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 среднемесечных распределениях коэффициента яркости Черного моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 1. С. 44–55.
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. Копелевич О. В., Салинг И. В., Шеберстов С. В., Каралли П. Г., Григорьев А. В., Храпко А. Н. Кокколитофоридное цветение 2016 г. в Баренцевом море по данным спутниковых сканеров цвета // 14-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. конф. Москва: ИКИ РАН, 2016. С. 252.
6. Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Особенности проявления на спутниковых изображениях гидродинамических процессов в областях интенсивного цветения фитопланктона // *Исследования Земли из космоса*. 2016. № 1–2. С. 145–160.
7. 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.
8. Лупян Е. А., Матвеев А. М., Уваров И. А., Бочарова Т. Ю., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. Спутниковый сервис See the Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–262.
9. 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., Сычуглов 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Суханова И. Н. Феномен массового развития кокколитофорид в позднеосенний период в Черном море // *Доклады АН СССР*. 1995. Т. 340. С. 256–259.
14. Чурилова Т. Я., Суслин В. В. О причинах доминирования *Emiliania huxleyi* в фитопланктоне глубоководной части Черного моря в начале лета // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 26. С. 195–203.

15. Ясакова О. Н., Станичный С. В. Аномальное цветение *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) в 2012 году в Черном море // Морской эколог. журн. 2012. Т. 11. № 4. С. 64.
16. Engel A., Zondervan I., Aerts L., Beaufort L., Benthien A., Chou L., Delille B., Gattuso J.-P., Harlay J., Heemann Ch., Hoffmann L., Jacquet S., Nejstgaard J., Pizay M.-D., Rochelle-Newall E., Schneider U., Terbruggen A., Riebesell U. Testing the direct effect of CO₂ concentration on a bloom of the coccolithophorid *Emiliania huxleyi* in mesocosm experiments // Limnology and Oceanography. 2005. V. 50. P. 493–507.
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.
18. Riebesell U. Effects of CO₂ enrichment on marine phytoplankton // J. Oceanography. 2004. V. 60. P. 719–729.

Abnormal winter bloom of coccolithophores in the eastern Black Sea revealed by satellite data

M. I. Mityagina, O. Yu. Lavrova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

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

The paper considers a previously unobserved and unmentioned in scientific literature winter bloom of coccolithophores in the eastern part of the Black Sea, identified via satellite data. Until now, according to field and satellite observations, the regular bloom of coccolithophores is observed in the Black Sea in early summer. It begins in May, reaches its peak in June and ends in July. We show that the signatures of intensive coccolithophores bloom are present in satellite images obtained over the eastern Black Sea starting from January 10, 2019. The bloom has been going on for a month already; it can be observed in the cloud free images of satellite sensors of optical range, but its area is gradually reducing. Coccolithophores participate in carbon exchange between the ocean and the atmosphere and play an essential role in the process of absorption of inorganic carbon from the atmosphere. The problem of determining the basic patterns of coccolithophores variability in seasonal and climatic aspects has not been resolved so far. Revealing the fact of intensive coccolithophores bloom in the cold period of year should contribute to the understanding of this phenomenon.

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

Accepted: 15.02.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-248-253

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.
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 tsveteni 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. Kopelevich O. V., Saling I. V., Sheberstov S. V., Karalli P. G., Grigoriev A. V., Khrapko A. N., Kokkolitoforidnoe tsvetenie 2016 g. v Barentsevom more po dannym sputnikovykh skanerov tsveta (Coccolithophore bloom in the Barents Sea from satellite ocean color data), *14-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya*

- “*Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*” (14th All-Russia Open Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), Book of Abstracts, Moscow, 2016, p. 252.
6. Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Manifestation specifics of hydrodynamic processes in satellite images of intense phytoplankton bloom areas, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 974–987.
7. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostyanov A. G., *Sputnikovyie 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.
8. Loupian E. A., Matveev A. M., Uvarov I. A., Bocharova T. Yu., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Sputnikovyi servis See the Sea — instrument dlya izucheniya protsessov i yavlenii na poverkhnosti okeana (The Satellite Service See the Sea — a tool for the study of oceanic phenomena and processes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–262.
9. 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., Tsentralizirovannogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh 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.
10. 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.
11. Pautova L. A., Mikaelyan A. S., Silkin V. A., Structure of plankton phytocoenoses in the shelf waters of the northeastern Black Sea during the *Emiliania Huxleyi* bloom in 2002–2005, *Oceanology*, 2007, Vol. 47, No. 3, pp. 377–385.
12. Silkin V. A., Pautova L. A., Mikaelyan A. S., Rost kokkolitoforidy *Emiliania huxleyi* (Lohm.) Hay et Mohl. v severo-vostochnoi chasti Chernogo morya, limitirovannyi kontsentratsiei fosfora (Phosphorus limited bloom of *emiliania huxleyi* (lohm.) Hay et mohl. in the northeastern Black Sea), *Al'gologiya*, 2009, Vol. 19, No. 2, pp. 135–144.
13. 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 AN SSSR*, 1995, Vol. 340, pp. 256–259.
14. Churilova T. Ya., Suslin V. V., O prichinakh dominirovaniya *Emiliania huxleyi* v fitoplanktone glubokovodnoi chasti Chernogo morya v nachale leta (On the reasons for the dominance of *Emiliania huxleyi* in the phytoplankton of the deep-water part of the Black Sea in early summer), In: *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2013, Vol. 26, pp. 195–203.
15. Yasakova O. N., Stanichnyi S. V., Anomal'noe tsvetenie *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) v 2012 godu v Chernom more (Abnormal blooming by *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) in the Black Sea in 2012), *Morskoi ekologicheskii zhurnal*, 2012, Vol. 11, No. 4, p. 64.
16. Engel A., Zondervan K., Aerts L., Beaufort L., Benthien A., Chou L., Delille B., Gattuso J.-P., Harlay J., Heemann Ch., Hoffmann L., Jacquet S., Nejstgaard J., Pizay M.-D., Rochelle-Newall E., Schneider U., Terbruggen A., Riebesel U., Testing the direct effect of CO₂ concentration on a bloom of the coccolithophorid *Emiliania huxleyi* in mesocosm experiments, *Limnology and Oceanography*, 2005, Vol. 50, pp. 493–507.
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.
18. Riebesell U., Effects of CO₂ enrichment on marine phytoplankton, *J. Oceanography*, 2004, Vol. 60, pp. 719–729.