



Изучение влияния температурных условий на развитие летних цветений кокколитофорид в Черном море по данным дистанционного зондирования.

Востоков С.В., Салинг И.В., Востокова А.С

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: Черное море, цветение фитопланктона, кокколитофориды, дистанционное зондирование.

Введение

Кокколитофориды имеют большое значение для формирования потоков углерода в морских экосистемах, играют ведущую роль в седиментации карбонатов и органического вещества, а также в процессах обмена углекислого газа между океаном и атмосферой. Температура поверхности моря - один из немногих показателей морской среды, достаточно надежно измеряемый сканерами с разных космических носителей. Поле температуры формируется под действием большого числа гидрометеорологических факторов, подверженных значительным сезонным изменениям. Изучение роли температурного фактора в сезонной динамике фитопланктона в условиях глобального потепления – одна из актуальных задач современной океанологии.

Предшествующие исследования сезонной динамики кокколитофорид по материалам сканера MODIS-Aqua в период 2002 -2015 гг. выявили положительную корреляцию минимальных зимних температур и амплитуды летних цветений (Буренков и др. 2011, Микаэлян и др. 2018).

Цель настоящего исследования – изучение роли температурного фактора в сезонной и многолетней изменчивости кокколитофорид по данным дистанционного зондирования за двадцатипятилетний период спутниковых наблюдений сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua.

Материал и методы

Для анализа использованы данные сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua (level 3) за период наблюдений с 1998 по 2023 гг. Динамика кокколитофорид оценивалась по содержанию взвешенного неорганического углерода (PIC).

Результаты

Анализ многолетних спутниковых данных по динамике кокколитофорид и температуры поверхностного слоя показал, что аномальные по уровню летние цветения водорослей наблюдались после наиболее холодных зим. Причем данная закономерность устойчиво воспроизводится на протяжении всего двадцатипятилетнего периода по настоящее время (Рис. 1)

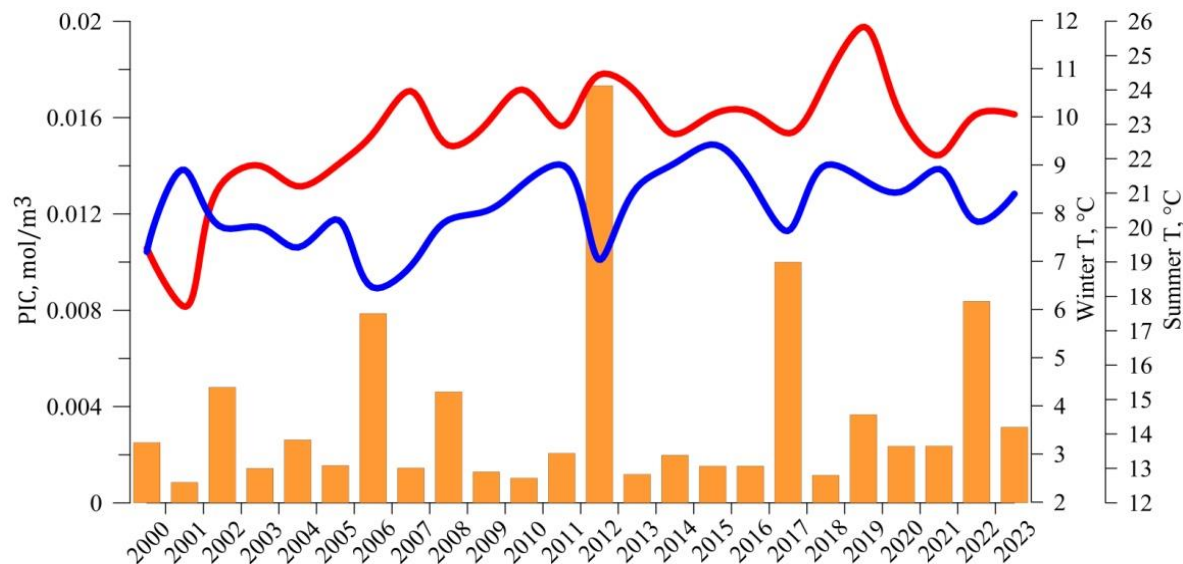


Рисунок 1. Динамика летних цветений кокколитофорид в единицах взвешенного неорганического углерода (средние значения PIC за июнь), минимальных зимних температур (синяя линия, февраль) и летних температур (красная линия, июнь) в восточной части Черного моря по данным SeaWiFS и MODIS-Aqua.

Температура поверхностного слоя в зимний период в данном случае не является фактором прямого воздействия, а показателем интенсивности зимней конвекции, которая определяет обогащение слоя фотосинтеза биогенными элементами и создание запаса питательных веществ, определяющего развитие фитопланктона в течение последующего весеннего и летнего периодов.

Отмечается, что температура аномально холодных зим, после которых наблюдаются интенсивные цветения кокколитофорид, повышается в соответствии с общим потеплением поверхностного слоя моря. Глубина зимней конвекции, от которой зависит обогащение слоя фотосинтеза, в условиях роста зимних температур может поддерживаться за счет осолонения поверхностного слоя моря, которое наблюдается в Черном море в последнее десятилетие (Гинзбург и др. 2021).

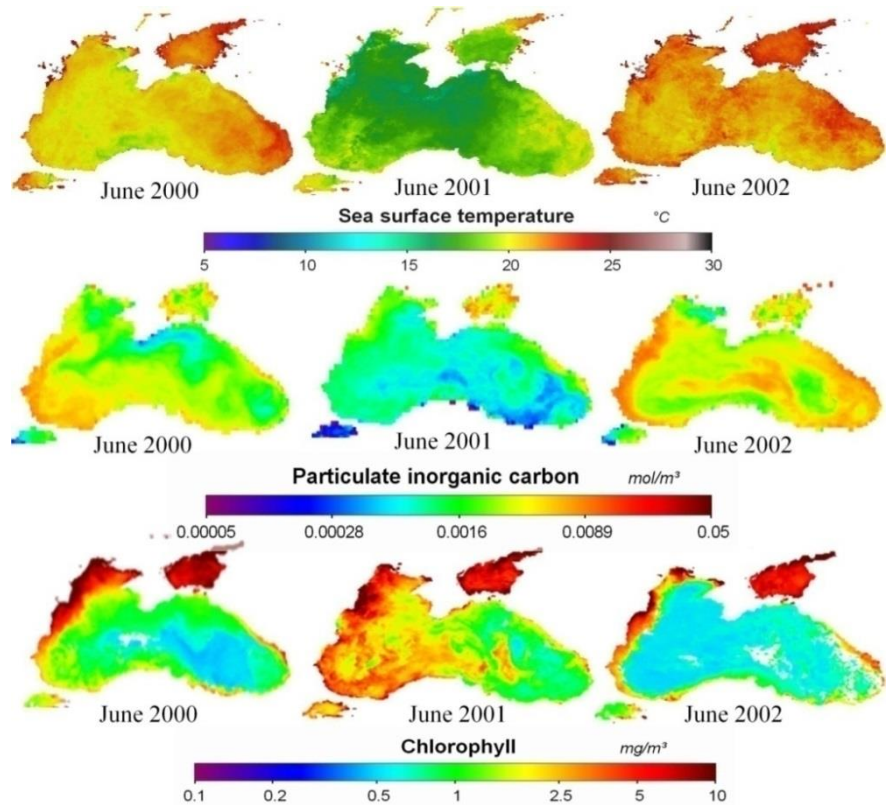


Рисунок 2. Изменение температуры поверхности моря, PIC и хлорофилла «а» в июне 2000-2002 гг.

Многолетние исследования показали, что на уровень летней вегетации кокколитофорид также влияет и фактическая температура в теплый период. Так гидрологические условия anomalно холодного лета 2001 года привели к замещению летнего цветения кокколитофорид массовым развитием других видов водорослей, преимущественно диатомовых, что ярко отразилось в поле хлорофилла «а» (Рис. 2). Неблагоприятные температурные условия могут в том числе приводить к существенного сдвигу сроков цветения, как это произошло летом 2022 г. (Рис. 3).

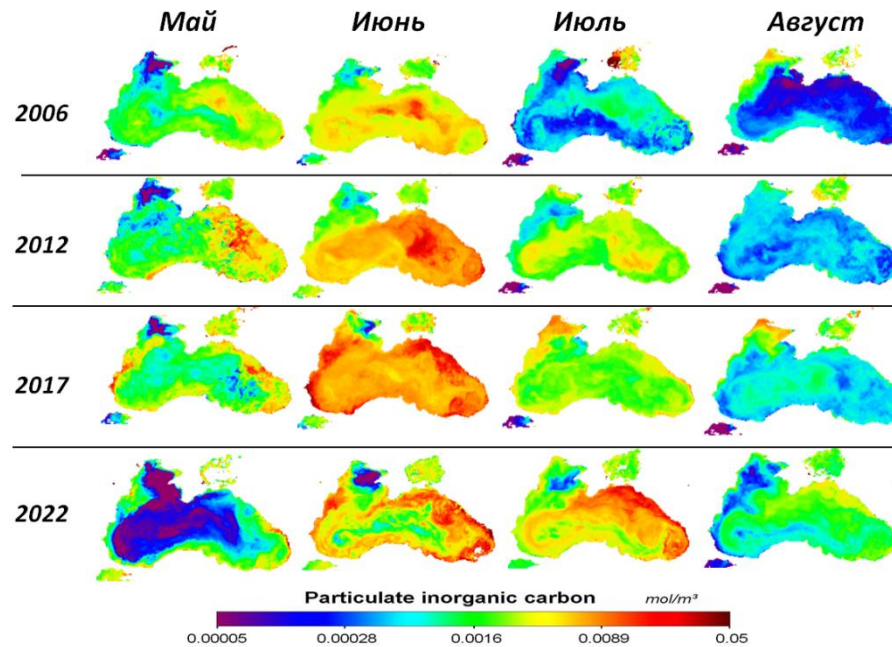


Рисунок 3. Летние цветения кокколитофорид в единицах взвешенного органического углерода (PIC) в 2006, 2012, 2017, 2022 гг. по данным сканера MODIS-Aqua

Температура поверхностного слоя определяется как гидрологическими, так и метеорологическими процессами. Так плотная облачность, помимо влияния на прогрев поверхностного слоя может создавать неблагоприятные световые условия для развития кокколитофорид. Анализ динамики развития кокколитофорид за двадцатипятилетний период дистанционных наблюдений показывает, что водоросли данного вида развиваются до уровня цветения при температурах предшествующей зимы в диапазоне 6.5-9.0 °С. Температурный фон летних цветений определяется диапазоном 19.5-26 °С. При этом аномальные по уровню цветения (2006, 2012, 2017 и 2022 гг.) наблюдались при зимних температурах предшествующей зимы ниже 8 °С и летних выше 22 °С. (Рис. 4).

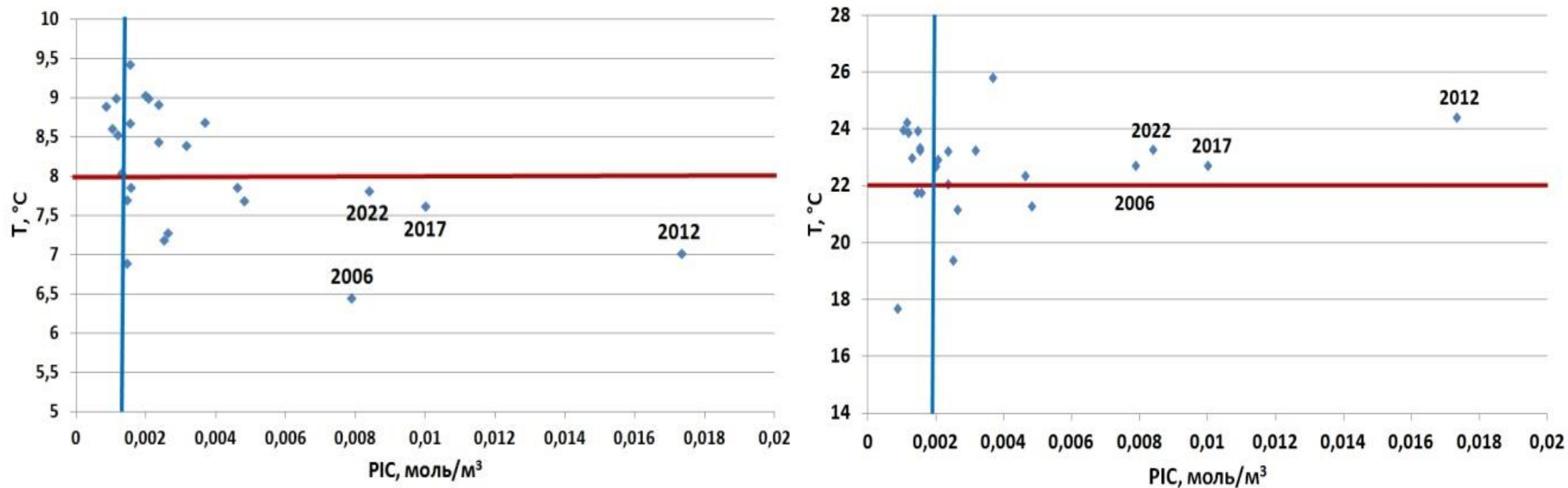


Рисунок 4. Летние цветения кокколитофорид и температура поверхности моря (Слева - минимальная температура предшествующей зимы, Справа - температура в период летнего цветения)

Выводы

- Зависимость интенсивности летних цветений кокколитофорид от температурных условий предшествующей зимы устойчиво воспроизводится на протяжении всего двадцатипятилетнего периода спутниковых наблюдений по настоящее время.
- Глобальное потепление, отражающееся на температуре поверхностного слоя в холодный период года, может снижать глубину зимней конвекции, что компенсируется осолонением, которое наблюдается в последнее десятилетие.
- Сочетание температурных диапазонов - минимальной зимней ($T < 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и фактической летней ($T > 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$), обеспечивают высокую вероятность возникновения аномальных цветений кокколитофорид в теплый период года. Проведенные исследования показывают, что зависимость интенсивности летней вегетации кокколитофорид от температуры имеет, в большей степени, пороговый характер, что может быть использовано для прогноза развития аномальных цветений в Черном море.

Литература

1. Востоков С.В., Лобковский Л.И., Востокова А.С., Соловьев Д.М. Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Чёрном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла а // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 485. - №1. - С. 99-103. doi: 10.31857/S0869-5652485199-103
2. Буренков, В.И. Сезонные и межгодовые изменения биооптических характеристик Черного моря по спутниковым данным / В.И. Буренков, О.В. Копелевич, С.В. Шеберстов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – №. 4. – С. 190–199.
3. Гинзбург, А.И. Костяной А.Г., Серых И.В. и др. Изменение климата гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей (1980–2020 гг.)// Океанология. – 2021. – Т. 61. – №. 6. – С. 745–756
4. 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 // Mar. Pollut. Bull. 2019. 138. P. 274–284. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.042>
5. Востокова А.С., Лобковский Л.И., Востоков С.В. Аномальные явления в развитии фитопланктона Черного моря, зафиксированные методами дистанционного зондирования // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 497. № 1. С. 69–73.
6. Vostokov, S.V.; Vostokova, A.S.; Vazyulya, S.V. Seasonal and Long-Term Variability of Coccolithophores in the Black Sea According to Remote Sensing Data and the Results of Field Investigations. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 97. <https://doi.org/10.3390/jmse10010097>
7. Anastasia S. Vostokova, Sergey V. Vostokov, and Inna V. Saling "Regional features of seasonal variability of phytoplankton in the Black Sea studied by remote sensing data.", Proc. SPIE 12341, 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1234150 (7 December 2022); <https://doi.org/10.1117/12.2645216>
8. Kubryakov A.A., Mikaelyan A.S., Stanichny S. V. Summer and winter coccolithophore blooms in the Black Sea and their impact on production of dissolved organic matter from Bio-Argo data // Journal of Marine Systems. 2019. Vol. 199. 103220.
9. Mikaelyan, A.S. Alternation of diatoms and coccolithophores in the north–eastern Black Sea: a response to nutrient changes / A.S. Mikaelyan [et al.] // Hydrobiologia. – 2015. – Vol. 755. – P. 89–105.
10. Mikaelyan A.S., Silkin V.A., Pautova L.A. Coccolithophorids in the Black Sea: their interannual and long-term changes // Oceanology. 2011. Т. 51. №. 1. С. 39–48.
11. Riebesell U. Effects of CO2 enrichment on marine phytoplankton // J. of Oceanography. 2004. V. 60. P. 719–729.
12. Yasakova O.N., Okolodkov Y.B., Chasovnikov V.K. Increasing contribution of coccolithophorids to the phytoplankton in the northeastern Black Sea // Marine pollution bulletin. – 2017. Vol. 124. No. 1. P. 526–534.
13. Якубенко В.Г., Востоков С.В., Силкин В.А., Паутова Л.А., Востокова А.С. Гидрофизические факторы формирования интенсивного «цветения» кокколитофориды *Emiliania huxleyi* в Абхазском секторе Черного моря в конце мая 2013 г. // Экология гидросферы. 2019. № 1 (3). С. 52–67. URL: <http://hydrosphere-ecology.ru/141> DOI – [https://doi.org/10.33624/2587-9367-2019-1\(3\)-52-67](https://doi.org/10.33624/2587-9367-2019-1(3)-52-67)