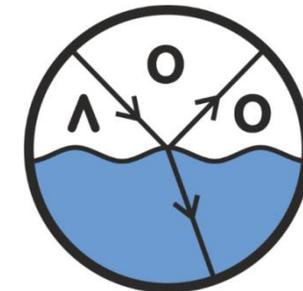




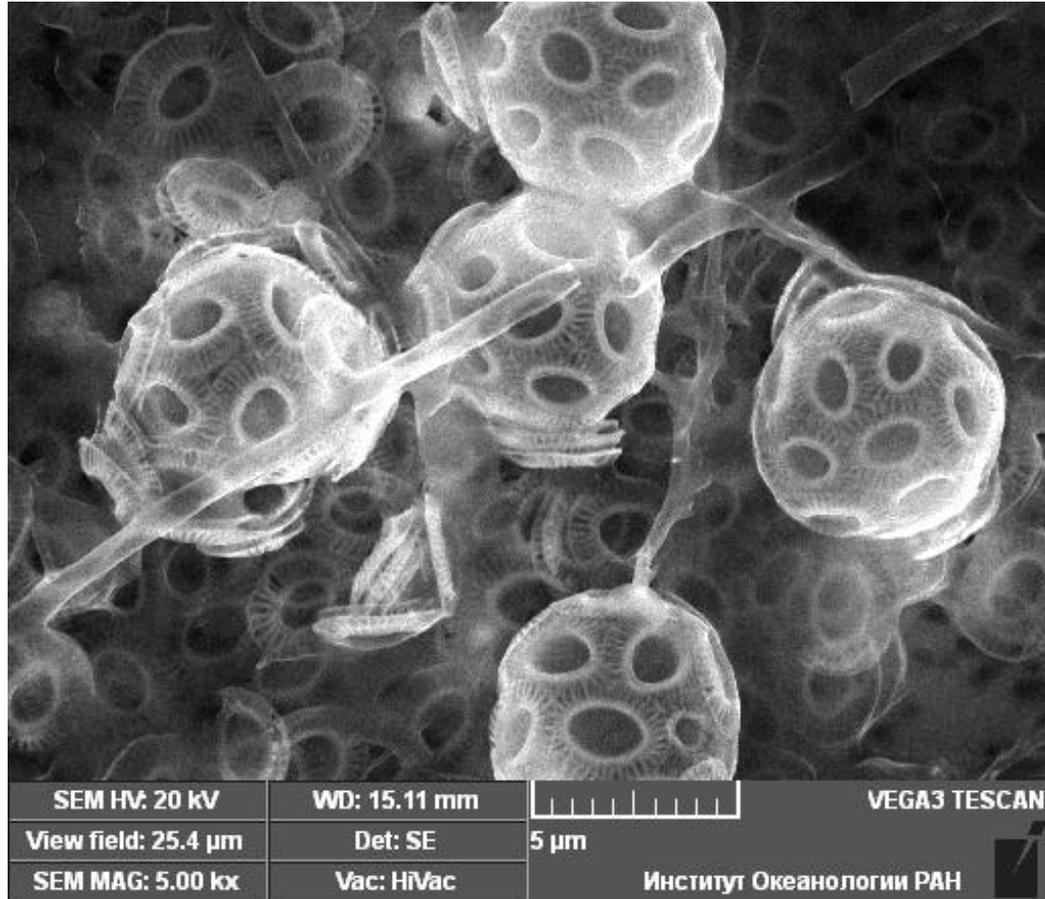
Двадцать третья международная конференция
"Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"
ИКИ РАН, 10-14 ноября 2025 г.



Прогноз цветения кокколитофорид в глубоководной восточной части Черного моря

С. В. Вазюля, Д. И. Глуховец, Д. Н. Дерягин, С. В. Шеберстов
vasyulya.sv@ocean.ru

Кокколитофориды



Emiliana huxleyi под электронным микроскопом

Кокколитофориды (Coccolithophore) -

одноклеточные водоросли, чьи клетки покрыты дискообразными частицами (**coccoliths**), состоящими из карбоната кальция CaCO_3 .

Кокколитофоридные цветения регулярно происходят в различных районах Мирового океана и оказывают заметное влияние на осадкообразование, процессы преобразования и накопления углерода в водной толще (Balch, Mitchell, 2023), а также альбедо океана (Глуховец, Шеберстов, 2024).

Balch W.M., Mitchell C. Remote sensing algorithms for particulate inorganic carbon (PIC) and the global cycle of PIC // Earth-Science Reviews. 2023. V. 239. 104363.

Глуховец Д.И., Шеберстов С.В. Влияние фитопланктона на альбедо океана // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 3. С. 73–83.

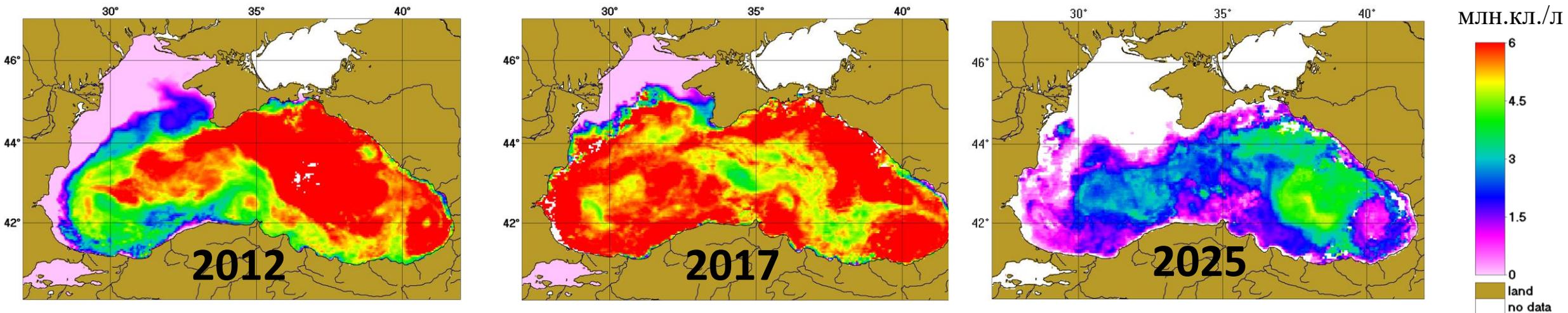
Кокколитофориды в Черном море

В Черном море ежегодно в мае-июне происходят цветения кокколитофорид. При этом пространственное распределение и интенсивность этих цветений демонстрируют значительную межгодовую изменчивость.

Для оценки интенсивности кокколитофоридных цветений (КЦ) определялись среднемесячные июньские концентрации кокколитофорид N_{coc} с помощью регионального алгоритма (Kopelevich et al. 2014). Этот алгоритм, разработан по данным прямых определений концентрации кокколитофорид в исследуемом регионе Черного моря.

Kopelevich O., Burenkov V., Sheberstov S. et al. Satellite monitoring of coccolithophore blooms in the Black Sea from ocean color data // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 146. P. 113–123.

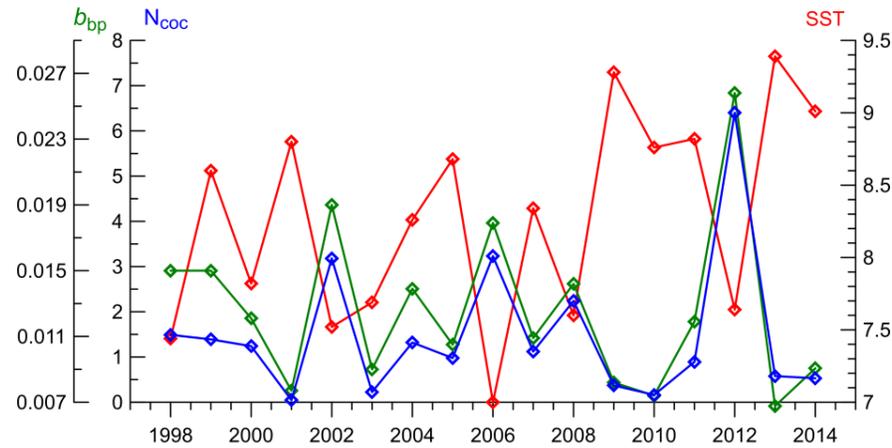
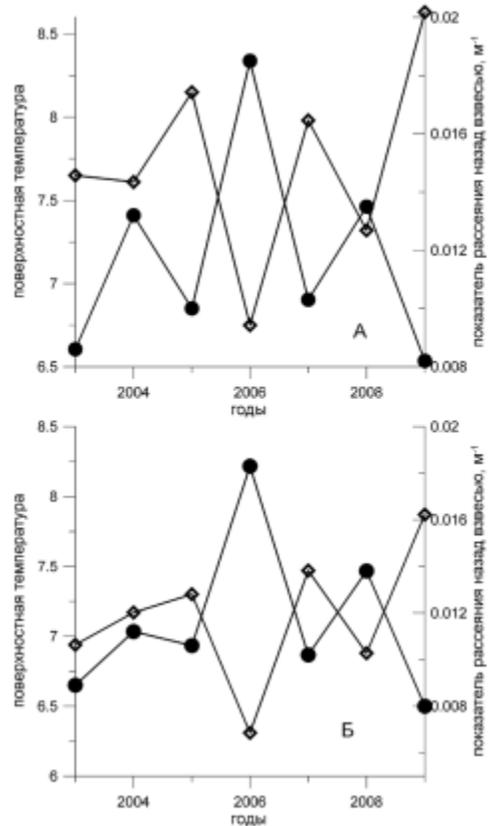
Примеры распределений N_{coc} в июне по данным MODIS-Aqua



Связь с величиной температуры поверхности моря

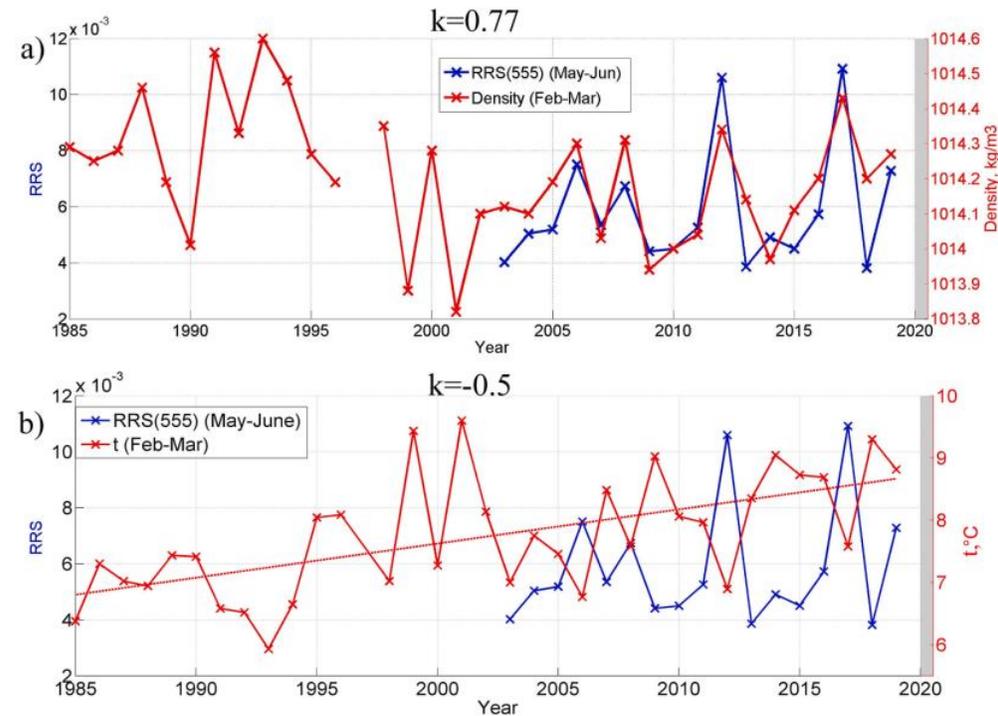
Для глубоководных районов Черного моря отрицательная корреляция между интенсивностью КЦ и величиной температуры поверхности моря (ТПМ) в зимний период впервые была отмечена в работе (Буренков и др., 2011), что в дальнейшем было подтверждено другими исследованиями.

Буренков и др., 2011



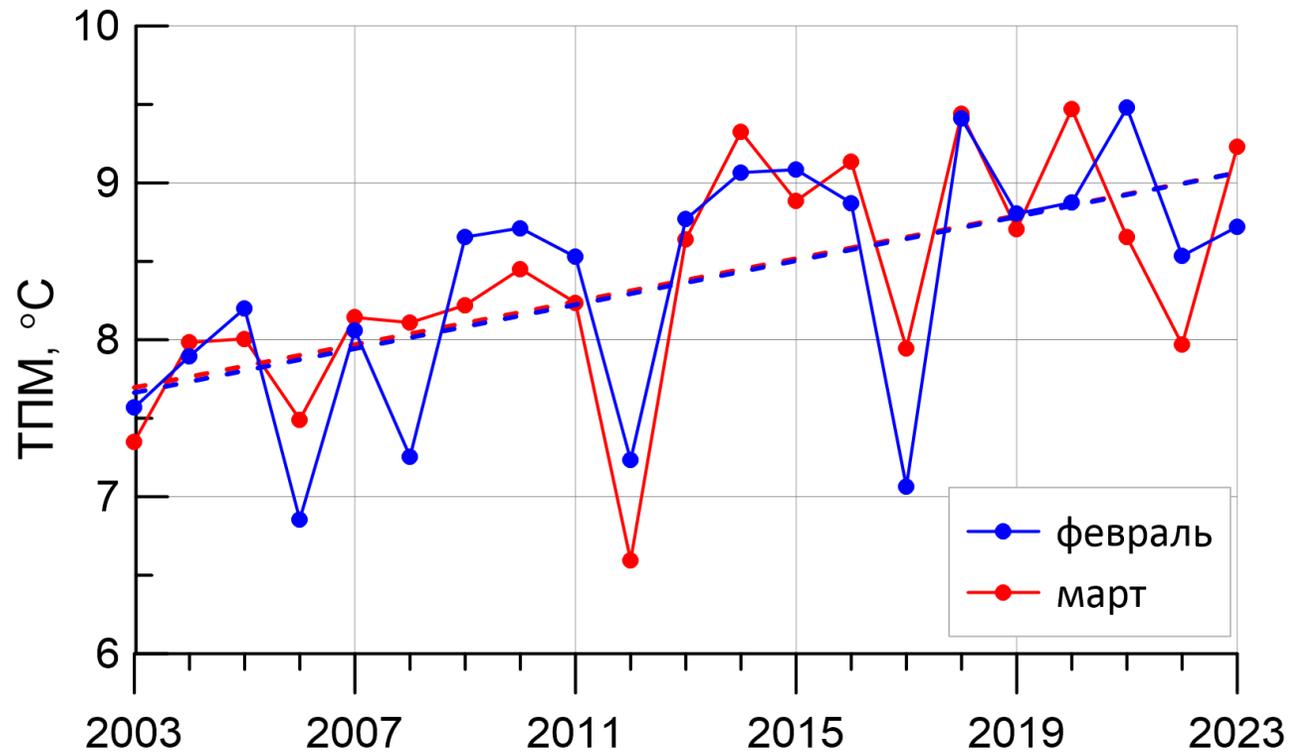
Kopelevich et al., 2015

Kubryakov et al., 2021



Данные о температуре поверхности моря

Для оценки ТПМ в холодный сезон использованы среднемесячные данные уровня L3 по измерениям ИК сканера MODIS и ежедневные данные ТПМ MUR (Multi-scale Ultra-high Resolution) уровня L4 (Chin et al., 2017).



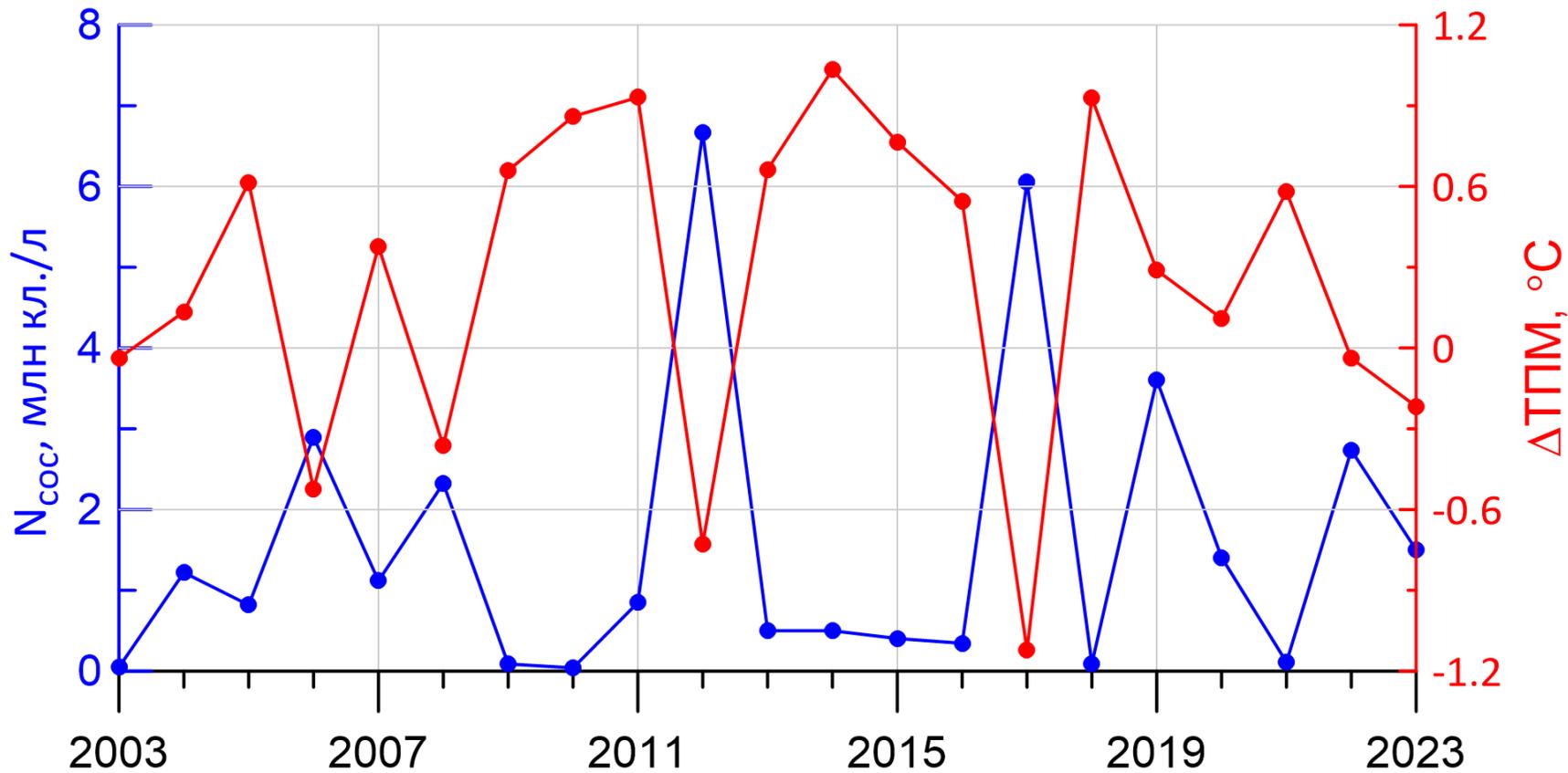
Межгодовые вариации величины ТПМ в феврале и в марте по данным MUR в поверхностном слое исследуемого региона. Пунктиром показаны тренды.

Результаты

В Лаборатории оптики океана ИО РАН созданы два алгоритмы для прогноза интенсивности кокколитофоридных цветений в восточной глубоководной части Чёрного моря по данным о распределении температуры поверхности моря в холодный сезон (Вазюля и др., 2025).

Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Дерягин Д.Н., Шеберстов С.В. Прогноз кокколитофоридного цветения в Черном море // *Океанология*. 2026. (в печати).

Первый алгоритм - по среднемесячному значению ТПМ в феврале (MODIS)



$$\Delta\text{ТПМ} = \text{ТПМ} - \text{ТПМ}_{\text{тр}},$$

где $\text{ТПМ}_{\text{тр}}$ – линейный тренд температуры поверхности моря за период 2003-2023 гг.

Межгодовые вариации концентрации кокколитофорид N_{coc} в июне и величины $\Delta\text{ТПМ}$ MODIS в феврале в поверхностном слое глубоководной восточной части Черного моря.

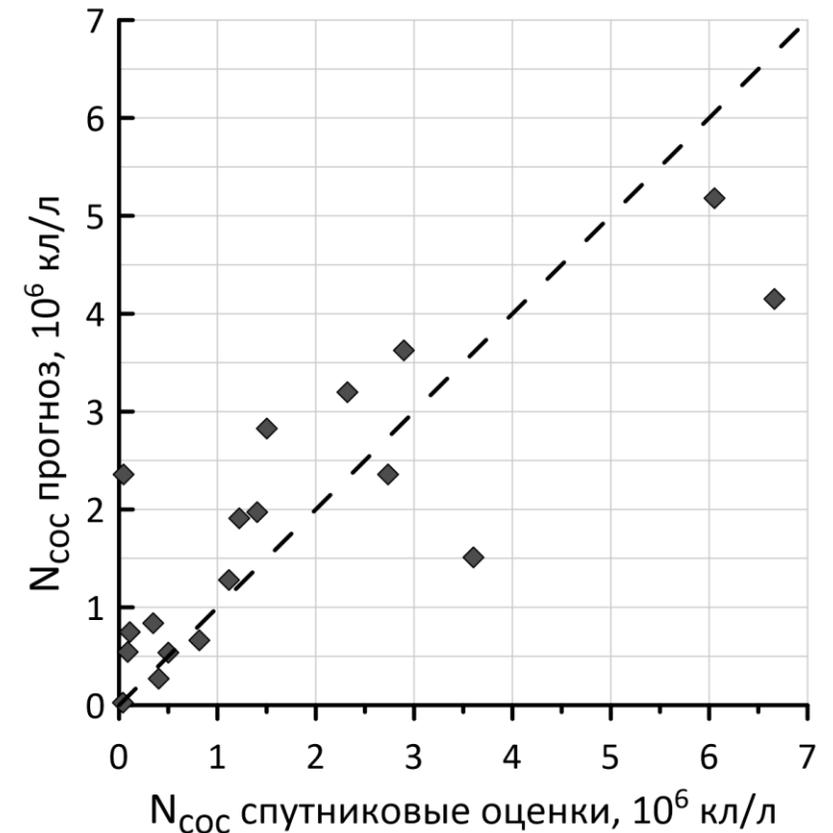
Первый алгоритм - по среднемесячному значению ТПМ в феврале (MODIS)

В первом алгоритме для прогноза КЦ необходимо использовать единственный файл с распределением ТПМ в феврале, рассчитать среднюю величину ТПМ в заданном регионе и получить оценку $N_{\text{сос}}$ в млн кл./л по формуле:

$$N_{\text{сос}} = 2.26 - 2.6 \cdot (\text{ТПМ} - 0.069 Y + 130.4)$$

где Y – год, для которого делается прогноз.

Средне-квадратичное отклонение для прогноза $N_{\text{сос}}$ в этом случае составило 1.1 млн кл./л.



Сопоставление оценок $N_{\text{сос}}$ по спутниковым данным и прогнозных значений $N_{\text{сос}}$, рассчитанных через распределения ТПМ в холодный период года с использованием первого алгоритма

Второй алгоритм - по ежедневным данным ТПМ MUR в феврале-марте

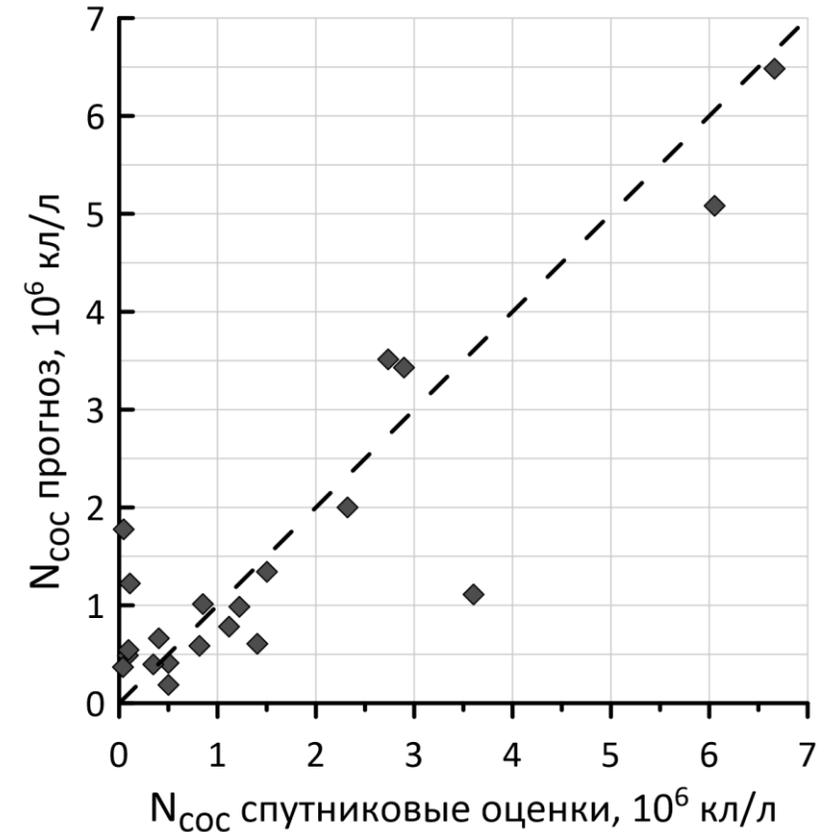
Во втором случае для прогноза используется параметр $\Sigma\text{ТПМ}$, который вычисляется по ежедневным распределениям ТПМ MUR следующим образом:

$$\Sigma\text{ТПМ} = \int (\text{ТПМ}_{\text{пор}} - \text{ТПМ}) dS,$$

где $\text{ТПМ}_{\text{пор}} = \text{ТПМ}_{\text{тр}}$. Интегрирование проводится только по тем участкам рассматриваемого региона, где ТПМ меньше, чем пороговая величина $\text{ТПМ}_{\text{пор}}$, то есть подынтегральное выражение всегда положительно. После этого используется формула:

$$N_{\text{сос}} = 28 \cdot 10^{-6} \cdot \Sigma\text{ТПМ}.$$

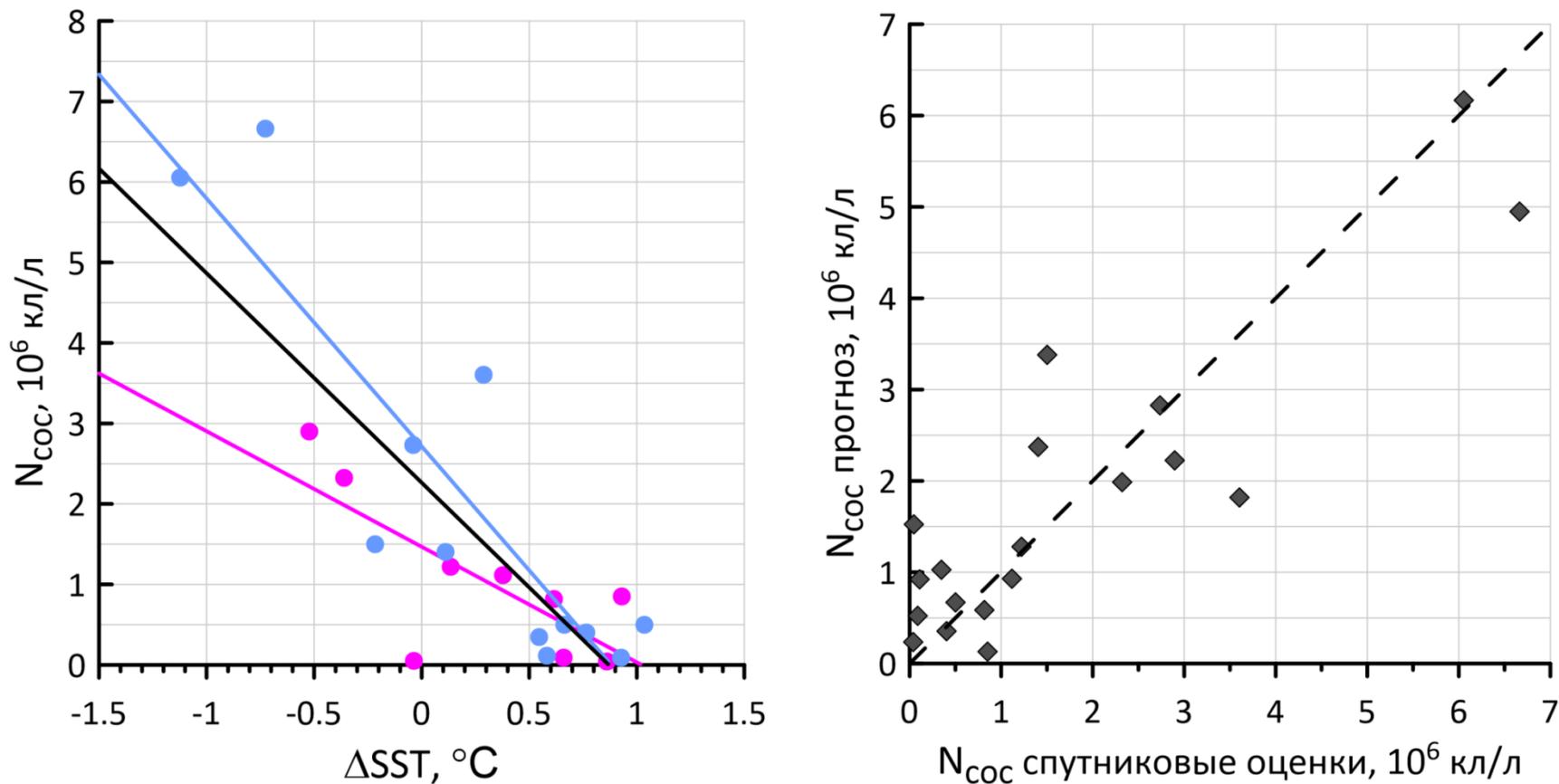
Средне-квадратичное отклонение для прогноза $N_{\text{сос}}$ при этом составило 0.8 млн кл./л.



Сопоставление оценок $N_{\text{сос}}$ по спутниковым данным и прогнозных значений $N_{\text{сос}}$, рассчитанных через распределения ТПМ в холодный период года с использованием второго алгоритма

Обсуждение

В случае использования формулы, полученной для периода 2012–2023 гг. можно повысить точность прогноза концентрации кокколитофорид по данным ТПМ MODIS за февраль.



Слева: связь величин N_{coc} в июне с $\Delta\text{ТПМ MODIS}$ в феврале. Сплошными линиями показаны линейные регрессии: черным цветом для периода 2003-2023 гг., розовым – 2003-2011 гг., голубым – 2012-2023 гг. Справа: Сопоставление оценок N_{coc} по спутниковым данным и прогнозных значений N_{coc} , рассчитанных через величины $\Delta\text{ТПМ}$ в феврале с использованием разных уравнений для периодов 2003-2011 и 2012-2023 гг. Пунктиром показана линия идеального соответствия 1:1.

Выводы

- Представлены два алгоритма для прогноза интенсивности кокколитофоридных цветений в восточной глубоководной части Черного моря по данным о распределениях температуры поверхности моря в холодный период года.
- Первый алгоритм позволяет рассчитать величину концентрации кокколитофорид исходя из средней величины ТПМ в феврале по данным MODIS с точностью 1.1 млн кл./л.
- Алгоритм прогноза, использующий непрерывные ежедневные данные ТПМ MUR за период февраль-март, будет более точным (0.8 млн кл./л).
- Установлено, что учет долговременного температурного тренда приводит к увеличению коэффициента детерминации между прогнозируемыми и наблюдаемыми величинами почти вдвое. Так, для данных MODIS его значение возрастает с 0.39 до 0.62.
- Показана возможность прогнозирования концентрации кокколитофорид по спутниковым данным о температуре поверхности моря в феврале с точностью 0.9 млн кл./л с использованием регрессионной формулы, полученной для периода 2012-2023 гг.

Подробнее ознакомиться с предложенными алгоритмами можно в статье:

Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Дерягин Д.Н., Шеберстов С.В. Прогноз кокколитофоридного цветения в Черном море // Океанология. 2026. (в печати).

Финансирование

Прогноз кокколитофоридного цветения разработан в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0015), обработка спутниковых данных выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-10065, <https://rscf.ru/project/25-77-10065>. Грант предоставлен через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Спасибо за внимание!

vasyulya.sv@ocean.ru