

# Аномальные явления в развитии фитопланктона в

## Черном море, зафиксированные методами дистанционного зондирования и контактными измерениями.



Востокова А.С.(1), Востоков С.В.(2), Соловьев Д.М.(3)

(1) МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия; (2) Институт океанологии РАН, Москва, Россия; (3) Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия)

### Введение

Фитопланктон – основное продукционное звено морской экосистемы.

Концентрация хлорофилла «а» и содержание взвешенного вещества характеризуют количественное развитие фитопланктона и накопление вещества в морской среде за счет биосинтеза. Несмотря на длительный период исследований, изменчивость фитопланктона в Черном море изучена недостаточно. Причиной является отсутствие регулярных наблюдений и дискретный характер имеющихся данных о сезонной и многолетней динамике фитопланктона, особенно в открытых водах моря. Развитие технологий дистанционного зондирования и методов обработки спутниковых данных позволило изучить основные закономерности сезонной и многолетней изменчивости фитопланктона в Черном море. По спутниковым данным была выявлена цикличность развития фитопланктона и периоды формирования цветений, которые проявляются в поле различных биооптических характеристик измеряемых из космоса. Показано, что для Черного моря основными продукционными периодами являются осенне-зимние и зимне-весенние сезоны, причем по продолжительности и выраженности большее значение имеет осенне-зимний сезон.

### Цель и задачи

Целью работы является изучение аномальных явлений в развитии фитопланктона в Черном море. Были поставлены следующие задачи:

- Провести отбор источников спутниковой информации и параметров дистанционного зондирования необходимых для оценки изменчивости фитопланктона и условий морской среды, определяющих его пространственную и временную динамику.
- Сформировать массив данных для оценки пространственной и временной изменчивости хлорофилла «а» и других биооптических показателей характеризующих фитопланктон, в виде снимков, карт, графиков и цифровых массивов;
- Провести анализ данных для выявления аномальных процессов развития фитопланктона в Черном море в сезонном и пространственном аспектах.
- Изучить основные закономерности изменения количественных и структурных характеристик фитопланктона Черного моря за последние десятилетия по результатам экспедиционных исследований и литературным данным.
- Провести поиски анализ свидетельств и подтверждений аномального развития фитопланктона по данным натурных наблюдений.

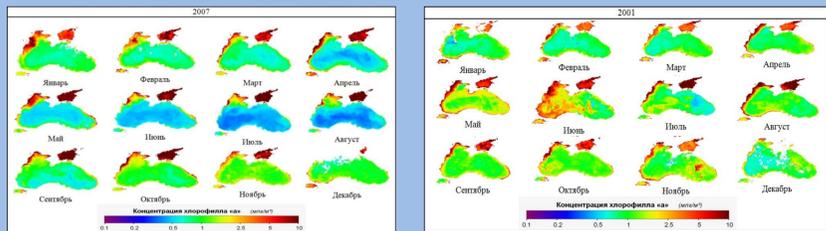
### Материалы и методы



Сканеры SeaWiFS, MERIS, Modis-Aqua, Modis-Terra

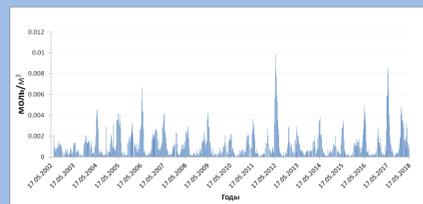
Источниками спутниковых данных для исследования послужили измерения биооптических характеристик поверхности моря сканерами цвета (сенсорами) SeaWiFS, MODIS, MERIS в период с 1997 по 2018, а также методики и алгоритмы, позволяющие рассчитывать характеристики фитопланктона. Среди них основную игранот концентрация хлорофилла «а», показатель отражения на длине волны 551 и 555 нм и концентрация взвешенного неорганического углерода (PIC).

### Результаты исследований

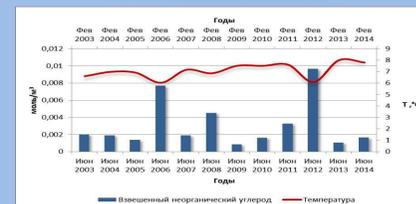


Концентрация хлорофилла в Черном море, 2007, 2011гг. (мг/м<sup>3</sup>)

Для анализа динамики фитопланктона были привлечены более чем 300 спутниковых карт хлорофилла «а» и других биооптических параметров. Показано, что наиболее продуктивными сезонами в Черном море являются зимне-весенний и осенне-зимний периоды. Причем по продолжительности и степени развития большее значение для Черного моря имеет осенне-зимний сезон.

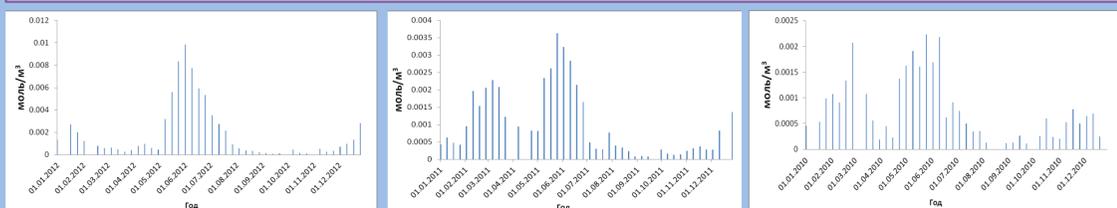


Сезонная и многолетняя изменчивость содержания концентраций взвешенного неорганического углерода (PIC), характеризующее развитие кокколитофорид в центре восточного круговорота



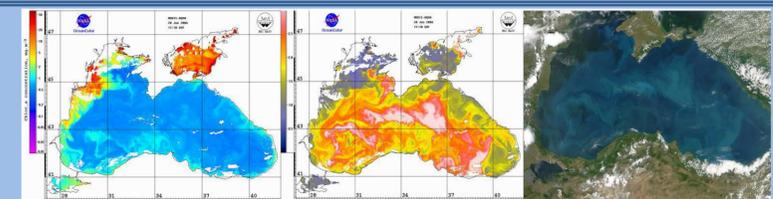
Концентрации взвешенного неорганического углерода PIC по спутниковым данным в период максимального развития кокколитофорид и динамика минимальных зимних температур (Т) в феврале по данным дистанционного зондирования MODIS в северо-восточной части Черного моря.

Массовое развитие кокколитофорид наблюдается ежегодно с мая по июль с определенной цикличностью. В 20-тилетнем ряду спутниковых наблюдений выделяются аномально мощные цветения вод кокколитофоридами в 2006 и 2012 году, которые наблюдались после самых суровых зим.



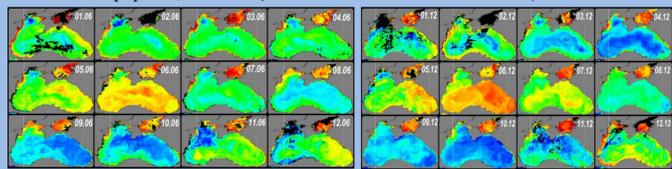
Сезонная изменчивость содержания концентраций взвешенного неорганического углерода (PIC) в центре восточного круговорота, 2010, 2011, 2012 гг.

К аномальным явлениям в развитии фитопланктона Черного моря могут быть также отнесены зимние цветения кокколитофорид, неоднократно зафиксированные по спутниковым данным и подтвержденные результатами экспедиционных исследований зимой 2010-2011 и 2012-2013 годов. Отмечено, что зимние цветения вод кокколитофоридами формировались в специфических гидрологических условиях теплой зимы с незначительной ветровой (штормовой) активностью, которая не препятствовала возникновению плотностной стратификации. Причем, принципиальным фактором в инициации зимнего цветения кокколитофорид была устойчивая стратификация, сохранявшаяся в начальный период формирования сезонного термоклина. Отмечено, что в годы зимнего цветения кокколитофорид летний пик развития водорослей был, как правило, сглажен и не достигал пиковых значений.



Распределение параметров характеризующих развитие фитопланктона в период массового развития кокколитофорид в Черном море по данным Modis\_Aqua. 20.06.2006 (слева направо)

- 1) Распределение хлорофилла «а»;
- 2) Величина исходящей радиации на длине волны 551 нм.;
- 3) Цветение кокколитофорид (Комбинация каналов видимого диапазона). 17.06.2006. Modis\_Aqua.

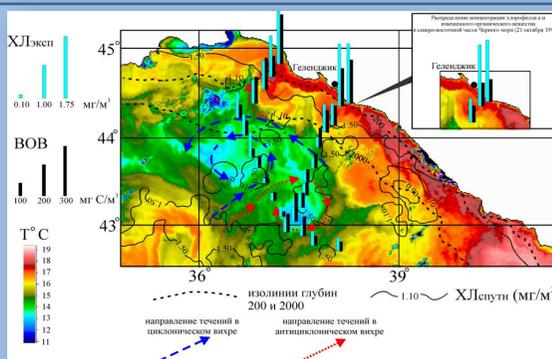


Концентрация взвешенного неорганического углерода в Черном море, 2006, 2012 гг. (моль/м<sup>3</sup>). Modis\_Terra

Отмечено, что массовое развитие кокколитофорид и его пространственная неоднородность в Черном море слабо выражены в поле хлорофилла «а» и напротив четко прослеживается в поле обратного рассеяния, исходящей радиации на длине волны 555 и 551 нм и расчетного параметра PIC (содержание взвешенного неорганического углерода), количественно характеризующего развитие кокколитофорид. Их массовое развитие начинается в начале лета, в открытых районах восточной и северо-восточной частях моря.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Для Черного моря характерна сезонная цикличность в развитии фитопланктона. Основными продукционными периодами в цикле сезонного развития являются осенне-зимние и зимне-весенние сезоны. По продолжительности и выраженности большее значение имеют цветения осенне-зимнего сезона. Для летнего периода характерно массовое развитие кокколитофорид разной интенсивности.
2. На фоне регулярных процессов отмечаются аномальные явления в развитии фитопланктона нехарактерные для Черного моря. К ним относятся:
  - нехарактерные летние цветения вод фитопланктоном в открытой части моря, проявившиеся на спутниковых картах в поле хлорофилла «а».
  - мощные летние цветения кокколитофорид, наблюдавшиеся после аномально холодных зим.
  - зимние цветения вод кокколитофоридами, наблюдавшиеся в условиях теплой зимы с низкой ветровой активностью не препятствующей формированию стратификации.
3. Принципиальным фактором в инициации зимних цветений кокколитофорид была устойчивая стратификация. Показано, что после зимнего цветения вод кокколитофоридами летний пик развития этих водорослей, как правило, сглажен.



Концентрация хлорофилла в Черном море, 1999, 2001, 2015гг. (мг/м<sup>3</sup>)

В 2001 и 2015 году были выявлены нехарактерные для Черного моря, цветения вод фитопланктоном в летний период, которые четко проявились в поле хлорофилла. В 2001 область массового развития фитопланктона охватывала большую часть западную часть акватории моря. В августе 2015 г в поле хлорофилла было отмечено очаговое цветение вод фитопланктоном в северо-восточной части Черного моря, которое распространилось в течение последних месяцев на значительную часть восточной половины моря. Область цветения в процессе своей эволюции приобретала вихревую форму.

Влияние вихревой циркуляции на развитие фитопланктона изучалось ранее на примере квазистационарных мезомасштабных вихрей в период с 1999 по 2001. Непосредственного воздействия вихрей на изменение концентраций хлорофилла «а» по экспедиционным исследованиям обнаружено не было. Очаговое развитие фитопланктона летом 2015 году локализовано в зоне вероятного нахождения циклонического вихря. Данный феномен требует дальнейшего изучения.