



# Анализ закономерностей сезонной и многолетней изменчивости фитопланктона в Черном море по данным дистанционного зондирования и судовым наблюдениям



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

((1) Институт океанологии РАН, Москва, Россия; (2) 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.

Количественные характеристики фитопланктона отличаются значительной пространственно-временной изменчивостью, которая может быть изучена только посредством непрерывных наблюдений. Исследования морского фитопланктона судовыми методами, представляет собой весьма трудоемкую задачу и имеет эпизодический характер. Развитие технологий спутникового зондирования позволяет в значительной степени компенсировать этот недостаток и получать информацию о распределении характеристик фитопланктона с высокой степенью пространственного и временного разрешения, проследить непрерывную динамику развития фитопланктона одновременно на всей акватории моря.

## Цель и задачи

Целью данной работы является анализ закономерностей сезонной и многолетней изменчивости хлорофилла «а» и других характеристик фитопланктона в Черном море по спутниковым и экспедиционным данным.

Решались следующие задачи:

- Провести отбор источников спутниковой информации и дистанционно измеряемых параметров пригодных для оценки изменчивости фитопланктона.
- Изучить основные закономерности изменения количественных и структурных характеристик фитопланктона в Черном море за последние десятилетия по результатам экспедиционных исследований и литературным данным.
- 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 особенностей пространственной и временной изменчивости фитопланктона по спутниковым данным и материалам судовых наблюдений.

## Материалы и методы

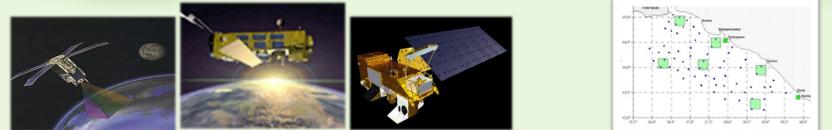


Рис.1 Сканеры SeaWiFS, MERIS, Modis-Aqua Рис.1(б) Схема экспедиций исследований.

Источниками спутниковых данных для исследования послужили измерения биооптических характеристик поверхности моря сканерами цвета (сенсорами) SeaWiFS, MODIS, MERIS в период с 1998 по 2015, а также методики и алгоритмы, позволяющие рассчитывать характеристики фитопланктона. Среди них основную роль играют концентрация хлорофилла «а», показатель отражения на длине волны 551 и 555 нм и концентрация взвешенного неорганического углерода (PIC).

Данные экспедиций исследований получены в Российском секторе Черного моря рис. 1(б)

## Результаты исследований

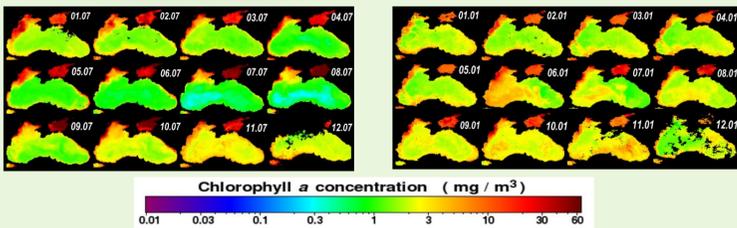


Рис.2. Концентрация хлорофилла в Черном море, 2007, 2001гг. (мг/м<sup>3</sup>)

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. Только в одном случае в 2001 году было зафиксировано аномальное цветение вод фитопланктоном в летний сезон, отразившееся в поле хлорофилла «а».

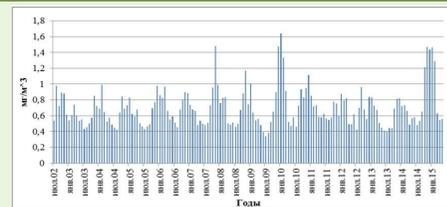


Рис.5. Сезонная и многолетняя изменчивость содержания хлорофилла «а» в циклоническом круговороте в зоне ОЧТ

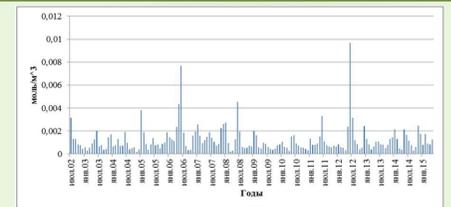


Рис.6. Сезонная и многолетняя изменчивость содержания концентраций взвешенного неорганического углерода (PIC) в центре восточного круговорота

Обработка цифровых массивов спутниковых данных по содержанию хлорофилла «а» и параметра PIC характеризующего кокколитофорид позволяет уточнить сезонную и многолетнюю изменчивость фитопланктона. Наряду с зимними пиками хлорофилла, четко прослеживаются летние пики спектральной яркости (551нм) и PIC соответствующие массовому развитию кокколитофорид. Особенно ярко они были выражены в 2006 и 2012 годах.

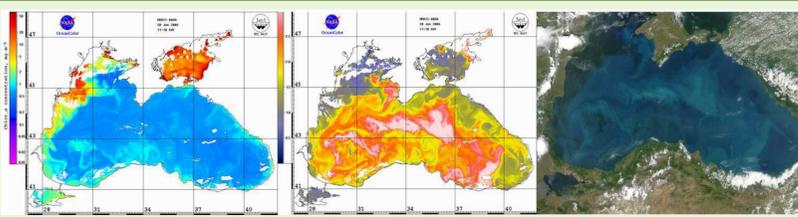


Рис. 3. Распределение параметров характеризующих развитие фитопланктона в период массового развития кокколитофорид в Черном море по данным Modis\_Aqua. 20.06.2006 (слева направо)

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.

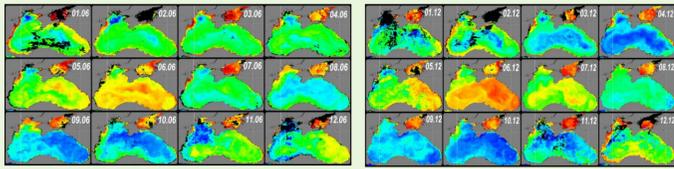


Рис.4. Концентрация взвешенного неорганического углерода в Черном море, 2006, 2012 гг. (моль/м<sup>3</sup>). Modis\_Terra

Отмечено, что массовое развитие кокколитофорид и его пространственная неоднородность в Черном море слабо выражены в поле хлорофилла «а» и напротив четко прослеживается в поле исходящей радиации на длине волны 555 и 551 нм и расчетного параметра PIC (Рис.3). По спутниковым данным периоды бурного развития кокколитофорид наблюдались примерно с двухлетней периодичностью. Их массовое развитие начинается в начале лета, в открытых районах моря, преимущественно в его восточной и северо-восточной частях, которые являются в этот период своеобразным теплым сектором и в дальнейшем захватывает всю открытую часть моря и частично прибрежные районы.(Рис.4)

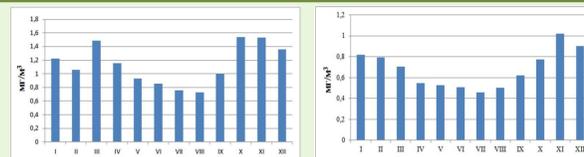


Рис. 7. Изменение средних многолетних концентраций хлорофилла по месяцам в прибрежных водах с-в части Черного моря (1) и в центре восточного круговорота (2)

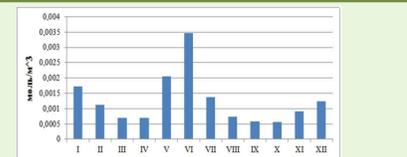


Рис. 8. Изменение средних многолетних концентраций взвешенного неорганического углерода (PIC) в Черном море по месяцам в центре восточного круговорота.

Для выяснения общей картины сезонной изменчивости фитопланктона использованы значения параметров осредненные по месяцам. (Рис. 7,8). По осредненным данным, как в прибрежных, так и открытых водах, отмечаются осенне-зимний периоды активного развития фитопланктона. При этом для прибрежных вод, наряду с осенне-зимним периодом, характерен весенний пик хлорофилла «а», связанны с бурным развитием фитопланктона в марте. Наличие этого пика подтверждается результатами прибрежного мониторинга в районе г. Геленджика.

Сезонная динамика кокколитофорид в Черном море, принципиально отличается от изменчивости фитопланктона по хлорофиллу «а». Для кокколитофорид характерен летний период массового развития с мая по июль. (Рис.8.)

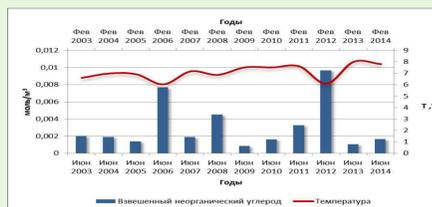


Рис.9. Концентрации взвешенного неорганического углерода PIC по спутниковым данным в период максимального развития кокколитофорид и динамика минимальных зимних температур (Т) в феврале по данным дистанционного зондирования MODIS в северо-восточной части Черного моря

Совместный анализ изменчивости взвешенного неорганического углерода и температуры поверхностных вод (Т) указывает на то, что самые мощные цветения кокколитофорид наблюдались после самых холодных зим (Рис. 9). Температура воды в зимний период, в данном случае, не оказывает непосредственного влияния на развитие кокколитофорид, а является показателем интенсивности зимней конвекции и обогащения поверхностных вод биогенными элементами, необходимыми для развития фитопланктона.

Сравнение концентраций хлорофилла «а», рассчитанных по алгоритму OSX (комбинации алгоритмов CHL\_OSC4 и CHL\_HU) показывают, что спутниковые значения завышают концентрации хлорофилла «а» в Черном море, в среднем в 1.7–2.3 раза. Таким образом использование разных параметров спутникового зондирования для оценки динамики фитопланктона позволило изучить изменчивость основных структурных компонентов черноморского фитопланктона, которые неодинаково проявляются в поле биооптических характеристик измеряемых спутниковыми сканерами цвета.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В открытых водах Черного моря фитопланктон достигает наибольшего развития в зимне-весенний и осенне-зимний сезоны, т.е в период развитой зимней конвекции. Это противоречит существующим представлениям о необходимости устойчивой стратификации для формирования зимне-весенних цветений вод фитопланктоном. (модель Свердруп).
2. Прибрежные воды отличает выраженный весенний пик концентраций хлорофилла «а», связанный с бурным развитием фитопланктона в марте. В открытых водах весенней вспышки по спутниковым данным не наблюдается.
3. Массовое развитие кокколитофорид в Черном море происходит ежегодно в летний период и начинается, как правило, в открытых районах наиболее прогретой восточной части моря.
4. Отмечена связь между уровнем развития кокколитофорид в летний период и температурой поверхностных вод предшествующих зим. Самые мощные летние цветения кокколитофорид в летний период (2006 и 2012 гг.) наблюдались после самых холодных зим.
5. На основе данных о вертикальном распределении хлорофилла «а» вычислены соотношения поверхностных концентраций и общим содержания хлорофилла «а» в слое фотосинтеза в характерные сезоны года. Результаты могут быть использованы для количественных оценок запаса хлорофилла «а» и фитопланктона в кислородном слое моря по контактным измерениям на поверхности моря или данным дистанционного зондирования сканерами цвета.