

Спутниковое исследование феномена цветений *E. huxleyi* в Баренцевом, Норвежском и Гренландском морях в 2003 - 2021 гг.: временная динамика ареала цветений, продукции неорганического углерода и парциального давления CO_2 в поверхностных водах

Фролова А. В.^{1,2}, Поздняков Д. В.^{1,2}, Морозов Е. А.³, Кондрик Д. В.^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,

² Научный Фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена»,

³ Морской гидрофизический институт

Введение

- При продолжающемся потеплении поверхности океана происходит смещение динамического равновесия между диссоциированной и взвешенной формами кальцита, CaCO_3 . В сообществе морского фитопланктона кокколитофоры являются основными кальцификаторами, то есть производителями взвешенного CaCO_3 . В этой группе микроводорослей в пелагических водах наиболее распространенным и эффективным производителем CaCO_3 является *Emiliana huxleyi*. Способность *E. huxleyi* производить твердый неорганический углерод, PIC, и повышать pCO_2 придает этой микроводоросли значительную роль в качестве климатологического фактора. По этой причине изучение возникновения цветения *E. huxleyi*, его пространственной протяженности и интенсивности в водах Мирового океана имеет важное значение.
- Как правило, пространственная протяженность (S) цветения *E. huxleyi* и его временная изменчивость обычно очень значительны, что обуславливает необходимость использования дистанционных наблюдений наряду с судовыми исследованиями. На основе применения космических данных о цвете океана многие наблюдения дистанционного зондирования *E. huxleyi* были направлены на выявление цветения этих водорослей в некоторых ограниченных районах Мирового океана. Было установлено, что данные дистанционного зондирования цвета океана также могут быть использованы для получения прироста pCO_2 , ΔpCO_2 , вызванного *E. huxleyi*.
- В настоящей работе на основе методик, разработанных Кондриком и др., мы исследуем пространственно-временные изменения S, ΔpCO_2 и PIC во время цветения *E. huxleyi* в Норвежском, Гренландском и Баренцевом морях за период 2003-2021 гг.

Данные и методы

Период: 2003-2021г.

- ***Ocean colour data - GlobColour*** 6 каналов(412, 443, 490, 531, 555, 670 нм)

Разрешение пространственное и временной данных: 4 x 4 км и 8 дней.

- ***Sea surface temperature (SST) - Pathfinder v5.3 level 3 collated (L3C) (AVHRR)*** .

Пространственное разрешение - 4 x 4 км и ежедневное разрешение.

- ***Sea surface salinity (SSS) и NO₃ данные - the World Ocean Atlas 2018 (WOA18)***.

Пространственное разрешение - 1x1° и ежедневное разрешение.

Основной метод исследования - BOREALI (Bio-optical Retrieval Algorithm) алгоритм (Поздняков и др., 2017), с помощью которого были количественно определены концентрации твердых неорганических частиц в виде кокколитов (PIM).

Результаты

Цветение *E. huxleyi* в Баренцевом море происходит ежегодно, хотя его интенсивность подвержена значительным колебаниям. В некоторые годы (в частности, в 2004, 2011, 2012, 2013, 2016, 2020) цветение занимало очень большие площади, достигая (500-600) 10^3 км². Однако такие периоды чередуются с годами удивительно сдержанной активности развития цветения *E. huxleyi*, особенно в 2017-2019 годах. Однако даже в годы относительно слабого развития цветения площадь цветения составляла около 100 10^3 км², что само по себе примечательно. Самые высокие уровни производства ПОС превышали (400-550) тыс. тонн, но даже низкие уровни, тем не менее, составляли около (50-150) тыс. тонн.

Примечательно, что значения пиковых площадей цветения не обязательно соответствуют пиковым значениям производства РИС и наоборот, что имеет естественное объяснение: большие площади цветения не обязательно плотно заселены кокколитами, и наоборот, даже небольшие по размеру цветения могут быть относительно эффективными в производстве РИС.

Как видно из графика, четкой тенденции в межгодовых изменениях как поверхности цветения *E. huxleyi*, так и продукции РИС не прослеживается.

Баренцево море

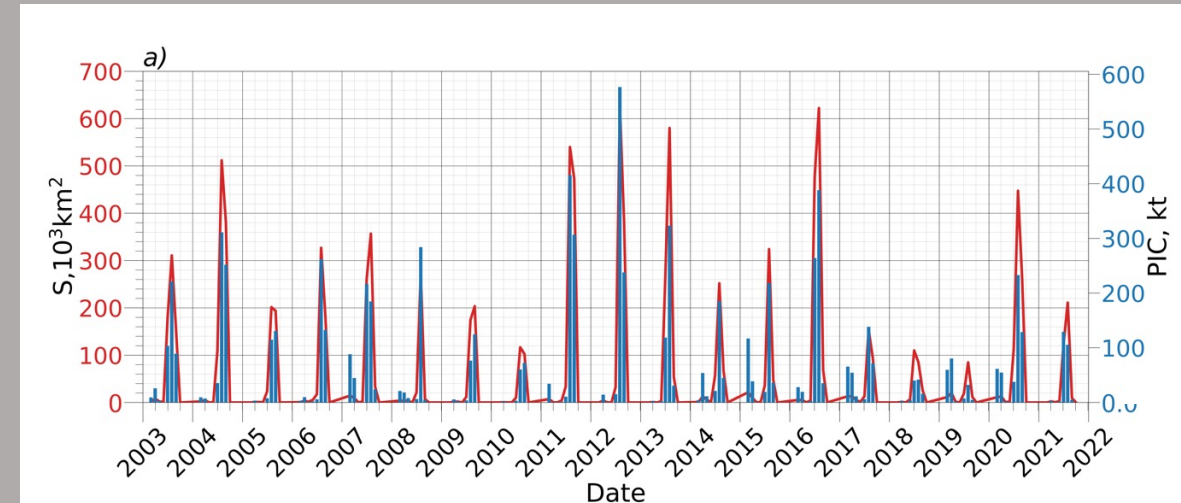


Рис.1. годовая динамика цветения *E. huxleyi*, соответствующие поверхности цветения и содержание неорганического углерода внутри цветения (обозначены синим и красным цветами, соответственно)

Норвежское море

Как и в Баренцевом море, характер пиков цветения *E. huxleyi* был явно нерегулярным: относительно крупные цветения с площадью в пределах (40-80) 10^3 км² чередовались с довольно длительными периодами относительно низкой интенсивности роста популяции этой микроводоросли. Самая сильная вспышка произошла в 2013 году, и с тех пор площади цветения не превышали примерно (20-40) 10^3 км². Можно предположить, что цветение в этом море характеризуется плотными популяциями кокколитов, поскольку во всех случаях цветения продукция РИС была заметно высокой, в некоторые годы превышая (30-40) тыс. тонн. Временной ряд, представленный на рис. 1 для этого моря, оставляет впечатление, что с 2013 года наблюдается тенденция постепенного снижения интенсивности роста *E. huxleyi* в этом море.

Гренландское море

По сравнению с Норвежским и особенно Баренцевым морями, Гренландское море характеризуется гораздо менее значительной интенсивностью роста *E. huxleyi* и формирования цветения. За весь период 2003-2021 годов было отмечено всего три относительно обширных события цветения в 2008, 2010 и 2014 годах, хотя все они имели площадь около (20-40) 10^3 км². Производство РИС также находилось на низком уровне.



Рис.1. годовая динамика цветения *E. huxleyi*, соответствующие поверхности цветения и содержание неорганического углерода внутри цветения (обозначены синим и красным цветами, соответственно)

Баренцево море

Увеличение $p\text{CO}_2$ в поверхностных водах во время цветения *E. huxleyi* в Баренцевом море было наиболее значительным среди всех рассматриваемых морей. В некоторые годы (2003, 2011) результирующее $[(p\text{CO}_2)_b + \Delta p\text{CO}_2]$ парциальное давление CO_2 достигало ~ 350 мкатм. Во многие годы соответствующие значения были заметно выше 300 мкатм, и практически никогда не опускались ниже 250 мкатм.

Норвежское море

Увеличение $p\text{CO}_2$ в поверхностных водах во время цветения *E. huxleyi* в Норвежском море было вторым по величине после Баренцева моря. Действительно, только в один единственный год, 2011, результирующая $[(p\text{CO}_2)_b + \Delta p\text{CO}_2]$ парциального CO_2 также была близка к 350 мкатм, и только четыре раза (в 2003, 2006, 2016 и 2018 годах) она превышала 300 мкатм, тогда как чаще всего оставалась около 250 мкатм. Примечательно, что указанные выше годы формирования крупного цветения в Норвежском море, по крайней мере частично, совпадают с годами обширного цветения в Баренцевом море.

Гренландское море

Гренландское море является наименее активным как с точки зрения производства обширного цветения *E. huxleyi* (рис. 1), так и обогащения поверхностных вод растворенным CO_2 (рис. 2). Относительно интенсивный рост этой водоросли наблюдался только четыре года: в 2008, 2010, 2013 и 2014 годах. В эти годы $p\text{CO}_2$ в зоне цветения достигало 250 мкатм, оставаясь в другие годы ниже уровня, уверенно определяемого нашим методом.

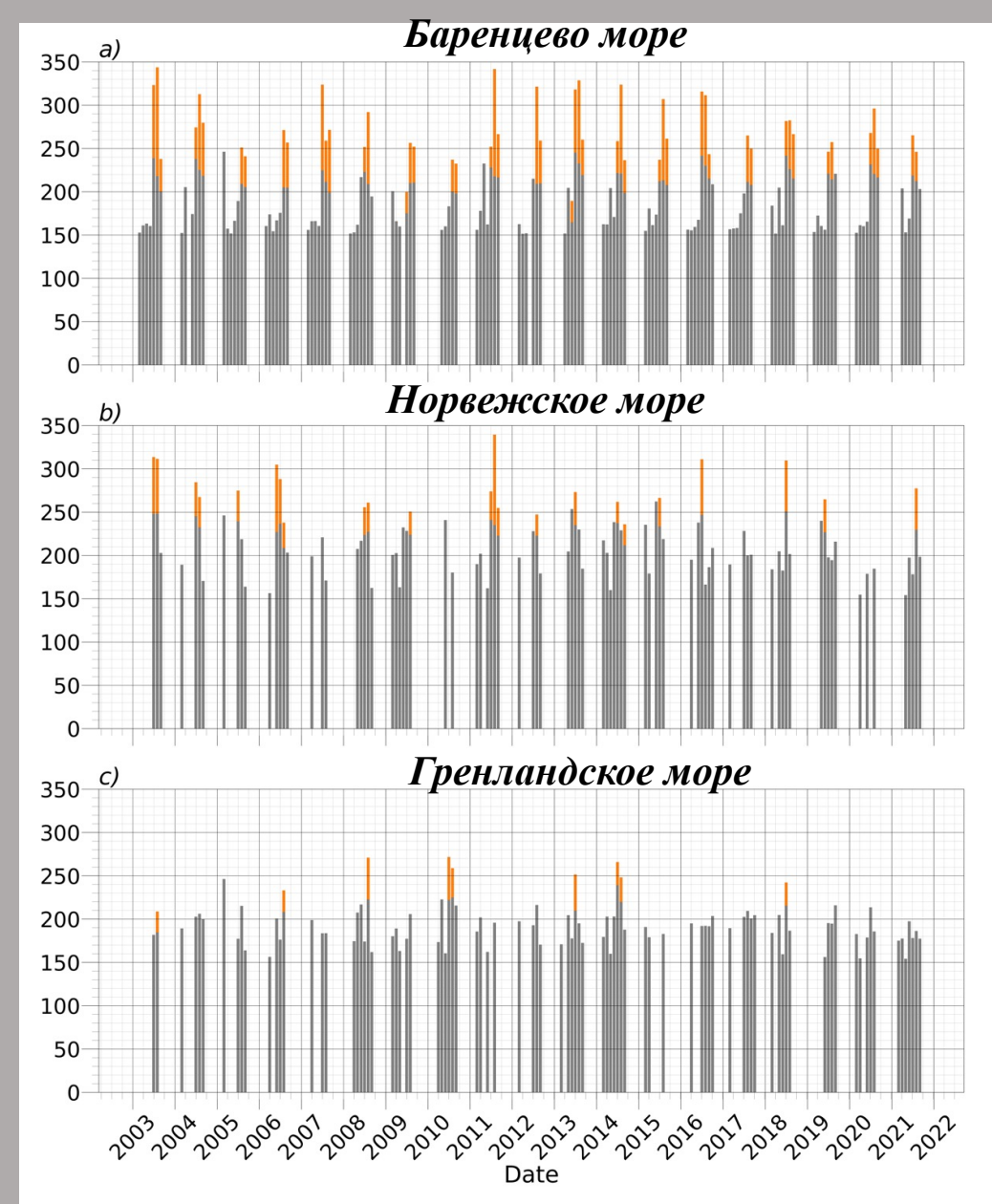


Рисунок 2. Временные изменения $(p\text{CO}_2)_b$, мкатм - серые столбики, и $[(p\text{CO}_2)_b + \Delta p\text{CO}_2]$, мкатм - оранжевые столбики

Выводы

- Полученные временные ряды для трех морей не выявили тенденции во временной динамике указанных параметров. Цветение *E. huxleyi* в Баренцевом море происходит ежегодно, хотя его интенсивность была подвержена значительным колебаниям и составляла от $\sim 600 \cdot 10^3$ км² до $\sim 50 \cdot 10^3$ км². В Норвежском море характер пиков *E. huxleyi* был явно неравномерным: относительно крупные цветения площадью (40-80) $\cdot 10^3$ км² чередовались с довольно продолжительными периодами относительно низкой интенсивности роста этой микроводоросли. В 2008, 2010 и 2014 годах было всего три относительно обширных цветения, хотя все они имели площадь около (20-40) $\cdot 10^3$ км². В то же время мелкие цветения ($<10 \cdot 10^3$ км²) происходили ежегодно.
- Производство РИС под влиянием *E. huxleyi* явно зависело от конкретного моря: оно было самым высоким в Баренцевом море (максимальные значения достигали сотни килотонн), тогда как в Гренландском море чаще всего колебалось в пределах нескольких килотонн. Норвежское море в этом отношении занимает промежуточное положение.

- Увеличение $p\text{CO}_2$ в поверхностных водах во время цветения *E. huxleyi* в Баренцевом море было наиболее значительным среди всех морей, рассматриваемых в данном исследовании. В некоторые годы (2003, 2011) результирующее $[(p\text{CO}_2)_b + \Delta p\text{CO}_2]$ парциальное давление CO_2 достигало ~ 350 мкатм и практически никогда не опускалось ниже 250 мкатм. Уровень $p\text{CO}_2$ в поверхностных водах во время цветения *E. huxleyi* в Норвежском море был вторым по величине после Баренцева моря, но чаще всего он оставался около 250 мкатм. Гренландское море является наименее активным как с точки зрения производства обширного цветения *E. huxleyi* (рис. 1), так и обогащения поверхностных вод растворенным CO_2
- Влияние цветения *E. huxleyi* на гидрохимию было, тем не менее, очевидно, значительным с точки зрения обогащения морской поверхностной воды как взвешенным углеродом, так и растворенным углекислым газом. Таким образом, это явление способно как снизить роль Мирового океана как поглотителя атмосферного CO_2 , так и повлиять на карбонатный противонасос.