

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МЕЖГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ И ТРЕНД ПРОДУКЦИИ НЕОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА КОККОЛИТОФОРНОГО ПРОИХОЖДЕНИЯ В АРКТИКЕ ЗА ПЕРИОД 2002–2010 гг. ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2013 г. Д. А. Петренко^{1,3*}, Е. В. Заболотских^{1,3}, Д. В. Поздняков^{1,2},
Ф. Кунийон³, Л. Н. Карлин³

¹Научный фонд “Международный Центр по дистанционному зондированию и окружающей среде им. Хансена”,
Санкт-Петербург

²Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Хансена, Берген, Норвегия

³Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

*E-mail: dmitry.petrenko@niersc.spb.ru

Поступила в редакцию 12.05.2013 г.

Применительно к акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) реализован предложенный ранее алгоритм, обеспечивающий: а) – распознавание по данным сканера цвета океана MODIS-Aqua областей цветения микроводоросли *Emiliana huxleyi*; б) – количественное определение неорганического углерода, продуцируемого ею в виде углекислого кальция. Построенный временной ход изменчивости интенсивности и пространственной протяженности цветения *E. huxleyi*, а также поступления в СЛО углекислого кальция указанного происхождения за период с 2002 по 2010 гг. выявил, что протяженность областей цветения *E. huxleyi* и общая масса продуцируемого неорганического углерода сократились соответственно на ~62% и 63%. Основной причиной указанных сокращений, по-видимому, является ослабление за исследованный период предварительного засеивания клетками *E. huxleyi* областей, в которых в последующем формируются цветения этого вида водорослей, что в свою очередь было обусловлено общей тенденцией снижения летнего индекса северо-атлантического колебания в указанные годы.

Ключевые слова: MODIS-Aqua, Северный Ледовитый океан, цветение *Emiliana huxleyi*, продуцирование неорганического углерода, многолетние тренды

DOI: 10.7868/S0205961413020085

ВВЕДЕНИЕ

Происходящие изменения климата Арктики обусловлены широким спектром причинно-следственных связей (Hasselmann et al., 2003). Динамика углеродного цикла в системе океан-атмосфера играет чрезвычайно важную роль в возникновении и функционировании таких связей.

Так, изменения в обмене двуокиси углерода между воздушной и водной средой приводит к ацидификации морских акваторий, что в комбинации с воздействием внешних физических факторов приводит к разнообразным нарушениям в гидробиологических процессах, в частности, когда речь идет о доступности биогенов, скоростях внутриклеточного метаболизма и первичного продуцирования, а также сдвигах в составе фитопланктонных сообществ (Bates et al., 2009).

Поступая из атмосферы, двуокись углерода взаимодействует с содержащимся в морской воде

углекислым кальцием с образованием HCO_3^- и Ca^{2+} . С увеличением глобально наблюдаемого парциального давления CO_2 в атмосфере происходят сдвиг между морским взвешенным органическим и неорганическим углеродом (Balch, Utgoff, 2009) и, как следствие, изменение абсорбционной способности Мирового океана в отношении CO_2 . Это в свою очередь влечет усиление планетарного парникового эффекта и потепление климата (Hasselmann et al., 2003).

Взвешенный неорганический углерод продуцируется в Мировом океане повсеместно в процессе жизненных циклов рифовых биосистем, макрофитов или планктонных сообществ: кокколитоидов, фораминифер и птеропод (Milliman, 1993). Имеются лишь весьма приблизительные оценки годовых объемов продуцирования фитопланктоном неорганического углерода в Мировом океане, что обусловлено сложностью получения гло-

бальных оценок концентрации соответствующих планктонных организмов и их пространственно-временной динамики.

Основным продуцентом взвешенного неорганического углерода в морских биосистемах являются кокколитофоры. В этой планктонной группе выделяется *Emiliana huxleyi* – микроводоросль, отличающаяся чрезвычайно высокой способностью продуцировать углекислый кальций.

Относительно недавно, с применением спутниковых наблюдений цвета океана, было установлено, что цветения *E. huxleyi* происходят практически ежегодно и в Арктическом бассейне (Smyth et al., 2004; Буренков и др., 2011).

Огромные пространства Арктического океана, пространственная межгодовая изменчивость локализации областей цветения *E. huxleyi*, моментов возникновения и продолжительности этого явления обуславливают предпочтительность применения спутниковых средств получения искомой информации.

Имеющиеся к настоящему времени соответствующие спутниковые исследования в Арктике (Smyth et al., 2004; Буренков и др., 2011) ограничиваются в основном оценкой площади цветений *E. huxleyi* и ее сезонной и межгодовой динамики.

В настоящей работе в этих целях нами использовались данные MODIS-Aqua за период 2002–2010 гг. и применялся разработанный нами алгоритм, позволяющий не только идентифицировать/картировать цветение *E. huxleyi*, но и определять на количественном уровне продуцирование этой водорослью взвешенного углерода.

Цель исследования – выяснение для всей свободной ото льда акватории Арктики современных тенденций в динамике вегетирования водоросли *E. huxleyi* и высвобождения ею в водную среду неорганического углерода в условиях наблюдающегося потепления климата в этом регионе.

КОККОЛИТОФОРЫ: КРАТКАЯ МОРФО-ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Кокколитофоры – одноклеточные растительные организмы, синтезирующие углекислый кальций в виде твердых пластин, кокколитов. По форме напоминающие микроскопические пластины/крышки/диски или сферы, кокколиты имеют размеры в диапазоне 0.2–2 мкм. К каждой клетке этой планктонной водоросли прикреплено не менее 30 (в среднем 32–38) кокколитов. Процесс кальцификации сопровождается высвобождением CO_2 по реакции: $2\text{HCO}_3 + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Поскольку радикал HCO_3 всегда в избытке наличествует в морской воде, также как и ионы кальция, кокколитофоры могут наращивать биомассу и продуцировать углекислый кальций и

в условиях пониженного поступления CO_2 извне. Кроме того, кокколитофоры могут развиваться в условиях пониженных концентраций биологически доступного кремния и железа и таким образом оказываются в более предпочтительных условиях в планктонном сообществе.

Типично бурное развитие кокколитофоров приводит к возникновению явления цветения воды, когда концентрация этой водоросли начинает превышать 10^6 кл л⁻¹. При этом концентрация хлорофилла в зонах цветения кокколитофоров оказывается относительно невысокой (~0.5–3.0 мкг л⁻¹). Поэтому, хотя в процессе фотосинтеза кокколитофоры потребляют растворенный CO_2 , однако, с учетом реакции кальцификации, эти водоросли являются все-таки продуцентами неорганического углерода в морской среде.

На поздней стадии своего жизненного цикла кокколитофоры сбрасывают кокколиты, концентрация которых в ареалах массового развития кокколитофоров достигает нескольких десятков (и даже сотен) миллионов на литр (Balch et al., 2005).

Среднее содержание взвешенного неорганического углерода в кокколите составляет 0.2×10^{-12} г, хотя по некоторым сообщениям эта цифра может достигать 1.05×10^{-12} г. По имеющимся оценкам, ежегодно в Мировом океане осаждается не менее 1.5 млн т кальцита в составе кокколитов.

Оптимальные условия развития кокколитофоров – высокие уровни солнечного освещения (для *Emiliana huxleyi* не обнаружено эффекта фотингибирования), устойчивая стратификация в эвфотическом слое (глубина слоя перемешивания не более 30 м (Iglesias-Rodriguez et al., 2002)), достаточная биогенная база и низкие концентрации зоопланктона (т.е. низкая скорость выедания), отсутствие конкуренции с диатомовыми (т.е. сохранение достаточных для развития уровней кремния).

Для *E. huxleyi* было показано, что массовое развитие этой водоросли может начинаться при высоких значениях отношения N : P, т.е. низких P (на уровне 10% от концентраций, необходимых для массового развития других групп фитопланктона), хотя сами концентрации нитратов и аммония могут быть и невысокими (Tyrrell, Merico, 2004).

Известно также, что для развития кокколитофоров требуется тиамин (витамин B₁), поступающий в водную среду в результате активности водной биоты. Поэтому цветения кокколитофоров происходят вслед за соответствующей “подготовкой” водной среды, например, после цветения диатомовых.

Для начала массового развития кокколитофоров важен и так называемый фактор засеивания (seeding): адвекции клеток этой водоросли из других морских провинций в будущую зону цветения.

Хотя цветения кокколитофоров, как правило, не являются монокультурными и происходят в сочетании с другими планктонными группами, эти водоросли чаще всего оказываются доминантами, составляя до 90% от общей численности фитопланктонного сообщества.

МЕТОДОЛОГИЯ

В работе использовался разработанный нами био-оптический алгоритм, в основу которого заложены процедура многомерной оптимизации Левенберга–Марквардта (Л–М) и гидрооптическая модель, учитывающая оптическое влияние клеток водорослей *E. huxleyi* и диатомовых, а также кокколитов, на яркость восходящего света под поверхностью зондируемого водного столба. Алгоритм и использовавшаяся гидрооптическая модель подробно описаны в работе (Коросов и др., 2009). Здесь же приводим лишь краткое их изложение.

В процедуре Л–М ищется минимум функции невязки, g между измеренными и смоделированными спектральными значениями подповерхностного коэффициента отражения для дистанционного зондирования, $R_{rsw}(-0, \lambda)$, определяемого как

$$R_{rsw}(-0, \lambda) = \frac{L_u(-0, \lambda)}{E_d(-0, \lambda)},$$

где $L_u(-0, \lambda)$ и $E_d(-0, \lambda)$ – соответственно спектральная яркость восходящего света под поверхностью воды в надирном направлении и освещенность снизу водной поверхности. $R_{rsw}(-0, \lambda)$ является функцией парциальных концентраций C_i оптически активных компонентов (ОАК), присутствующих в воде, и спектральных удельных коэффициентов поглощения a^* и обратного рассеяния b_b^* ОАК. Применялась модель $R_{rsw}(-0, \lambda)$, предложенная Джеромом и др. (Jerome et al. 1996) для оптически сложных вод – вод типа 2 по классификации Мореля (Morel, Prieur, 1997). Модель справедлива для широкого диапазона солнечных зенитных углов и визирования, близкого к надирному.

В качестве ОАК рассматривались вода *per se*, диатомовый фитопланктон, *E. huxleyi* и кокколиты. Как отмечалось во введении и согласно имеющимся судовым данным, цветению кокколитофора *E. huxleyi* в Арктике предшествуют цветения диатомовых, последние, на фазе затухания, соседствуют (в остаточных количествах) с цветением *E. huxleyi* (Nielsen, Hansen, 1995; Von Quillfeldt et al., 2005).

В соответствии со сказанным выше, при наличии гидрооптической модели (т.е. спектральных значений a^* и b_b^* ОАК), коэффициент $R_{rsw}(-0, \lambda)$

и, следовательно, невязка g являются функцией вектора концентраций ОАК, $C = \Sigma_i C_i$.

Таким образом, задача сводится к отысканию минимума функции $g(C)$ путем итеративного варьирования компонент вектора концентраций C , что в нашем алгоритме осуществляется методом Л–М.

Гидрооптическая модель была синтезирована с использованием литературных данных (Bricaud et al., 1983, 2000; Balch et al., 1999; Morel, Bricaud, 1981; Pope, Fry, 1997; Morel, Maritorea, 2001; IOCCG, 2000) по спектральным значениям коэффициентов a^* и b_b^* для H_2O , диатомовых, кокколитофоров и кокколитов (кокколиты считаются практически не поглощающими свет минеральными частицами (Gordon et al., 1988)).

При известной глубине перемешанного слоя для каждого пиксела наблюдаемого цветения *E. huxleyi* масса неорганического углерода с одного квадратного метра вычислялась по соотношению

$$M_C = m C_{cc} \text{ГПС}, \quad (1)$$

где m , C_{cc} и ГПС – масса единичной пластики (кокколита), концентрация кокколитов, определенная по спутниковым данным, и глубина перемешанного слоя соответственно. В качестве m принималось значение 0.2×10^{-12} г.

Общая масса неорганического углерода, производимая *E. huxleyi*, получалась суммированием произведений ($M_C \times$ площадь цветения) по всем областям цветений в Арктическом бассейне.

Облачность в теплый период года в Арктике создает значительные трудности в спутниковом зондировании Арктики в видимом и ИК-диапазонах. Тем не менее наблюдения показывают, что облачные поля часто имеют многочисленные разрывы. В тех случаях, когда контур области цветения *E. huxleyi* проявляется вне границ облачной зоны, концентрации хлорофилла *E. huxleyi* и диатомовых, а также кокколитов в пределах облачной принимают одномерно распределенными и равными значениям, определенным вне облачной зоны.

В некоторых случаях, когда значительная часть области или вся область цветения *E. huxleyi* экранирована облачностью, но имеются разрывы в облачном покрове, позволяющие приблизительно очертить область цветения кокколитофора, значения концентраций *E. huxleyi* и диатомовых, а также кокколитов, определенные в зонах разрывов в облачности, принимаются также однородно распределенными по всей зоне цветения. Аналогично мы поступали и в случаях промежуточных между этими двумя крайними ситуациями, т.е. когда часть границы зоны цветения находилась вне зоны облачного покрова, а другая просматривалась в разрывах облачности.

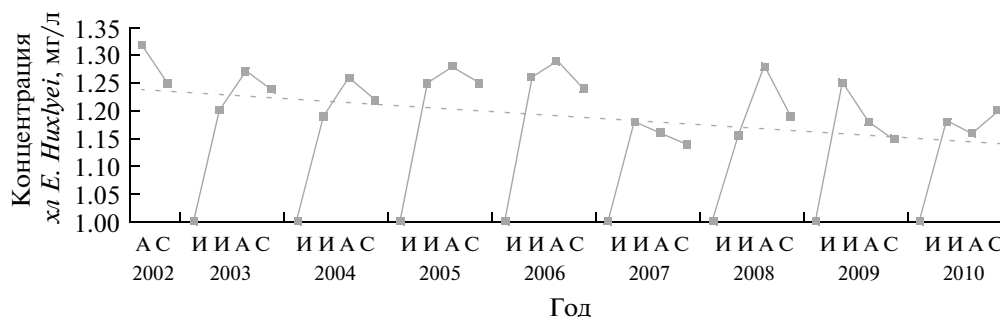


Рис. 1. Сезонная и межгодовая динамика концентрации *E. huxleyi* в Арктическом бассейне.

Очевидно, что описанный выше подход является достаточно грубым, зависящим от адекватности визуальных/экспертных оценок. Тем не менее он дает хотя и ориентировочную, но статистически более высокую обеспеченность данными спутникового зондирования.

Спутниковые данные по температуре поверхности моря (ТПМ), а также по уровню фотосинтетически активной радиации (ФАР) у поверхности океана, доступные с MODIS-Aqua, были использованы нами наряду с данными индекса северо-атлантического колебания (САК) за летний период при анализе причинно-следственных связей, формирующих многолетние тренды динамики: а) – цветения *E. huxleyi* и б) – выделения кокколитов/неорганического углерода в Северном Ледовитом океане (СЛО).

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Спутниковые данные уровня L3 MODIS-Aqua по цвету океана и ТПМ были получены с веб-сайта OceanColour для широтной зоны 67° с.ш.–80° с.ш.

Данные ГПС были получены по результатам пилотного реанализа с использованием модели TOPAZ (Sakov et al. 2012), основанной на модели HYCOM – генерализованной гибридно-координатной изопикнической модели океана с ассимиляцией спутниковых данных (<http://hycom.org/hycom/overview>; Hogan et al., 2007), сочлененной с термодинамической моделью (Drange et al., 2005) и моделью динамики морского ледяного покрова (Hunke, Dukowicz, 1997). Система TOPAZ специализирована на северную Атлантику и Арктику и обеспечивает пространственное разрешение данных численного моделирования в диапазоне 12–16 км.

Для вегетационного периода нами была произведена оценка соответствия значений ГПС по модели TOPAZ и многолетними данными *in situ* по станции Mike (Смирнов, 2011). Было показано, что хотя расчетные данные несколько занижали значение ГПС по сравнению со стационарными данными, тем не менее имелось достаточно

устойчиво хорошее соответствие обеих оценок (Петренко и др., 2012).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По данным (Balch et al. 2009), цветение кокколитов в Арктике происходит в четырех основных районах, а именно, в Гренландском и Баренцевом морях, в море Лаптева, а также в Восточно-Сибирском и Чукотском морях.

Тщательный анализ собранных данных MODIS-Aqua по цвету океана и обработанных разработанным нами алгоритмом показал, что основными районами цветения *E. huxleyi* являются Баренцево и Гренландское моря, а также северная часть Норвежского моря, т.е. акватория СЛО, ограниченная координатами 20° з.д.–50° в.д.; 67° с.ш.–80° с.ш. Что касается моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, в летнее время они практически неизменно закрыты плотными облаками, поэтому даже при наличии просветов в облачном покрове цветения *E. huxleyi* не обнаруживалось. Таким образом, мы считаем, что приводимые ниже данные в полной мере отражают ситуацию с продукцией неорганического углерода в СЛО.

Рисунок 1 иллюстрирует как внутрисезонную и межгодовую изменчивость концентрации хлорофилла *E. huxleyi* по акватории СЛО в период с 2002–2010 гг., так и соответствующий линейный тренд (–16.2%). Выясняется, что, судя по зарегистрированным концентрациям хлорофилла, максимальные величины биомассы этой водоросли в большинстве случаев формируются в августе. Однако помимо этого возникает и дополнительное массовое развитие *E. huxleyi* в сентябре, причем в некоторые годы (например, в 2003–2007, 2009 гг.) на этот месяц приходятся весьма высокие значения биомассы *E. huxleyi*, а в 2010 г. сентябрьская продукция даже превысила августовскую. При этом полученные оценки позволяют сделать однозначный вывод, что в период с 2002 по 2010 гг. имеет место постепенное снижение уровня развития этой водоросли в СЛО (таблица). Об этом же свидетельствуют и спутниковые данные о до-

Тренды за период 2002–2010 гг. параметров, относящихся к цветению *E. huxleyi* и продуцированию неорганического углерода в СЛО по данным спутникового зондирования

Параметр			Тренд, %	Статистическая значимость тренда, %
Среднее значение параметра в области цветения	СЛО	Концентрация <i>E. huxleyi</i> , мг/л	–16.2	99
		Концентрация кокколитов, 10 ⁶ /л	–17.1	То же
		ТПМ	–1.5	97
	Баренцево море	ФАР	–1	95
		Концентрация <i>E. huxleyi</i> , мг/л	–17.8	99
		Концентрация кокколитов, 10 ⁶ /л	–18.6	То же
		ТПМ	–1.8	98
		ФАР	–1	95
		ФАР	–1	95
Интегрированные значения	СЛО	Масса углерода, т	–62.4	99
		Область цветения, км ²	–63.1	То же
	Баренцево море	Масса углерода, т	–55.6	»
		Область цветения, км ²	–56.9	»

вольно устойчивом сокращении площади цветения *E. huxleyi*: с ~15000 км² в 2003 г. до ~6000 км² в 2010 г. (рис. 5). Как видно из таблицы, соответствующий тренд составил 63.1% за 9 лет (2002–2010 гг.).

Как и следовало ожидать, аналогичная ситуация складывается и с временной изменчивостью концентрации кокколитов и неорганического углерода (рис. 2 и 3 соответственно). Налицо тенденция снижения обоих показателей в указанный период. Значения соответствующих трендов приведены в таблице.

Анализ распределения интенсивности и пространственной протяженности цветений *E. huxleyi* в Арктических водах показывает, что основной вклад в общую биомассу этого кокколитофора вносит Баренцево море (рис. 4). Соответственно и вклад продукции неорганического углерода этим регионом СЛО оказывается доминирующим. При этом, однако, и в Баренцевом море с 2002 по 2010 гг. наблюдается тенденция к сокращению этого вклада (таблица).

ОБСУЖДЕНИЕ

Совместный анализ сезонной динамики концентрации клеток *E. huxleyi*, концентрации кокколитов и массы неорганического углерода (рис. 1–3) выявляет, что, при общей согласованности наблюдаемых изменений этих трех параметров, в деталях имеются и различия (в некоторые годы). В частности, в 2009 г. масса неорганического углерода в июле очень низка, тогда как концентрации клеток *E. huxleyi* и кокколитов довольно значительны. В 2010 г. масса неорганического углерода в июле мала, в то время как на этот месяц приходится высокий (сравнимый с августовским) уровень концентрации клеток *E. huxleyi* и наблюдается рост концентрации кокколитов. В сентябре того же года масса неорганического углерода падает, а концентрации клеток *E. huxleyi* и кокколитов продолжают расти. Аналогичные несоответствия просматриваются и для 2005–2008 гг., когда весьма существенное сокращение продукции неорганического углерода в сентябре месяца проходило при еще достаточно высоких концентрациях как самих кокколитофоров, так и кокко-

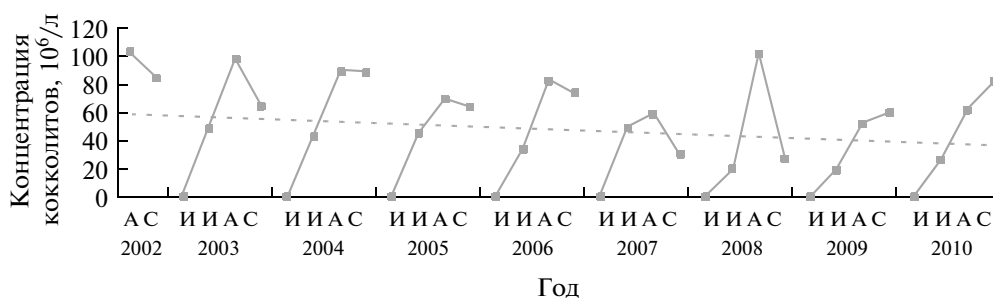


Рис. 2. Сезонная и межгодовая динамика концентрации кокколитов в Арктическом бассейне.

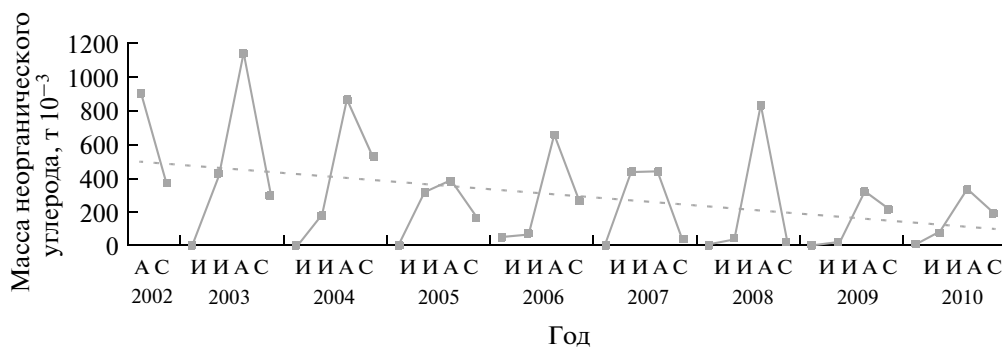


Рис. 3. Сезонная и межгодовая динамика массы неорганического углерода, продуцируемого при цветении *E. huxleyi* в Арктическом бассейне.

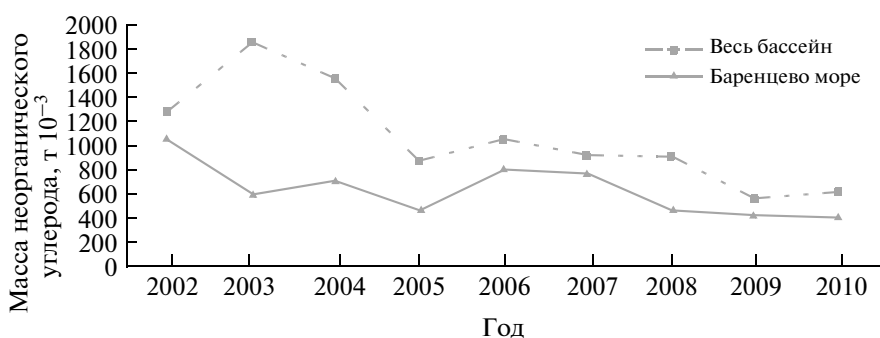


Рис. 4. Сравнение продуцируемой при цветении *E. huxleyi* годовой массы углерода в Баренцевом море и Арктическом бассейне в целом.

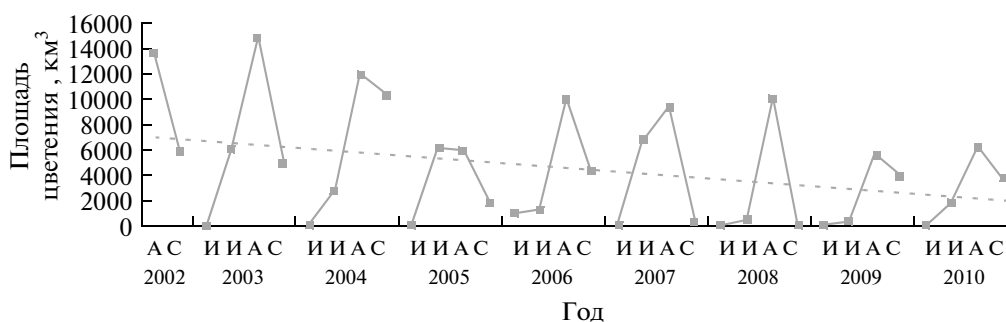


Рис. 5. Сезонная и межгодовая динамика площади ареалов цветения *E. huxleyi* в СЛО.

литов. Эти кажущиеся противоречия оказываются легко объяснимыми, если обратиться к полученным нами спутниковым данным по сезонной динамике суммарной площади ареалов цветения *E. huxleyi* в СЛО. Как видно из рис. 5, именно в названные выше годы и месяцы имело место резкое сокращение площадей цветения *E. huxleyi*.

В характере кривых на рис. 1 и 2 за все годы наших наблюдений также можно наблюдать некоторые отличия: как правило, пиковое значение концентрации кокколитофитов происходит через некоторое время после наступления пикового зна-

чения концентрации клеток *E. huxleyi* (например, 2004, 2007, 2009, 2010 гг.). Объяснением этому является тот факт, что активное отделение кокколитофитов от клеток кокколитофора происходит на завершающем этапе жизненного цикла этой группы водорослей (Tyrrell, Merico, 2004). Однако в некоторые годы такого четкого запаздывания момента возникновения пика концентрации кокколитофитов относительно пика концентрации клеток *E. huxleyi* не наблюдается: оба пика оказываются синфазными. Основная причина кроется в том, что, во-первых, мы имеем дело со среднемесяч-

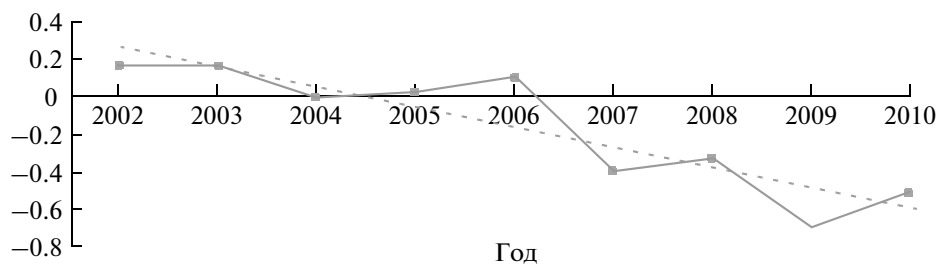


Рис. 6. Межгодовые значения и линейный тренд изменения САК за летний/вегетационный период.

ными данными, что могло замаскировать ожидаемое запаздывание, и, во-вторых, мог сказаться эффект внешнего физического воздействия, например, сильное ветровое перемешивание, последовавшее на этапе интенсивного отделения кокколитов от клеток кокколитофора. Нельзя также исключать влияние неизбежных неточностей, обусловленных применявшейся нами методики оконтуривания полей цветения *E. huxleyi* в условиях, когда на космических снимках облачный покров частично экранировал ареал цветения этой водоросли.

На фоне надежно установленного факта роста первичной продуктивности в Арктическом регионе за последние 12–13 лет (Arrigo, van Dijken, 2011; Petrenko et al., 2012) важным является вопрос об установленном нами значительном отрицательном тренде в динамике цветения *E. huxleyi* на почти десятилетнем периоде и, как следствие, планктонного продуцирования неорганического углерода в СЛО.

При анализе возможных причин снижения интенсивности и площади цветения *E. huxleyi* мы использовали данные по температуре поверхности воды (ТПВ) и уровню приходящей фотосинтетически активной радиации (ФАР), полученные по спутниковым данным MODIS (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), а также данные по значениям индекса САК в летний период 2002–2010 гг. (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/new.nao.shtml>). Значения трендов ТПВ и уровня ФАР (таблица) определялись не по всему Арктическому бассейну, а исключительно для районов, характерных для ареалов цветения *E. Huxleyi*, и только в вегетационный период. Как видно из таблицы и рис. 6, у всех трех показателей наблюдается отрицательная динамика на рассматриваемом квазидекадном периоде и, следовательно, каждый показатель в отдельности и все они в совокупности могли явиться причиной снижения развития *E. huxleyi* в СЛО.

Другим обстоятельством, которое способно обусловить обнаруженное снижение развития *E. huxleyi* и продуцирования неорганического углерода, может быть усиление конкуренции за кремний между *E. huxleyi* и диатомовыми, при

усилившемся присутствии последних в зоне цветения кокколитофора. Однако наши наблюдения (в ходе которых наряду с *E. huxleyi* одновременно определялась и концентрация диатомовых в ареале цветения, а также в непосредственной близости от него) этого не подтверждают. Напротив, было зарегистрировано даже некоторое снижение этого параметра за указанный период наблюдения.

Мы предполагаем, что ведущая роль здесь принадлежит отрицательной динамике САК. Как отмечалось ранее, фактор предварительного “засеивания” играет важную роль в инициации цветения *E. huxleyi*. Обусловленное снижением (со сменой знака) САК уменьшение притока вод в Баренцево море из таких регионов, как Бискайский залив, моря вокруг Великобритании и Ирландии, пролива Ламанш, в водах которых ежегодно происходит мощное цветение *E. huxleyi* (Morozov et al., 2012), в состоянии привести к существенному сокращению интенсивности и площади цветения этой водоросли в этом регионе. Последний является основным “поставщиком” планктонного неорганического углерода в СЛО. Косвенно в пользу такой интерпретации указывает совместный анализ характера изменчивости концентрации клеток *E. huxleyi* и САК (рис. 1 и 6): до 2006 г. САК был положительным, и уровни развития *E. huxleyi* были достаточно высокими. После 2007 г., когда САК становится отрицательным, уровни развития *E. huxleyi* заметно снижаются. Пожалуй, единственным исключением является 2008 г., отметившийся “скачком” (рис. 1). Однако это год, когда значение САК было минимально отрицательным за весь период 2007–2010 гг. Аналогичная взаимосвязь прослеживается и между изменениями площади цветения *E. huxleyi* (рис. 5) и динамикой САК.

Предложенная интерпретация не может считаться окончательной и, тем более, исчерпывающей. Нужны дополнительные исследования гидрохимической и гидробиологической ситуаций, которые складывались на данном периоде в зонах цветения *E. huxleyi*, что выходит за рамки настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование, выполненное на основе спутниковой информации и с применением специально разработанного алгоритма, впервые позволило количественно оценить ежегодные поступления в СЛЮ кальция водорослевого происхождения и показать, что в 2002–2010 гг. произошло снижение этих поступлений, явившееся результатом спада интенсивности и пространственной протяженности цветения микроводоросли *E. huxleyi*, продуцирующей на заключительном этапе своего жизненного цикла неорганический углерод в виде углекислого кальция.

Выяснилось, что обнаруженная тенденция происходит на фоне отрицательных трендов динамики ТПВ, уровня приходящей ФАР и индекса САК за летний/вегетационный период. Это дает основание для предположения, что, по крайней мере, эти три фактора, при лидирующей роли индекса САК, обусловили динамику, связанную с сокращением цветения *E. huxleyi* и продуцирования неорганического углерода в СЛЮ.

Настоящая работа выполнена в рамках программы FP7 (грант “MONARCH-A FP7-SPA.2009.1.1.02). Выражаем благодарность Европейскому Сообществу за финансовую поддержку данных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буренков В.И., Копелевич О.В., Ратькова Т.Н., Шебетов С.В. Спутниковые наблюдения цветения кокколитофорид в Баренцевом море // *Океанология*. 2011. Т. 51. С. 818–826.
- Коросов А.А., Морозов Е.А., Поздняков Д.В., Петтерссон Л.Х., Грассл Х. Идентификация и картирование ареалов цветения кокколитофоров в Бискайском заливе по спутниковым данным // *Исслед. Земли из космоса*. 2009. № 3. С. 67–78.
- Петренко Д.А., Поздняков Д.В., Петтерссон Л.Х., Карлин Л.Н. Оценка адекватности алгоритмов дистанционного определения первичной продукции в Арктическом Океане по данным SeaWiFS и MODIS-AQUA // *Ученые записки РГГМУ*. 2012. (принята к публикации).
- Смирнов А.В. Эволюция верхнего слоя океана в Северо-Европейском бассейне: Дис. к-та геогр. наук. СПб., 2011. 184 с.
- Arrigo K.R., van Dijken G.L. Secular trends in Arctic Ocean net primary production // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. № C09011. doi:10.1029/2011JC007151.
- Balch W.M.K., Drapeau D.T., Cucci T.L., Vaillancourt R.D., Kilpatrick K.A., Fritz J.J. Optical backscattering by calcifying algae: separating the contribution by particulate inorganic and organic carbon fractions // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 1541–1558.
- Balch W.M., Gordon H.R., Bowler B.C., Drapeau D.T., Booth E.S. Calcium carbonate measurements in the surface global ocean based on Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer data // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № C07001. doi:10.1029/2004JC002560.
- Balch W., Utgoff P. Potential interactions among ocean acidification, coccolithophores and the optical properties of seawater // *Oceanogr.* 2009. V. 22. № 4. P. 146–159.
- Bates N.R., Mathis J.T. The Arctic Ocean marine carbon cycle: Evaluation of air-sea CO₂ exchanges, ocean acidification impacts and potential risks // *Biogeosciences*. 2009. V. 6. P. 2433–2459.
- Bricaud A., Morel A., Prieur L. Optical efficiency factors of some phytoplanktons // *Limnol. Oceanogr.* 1983. V. 28. P. 816–832.
- Bricaud A., Bedhomme A.L., Morel A. Optical properties of diverse phytoplanktonic species: experimental results and theoretical interpretation // *J. Plankton Res.* 2000. V. 10. № 5. P. 851–873.
- Drange H., Dokken T., Furevik T., Gerdes R., Berger W. The Nordic Seas: An integrated perspective. Geophysical Monographic Series. 158. Washington: AGU, 2005.
- Gordon H.R., Brown O.B., Evans R.H., Brown J.W., Smith R.C., Baker K.S., Clark D.K. A semi analytic radiance model of ocean color // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 95. № D9. P. 10909–10924.
- Hasselmann K., Latif M., Hooss G., Azar C., Edenhofer O., Jaeger C., Johannessen O.M., Kemfert C., Welp M., Wokaun A. The challenge of long-term climate change // *Science*. 2003. V. 302. P. 1923–1925. doi: 10.1126/science.1090858.
- Hogan P.J., Wallcraft A.J., Baraille R. The HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system // *J. Marine Syst.* 2007. V. 65. № 1–4. P. 60–83.
- Hunke E.C., Dukowicz J.K. An elastic-Viscous-Plastic Model for sea ice dynamics // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. V. 27. P. 1851–1867.
- Iglesias-Rodrigues M.D., Brown C.W., Doney S.C. Representing key phytoplankton functional groups in ocean carbon cycle models: Coccolithophorids // *Global Biogeochem. Cycles*. 2002. V. 16. № 4.
- Jerome J.H., Bukata R.P., Miller J.R. Remote sensing reflectance and its relationship to optical properties of natural water // *Int. J. Rem. Sens.* 1996. V. 17. № 1. P. 43–52.
- Morel A., Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton // *Deep Sea Res. Pt A. Oceanogr. Res.* 1981. V. 28. № 11. P. 1375–1393.
- Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean colour // *Limnol. Oceanogr.* 1997. V. 22. P. 709–722.
- Morel A., Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters: a reappraisal // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № C4. P. 7163–7180.
- IOCCG. Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters // *Rep. Int. Ocean-Colour Coordinating Group / Eds. S. Sathyendranath. Dartmouth, Canada: IOCCG, 2000. № 3.*
- Morozov E., Pozdnyakov D., Smyth T., Sychev V., Grassl H. Spaceborne study of seasonal, multi-year and decadal phytoplankton dynamics in the Bay of Biscay // *Int. J. Rem. Sens.* 2012. (in print).
- Milliman J. Production and accumulation of calcium carbonate in the ocean: budget of a nonsteady state // *Global Biogeochem. Cycles*. 1993. V. 7. P. 927–957.
- Nielsen T.G., Hasen B. Plankton community structure and carbon cycling on the western coast of Greenland during

and after the sedimentation of a diatom bloom // *Marine Ecol. Progr. Ser.* 1995. V. 125. P. 239–257. doi: 10.3354/meps125239.

Petrenko D., Pozdnyakov D., Johannessen J., Counillon F., Sychov V. Satellite derived multi-year trend in primary production in the Arctic Ocean // *Int. J. Rem. Sens.* 2012. (submitted).

Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Appl. Optics.* 1997. V. 36. № 33. P. 8710–8723.

Sakov P., Counillon F., Bertino L., Lisæter K.A., Oke P.R., Korablev A. TOPAZ 4: an ocean-sea ice data assimilation

system for the North Atlantic and Arctic // *Ocean Sci. Discuss.* 2012. V. 9. P. 1519–1575.

Smyth T., Tyrrel T., Tarrant B. Time series of coccolithophore activity in the Barents Sea, from twenty years of satellite imagery // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № L11302. doi:10.1029/2004GL019735.

Tyrrell T., Merico A. *Emiliana huxleyi*: bloom observations and the conditions that induce them // *Coccolithophores – from molecular processes to global impact* / Eds. H. Thierstein, J. Young. B.: Springer, 2004. P. 585–604.

Von Quillfeldt C.H. Diatom species in Arctic spring bloom: their distribution and abundance // *Botanica Marina.* 2005. V. 43. № 6. P. 449–576. doi: 10.1515/BOT.2000.050.

Interannual Variations and Trend of the Production of Inorganic Carbon by Coccolithophores in the Arctic during 2002–2010 Based on Satellite Data

D. A. Petrenko^{1,3}, E. V. Zabolotsikh¹, D. V. Pozdnyakov^{1,2}, F. Counillon², L. N. Karlin³

¹ Scientific Foundation “Nansen International Environmental and Remote Sensing Center”, St. Petersburg

² Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen, Norway

³ Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Based on the MODIS data, revealed and quantified is a significant decline in the intensity and spatial extension of blooms of a coccolithophore *E. huxleyi* in Arctic waters during 2002–2010. This nine year tendency has been unfolding against a background of negative trends in the dynamics of SST, levels of incident PAR and summer-time NAO, which collectively, but with a predominance of the NAO influence, are believed to be the main drivers of the decline of *E. huxleyi* blooms and associated inorganic carbon production decline in the Arctic Basin.

Keywords: MODIS-Aqua, Arctic Ocean, *Emiliana huxleyi* blooms, inorganic carbon production, multiyear trends