

## Перспективы улучшения точности оценки параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море по спутниковым данным

О.В. Копелевич<sup>1</sup>, П.Г. Каралли<sup>1,2</sup>, А.С. Лохов<sup>1</sup>, И.В. Салинг<sup>1</sup>, С.В. Шеберстов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: oleg@ocean.ru*

<sup>2</sup> *Московский физико-технический институт (ГУ), Московская обл.,  
Долгопрудный, Россия*

В ранее предложенном алгоритме (Копелевич и др., 2012) концентрация клеток кокколитофорид  $N_{coc}$  в период кокколитофоридных цветений (КЦ) в Баренцевом море оценивается через значения показателя рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}$ , рассчитанные по спутниковым данным. Предполагается, что значения  $b_{bp}$  целиком определяются клетками кокколитофорид и отделившимися кокколитами; принятые значения удельных показателей рассеяния назад для клеток и кокколитов взяты из работы (Voss et al., 1998). Коэффициент  $K$  для связи между  $N_{coc}$  и  $b_{bp}$  зависит от отношения числа отделившихся кокколитов к числу клеток и может изменяться в несколько раз. В представляемой работе выполнены количественные оценки изменений коэффициента  $K$  на основе данных прямых определений 2014–2016 гг. Согласно полученным оценкам, значение  $K$  зависит от возраста цветений — по анализируемым данным среднее значение  $K$  для цветений, наблюдавшихся до середины августа, равно 145, позже — 65. Проведено сопоставление среднемесячных значений  $N_{coc}$  и концентрации взвешенного неорганического углерода PIC (стандартного продукта НАСА), рассчитанных по спутниковым данным за июль, август и сентябрь с 1998 по 2016 г. Связь оказалась достаточно тесной.

Анализ числовых и объемных распределений по размерам взвешенных в морской воде частиц, измеренных посредством счетчика Коултера в Баренцевоморской экспедиции в июле-августе 2017 г., показал, что при наличии кокколитофоридных цветений на числовых распределениях хорошо видны максимумы вблизи 5 мкм, соответствующие клеткам кокколитофорид; при отсутствии цветения максимумы не наблюдаются. Обнаружена тесная корреляционная связь между концентрацией частиц во фракциях 2–5 мкм и 5–10 мкм и величиной показателя рассеяния назад  $b_{bp}$ , который оценивался по данным измерений плавающим спектро радиометром. Полученные результаты указывают на хорошую согласованность данных и перспективы использования данных счетчика Коултера для оценки влияния изменения размеров клеток и «некокколитофоридного» вклада в показатель  $b_{bp}$  от терригенных частиц и клеток фитопланктона других видов.

**Ключевые слова:** кокколитофоридные цветения, Баренцево море, спутниковые данные, алгоритм расчета концентрации, анализ влияющих факторов, улучшение точности

*Одобрена к печати: 13.12.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-267-279*

### Введение

Полноценные исследования кокколитофоридных цветений (КЦ), особенно в Баренцевом море, где натурные измерения относительно редки, невозможны без использования спутниковых данных. Данные измерений спутниковыми сканерами цвета, несмотря на существенные ограничения их доступности, в первую очередь из-за облачности и ледового покрытия, позволяют получить информацию о возникновении цветений, их пространственном распределении и временной изменчивости различных масштабов. С появлением первого современного сканера цвета SeaWiFS и последующих сканеров (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) исследованию КЦ с использованием спутниковых данных посвящены многочисленные публикации; назовем лишь работы последних лет, в которых представлены ссылки на предшествующие работы: (Кондрик, Поздняков, Петерсен, 2017; Giraudeau et al., 2016; Hovland et al., 2014).

Наряду с исследованиями относительных изменений КЦ важное практическое значение имеют оценки абсолютных значений параметров цветений; КЦ относятся к числу климатически значимых факторов, так как они влияют на баланс  $\text{CO}_2$  в системе атмосфера-океан, определяя действие карбонатного «биологического насоса», а также на тепловой баланс океана, увеличивая альбедо водной толщи и уменьшая тем самым количество солнечного излучения, проникающего в поверхностный слой (Копелевич и др., 2017). В число количественных характеристик цветений, рассчитываемых по спутниковым данным, входят следующие параметры: концентрация взвешенного неорганического углерода (Particulate Inorganic Carbon — PIC) — стандартный продукт, находящийся в свободном доступе на сайте НАСА (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>); концентрация клеток кокколитофорид  $N_{\text{coc}}$ , площадь цветения  $S$  и количество клеток в 1-метровом слое по площади цветения  $\Sigma$  (<http://optics.ocean.ru>).

Региональный алгоритм оценки по спутниковым данным концентрации клеток кокколитофорид  $N_{\text{coc}}$  в период кокколитофоридных цветений в Баренцевом море был предложен в работе (Копелевич и др., 2012). Расчет  $N_{\text{coc}}$  проводится по значениям показателя рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{\text{bp}}$ , которые рассчитываются по спутниковым данным в предположении, что значения  $b_{\text{bp}}$  целиком определяются клетками кокколитофорид и отделившимися кокколитами. Используются значения удельных показателей рассеяния назад для клеток и кокколитов из работы (Voss et al., 1998). Коэффициент  $K$  для связи между  $N_{\text{coc}}$  и  $b_{\text{bp}}$  зависит от отношения  $\alpha$  числа отделившихся кокколитов к числу клеток; на основе данных прямых определений 2004 и 2009 гг. он был принят равным 66. Однако данные последующих лет показали, что коэффициент  $K$  может принимать и гораздо большие значения (Копелевич и др., 2015).

В настоящей работе рассматриваются возможные причины вариаций параметров связи между количественными характеристиками КЦ и показателем  $b_{\text{bp}}$  и перспективы улучшения точности оценок этих характеристик по спутниковым данным.

### **Используемые данные и алгоритмы**

В основе нашей работы — совместный анализ данных спутниковых наблюдений и судовых измерений, выполненных в экспедициях ИО РАН в последние несколько лет. На карте на рис. 1 показано расположение точек отбора проб на ходу судна и дрейфовых станций 2014–2017 гг.

Как видно на рисунке, судовые измерения охватывают почти все Баренцево море от Белого моря на юге до границы льдов на севере, хотя есть достаточно большие области, главным образом к северу от  $75^\circ$  с.ш., где измерения отсутствовали. К сожалению, одновременных спутниковых и судовых измерений было немного (в основном из-за облачности). Данные для анализа отбирались, исходя в первую очередь из наличия КЦ и данных прямых определений видового состава фитопланктона. Отобранные для анализа точки представлены

в табл. 1. Они включают данные 2004 и 2009 гг., полученные на поверхностных пробах воды только для концентрации фитопланктона (в частности, кокколитофорид и кокколитов) (Копелевич и др., 2012), а также данные 2014–2016 гг. (см. примечания к табл. 1). Экспедиция 2017 г. (68-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш») закончилась во второй половине августа, многие данные еще полностью не обработаны; обработанные данные 2017 г. представлены в последнем разделе статьи.

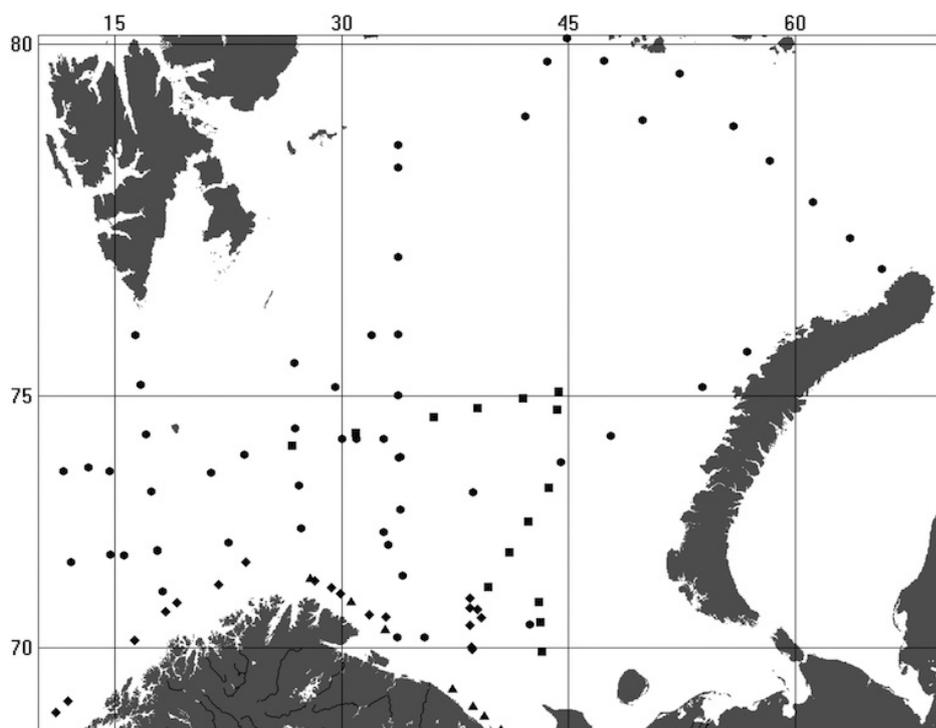


Рис. 1. Расположение точек отбора проб на ходу судна и дрейфовых станций, выполненных в Баренцевом море в экспедициях ИО РАН в 2014–2017 гг. Треугольники — 127-й рейс НИС «Профессор Штокман», 2014 г.; квадраты — 62-й, 2015 г., ромбики — 65-й, 2016 г.; кружки — 68-й, 2017 г. рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш»

Таблица 1. Координаты точек и даты судовых измерений; параметры уравнения (1) по данным прямых определений фитопланктона; даты спутниковых измерений

№ точки (станции)	Координаты		Дата судовых измерений	Параметры (1)		Дата спутниковых измерений
	с.ш.	в.д.		$\alpha$	K	
<b>2004 г.</b>						
04	71,98	29,73	10.08	5	136	11.08
06	71,22	28,73	12.08	16	110	13.08
<b>2009 г.</b>						
04	70,45	38,70	27.08	100	45	27.08
11	70,95	39,87	30.08	66	59	01.09
12	71,82	42,20	02.09	85	50	03.09
13	72,52	42,93	04.09	24	96	04.09
<b>2014 г.<sup>1</sup></b>						
12733_0	70,38	32,87	03.08	4	140	03.08
12733_4				0	152	
12734_0	69,00	37,33	04.08	0	152	03.08

Таблица 1. Продолжение

№ точки (станции)	Координаты		Дата судовых измерений	Параметры (1)		Дата спутниковых измерений
	с.ш.	в.д.		$\alpha$	K	
12734_4				0	152	
12735_0	68,58	38,68	04.08	0	152	03.08
12735_4				0	151	
12736_0	68,37	39,43	04.08	0	152	03.08
12736_4				1	150	
<b>2015 г.<sup>2</sup></b>						
5192_0	75,08	44,35	16.08	45	73	-
5192_27				8	127	
5193_23	73,33	43,67	17.08	50	69	14.08
5195_0	71,00	43,02	18.08	87	49	15.08
5195_10				75	54	
5195_21				223	24	
<b>2016 г.<sup>3</sup></b>						
6525	71,38	21,87	05.07	3	140	04.07
6526	71,85	23,68	05.07	3	142	06.07
6530	70,68	39,25	07.07	5	136	06.07
6531	70,85	38,97	07.07	2	145	06.07
6532	71,08	38,50	07.07	2	146	06.07
6533_0	70,88	38,48	07.07	2	146	06.07
6533_5				1	147	
6533_19				1	150	
6534_0	70,50	38,50	07.07	3	142	06.07
6534_10				2	144	
6534_25				0	151	
6535_0	69,97	38,62	07.07	0	151	06.07
6535_10				1	147	

<sup>1</sup> Измерения проводились на ходу судна; пробы отбирались с поверхности ведром и из проточной системы с горизонта 4 м.

<sup>2</sup> Измерения на дрейфовых станциях — указан номер станции и горизонт отбора пробы.

<sup>3</sup> Пробы в точках 6525–6532 отобраны ведром с поверхности, для ст. 6533 указаны горизонты отбора проб.

Во всех экспедициях отбирались и консервировались пробы для определения концентрации хлорофилла и взвеси, количественного и видового состава фитопланктона в береговых лабораториях. Последние включали подсчет под микроскопом клеток кокколитофорид и отделившихся кокколитов по стандартной методике (в 2004 г. эти определения проводила Т.Н. Ратькова, в остальных экспедициях — Л.А. Паутова). Судовые измерения коэффициента яркости моря проводились во всех рейсах, кроме экспедиции 2014 г., где дрейфовых станций не было; в 2016 г. эти измерения выполнялись с борта судна посредством палубного спектрометра, разработанного в Морском гидрофизическом институте (МГИ), Севастополь (Ли и др., 2015). В рейсах 2015–2017 гг. измерения проводились на дрейфовых станциях с помощью плавающего спектрометра (Артемьев и др., 2000).

В экспедиции 2017 г. проводились измерения числовых и объемных распределений взвешенных в морской воде частиц по размерам в диапазоне размеров от 2 до 60 мкм с помощью счетчика Коултера Multisizer-3 (<https://www.beckman.com/cell-counters-and-analyzers/multisizer-3>). Эти данные использовались для оценки размеров кокколитофоридных частиц, их числовой и объемной концентраций.

Спутниковые данные скачивались с сайта НАСА (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), в основном — данные сканера MODIS-Aqua (также MODIS-Terra и VIIRS). Использовались данные 2-го уровня для коэффициента яркости моря  $Rrs$  (remote sensing reflectance) для спектральных каналов 531 и 547 нм. По этим данным посредством разработанного ранее алгоритма (Буренков и др., 2001) рассчитывался показатель рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}$ , а затем параметры КЦ с помощью регионального алгоритма (Копелевич и др., 2012; <http://optics.ocean.ru>).

## Результаты и их обсуждение

### *Коэффициент $K$ для связи между $N_{coc}$ и $b_{bp}$ и его изменения*

Формула для расчета концентрации клеток кокколитофорид  $N_{coc}$  в период кокколитофоридных цветений в Баренцевом море, которая используется в региональном алгоритме (Копелевич и др., 2012), имеет вид:

$$N_{coc} = \frac{152b_{bp}}{1+0,024\alpha} = Kb_{bp}, \quad (1)$$

в предположении, что значения коэффициентов рассеяния назад клетки и кокколита равны  $6,6 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/кл. и  $1,6 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/шт (Voss et al., 1998); предполагается, что вклад «некокколитофоридных» частиц пренебрежимо мал.

Отношение  $\alpha$  числа отделившихся кокколитов к числу целых клеток может сильно варьировать: так, по данным 2004 и 2009 гг., которые использовались для разработки регионального алгоритма,  $\alpha$  изменялось примерно в 20 раз — от 5 (12 августа 2004 г.) до 100 (27 августа 2009 г.). Очевидно, что  $\alpha$  зависит от возраста популяции: у молодой популяции  $\alpha$  может быть близко к нулю, и в этом случае  $K \rightarrow 152$ ; если цветение находится в завершающей стадии и  $N_{coc} \rightarrow 0$ , значение  $\alpha$  может превышать  $10^2$  и коэффициент  $K$  уменьшается в несколько раз.

Это хорошо видно из *табл. 1*: в 2004, 2014 и 2016 гг., когда измерения проводились до 12.08, значения  $\alpha$  находились в пределах от 0 до 16, а значения  $K$  составляли 152–110; в 2009 и 2015 гг., когда измерения проводились после 16.08, значения  $\alpha$  в верхнем 10-метровом слое варьировали от 24 до 100 и коэффициент  $K$  изменялся от 45 до 96. Среднее значение коэффициента  $K$  по данным измерений до 12.08 составило 145, а по данным измерений после 16.08 — 65.

Возраст популяции можно было бы оценивать по данным спутниковых наблюдений, отмечая развитие цветения от начала до завершения, но в Баренцевом море это практически нереально из-за облачности. Представленные выше результаты дают возможность на основе «средне-климатических» данных ввести поправку на значение коэффициента  $K$ . Конечно, для применения такой поправки в рутинных расчетах концентрации клеток кокколитофорид в Баренцевом море еще требуется дальнейшая проверка и уточнение ее значений.

### Связь между среднемесячными значениями $PIС$ и $b_{bp}$

На сайте НАСА (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) в качестве стандартного продукта, рассчитываемого по спутниковым данным и характеризующего кокколитофоридные цветения, представлены значения молярной концентрации взвешенного неорганического углерода  $PIС$ , моль·С/м<sup>3</sup>, что соответствует массовой концентрации 12  $PIС$ , гС/м<sup>3</sup>. Предполагается, что  $PIС$  содержится только в кокколитах и значение  $PIС$  менее зависимо от соотношения между числом целых клеток (*plated cells*) и отделившихся кокколитов (*detached coccoliths*), а также от изменения размеров клеток.  $PIС$  рассчитывается в два этапа: сначала с использованием таблиц (*look-up table*), предварительно рассчитанных на основе данных измерений в Северной Атлантике, вычисляются значения показателя рассеяния назад кокколитами, а затем эти значения делятся на удельный показатель рассеяния назад кокколитами (равный 1,628 м<sup>2</sup>/моль), получая  $PIС$ .

Мы сравнили изменения среднемесячных значений  $PIС$  и  $N_{coc}$  в Баренцевом море, рассчитанных по площади цветений (ограниченной изолинией 0,5 млн кл./л) для июля, августа и сентября за 1998–2016 гг. (рис. 2).

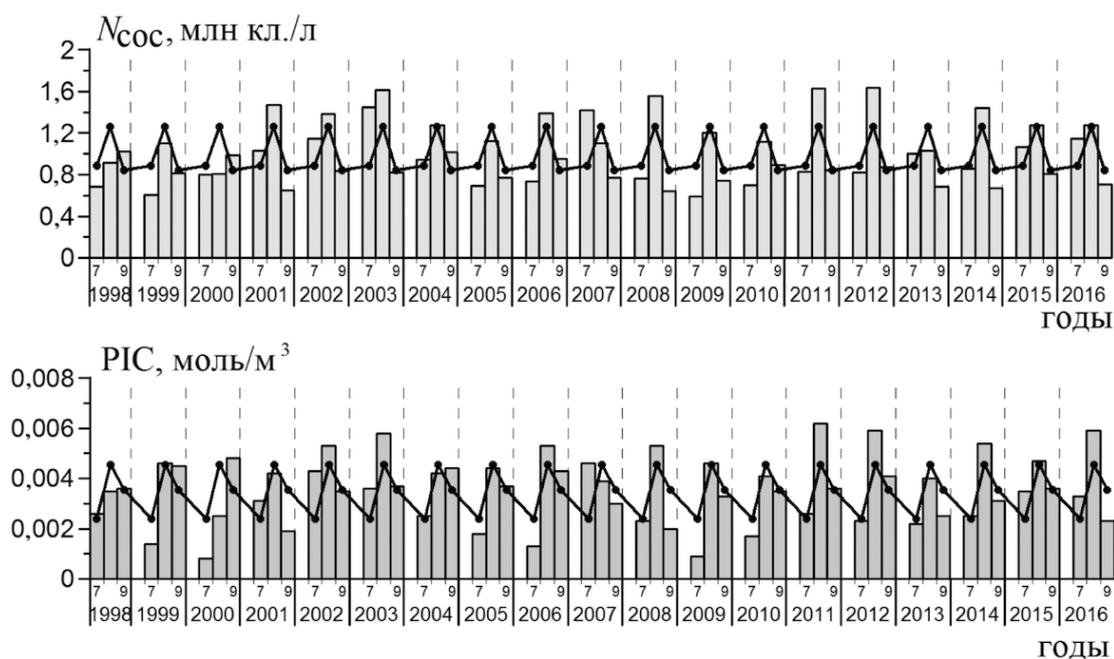
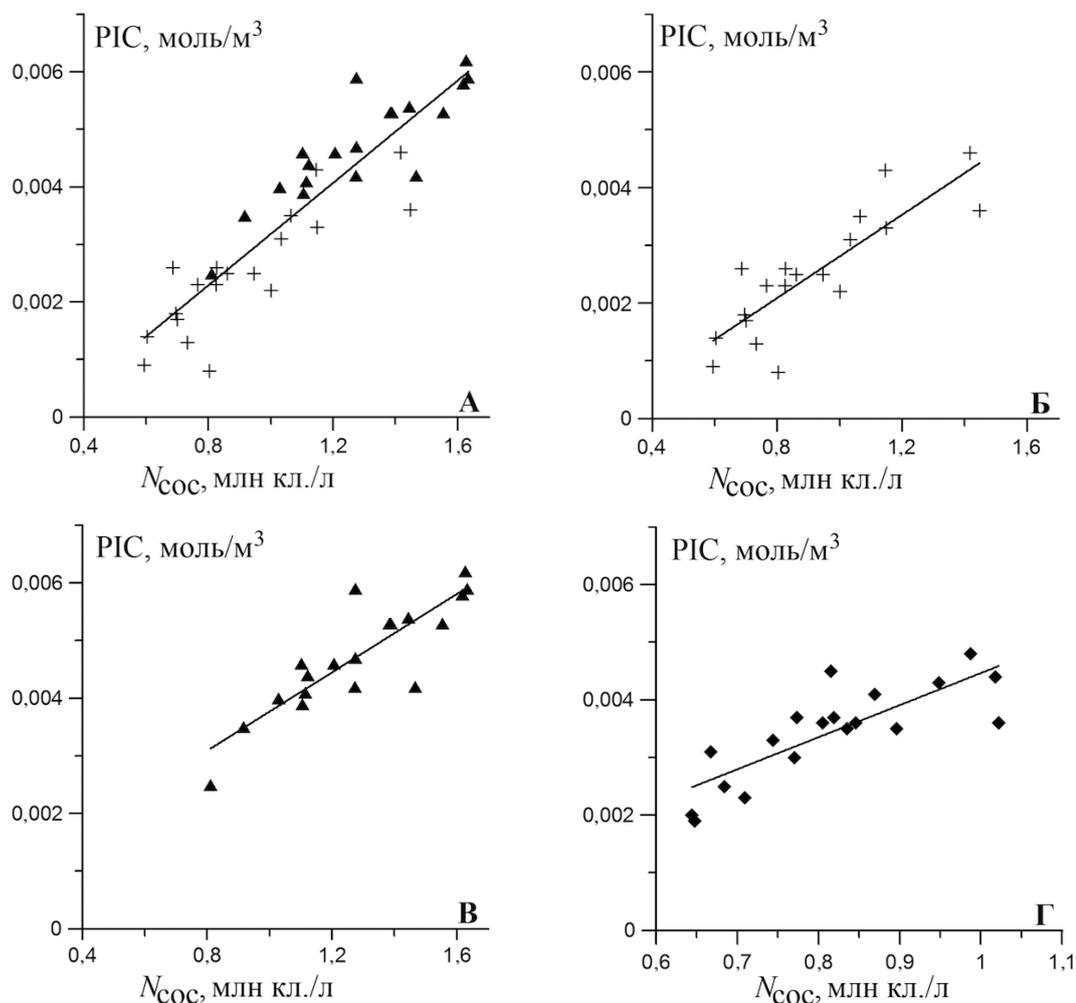


Рис. 2. Изменения среднемесячных значений  $PIС$  (нижний рисунок) и  $N_{coc}$  (верхний), рассчитанных по площади цветений (ограниченной изолинией 0,5 млн кл./л) для июля, августа и сентября за 1998–2016 гг.

Как видно на *рис. 2*, изменения рассматриваемых параметров достаточно хорошо соответствуют друг другу, хотя можно заметить и некоторые отличия.

На *рис. 3* показаны линии регрессии, рассчитанные между среднемесячными значениями РИС и  $N_{\text{coc}}$  за период 1998–2016 гг. ( $n = 19$ ) для июля, августа и сентября и для объединенной выборки июль+август ( $n = 38$ ).



*Рис. 3. Линии регрессии между среднемесячными значениями РИС и  $N_{\text{coc}}$  за период 1998–2016 гг. для объединенной выборки июль–август (А), июль (Б), август (В) и сентябрь (Г), рассчитанными по данным спутниковых сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua (<http://optics.ocean.ru>)*

Как видно на рисунке, корреляция между значениями РИС и  $N_{\text{coc}}$  довольно высокая: коэффициенты детерминации  $R^2$  равны 0,82 для объединенной выборки июль–август, 0,72 — для июля, 0,75 — для августа и 0,655 — для сентября. Для пересчета в РИС среднемесячных значений  $N_{\text{coc}}$  для июля и августа (<http://optics.ocean.ru>) рекомендуем использовать уравнение регрессии для объединенной выборки июль–август:

$$\text{РИС, ммоль/м}^3 = 4,45 N_{\text{coc}} - 1,27, \quad (2)$$

где  $N_{\text{coc}}$ , млн кл./л. Ошибка регрессии для этого уравнения составляет 0,65 ммоль/м<sup>3</sup>, коэффициент вариации 18%.

Отношения средних значений  $РІС/N_{coc}$  составляют 39 пгС/кл. для июля, 33 — для августа, 44 пгС/кл. — для сентября. Если взять значение  $РІС$  на один кокколит, равное 0,276 пг/шт (Girardeau et al., 2016), получим, соответственно, 14 кокколитов на 1 клетку в июле, 19 — в августе, 22 — в сентябре, что по порядку величины соответствует значению 20 кокколитов на 1 клетку, принятому для Баренцева моря в вышеупомянутой работе. Увеличение числа кокколитов на 1 клетку в сентябре можно объяснить возрастанием в сентябре числа отделившихся кокколитов, которые также входят в  $РІС$ .

Была выполнена проверка соответствия между спутниковыми значениями  $РІС$  и значениями, рассчитанными по данным прямых определений концентрации клеток кокколитофорид и кокколитов; использовались значения  $РІС$  на кокколит 0,276 пг/шт и 20 кокколитов на 1 клетку (Girardeau et al., 2016). Расчетная формула имеет вид:

$$РІС, \text{ г/м}^3 = 0,276 \cdot 10^{-3} N_{coc} (20 + \alpha) \text{ и } РІС, \text{ моль/м}^3 = 0,46 \cdot 10^{-3} \cdot N_{coc} (1 + 0,05\alpha), \quad (3)$$

где  $\alpha$  — отношение числа отделившихся кокколитов к числу клеток,  $N_{coc}$ ,  $10^6$  кл./л. Расчеты проводились для данных 2014 и 2016 гг., для которых значения  $\alpha$  не превышали пяти и поэтому их изменения (и ошибки их определения) слабо влияли на результат.

В табл. 2 показаны результаты сравнения, в ней также приведены значения показателя рассеяния назад  $b_{bp}$ , рассчитанные по спутниковым данным (отметим, что значения  $b_{bp}$  для 2016 г. показали хорошее соответствие с данными палубного спектрометра (Каралли, 2017)).

Таблица 2. Сравнение значений  $РІС$ , моль·С/м<sup>3</sup> по спутниковым данным и рассчитанным по данным прямых определений концентрации кокколитофорид в зависимости от показателя рассеяния назад  $b_{bp}$

2014 г.				2016 г.			
№ точки (станции)	$b_{bp}, \text{ м}^{-1}$	$РІС_{\text{спутн.}}$	$РІС_{\text{расч.}}$	№ точки (станции)	$b_{bp}, \text{ м}^{-1}$	$РІС_{\text{спутн.}}$	$РІС_{\text{расч.}}$
12733_0	0,0077	0,0014	0,0007	6530	0,0300	0,0104	0,0043
12734_0	0,0103	0,0019	0,0014	6531	0,0322	0,0107	0,0061
12735_0	0,0235	0,0070	0,0032	6532	0,0130	0,0088	0,0021
12736_0	0,0196	0,0018	0,0011	6533_0	0,0104	0,0026	0,0025

Можно предположить, что спутниковые значения  $РІС$  завышены при больших значениях  $b_{bp}$ , но данных слишком мало, чтобы делать выводы, и нужна дальнейшая проверка этого предположения.

#### Анализ данных счетчика Коултера

На рис. 4 показаны числовые и объемные распределения концентрации взвешенных частиц по данным измерений посредством счетчика Коултера для станций, где наблюда-

лись кокколитофоридные цветения: 5550 (75,2° с.ш., 29,6° в.д.), 5576 (72,4° с.ш., 32,8° в.д.), 5580 (70,2° с.ш., 35,5° в.д.). На этих станциях проводились измерения плавающим спектро- радиометром, рассчитывались значения показателя  $b_{bp}$  и концентрация клеток  $N_{coc}$ .

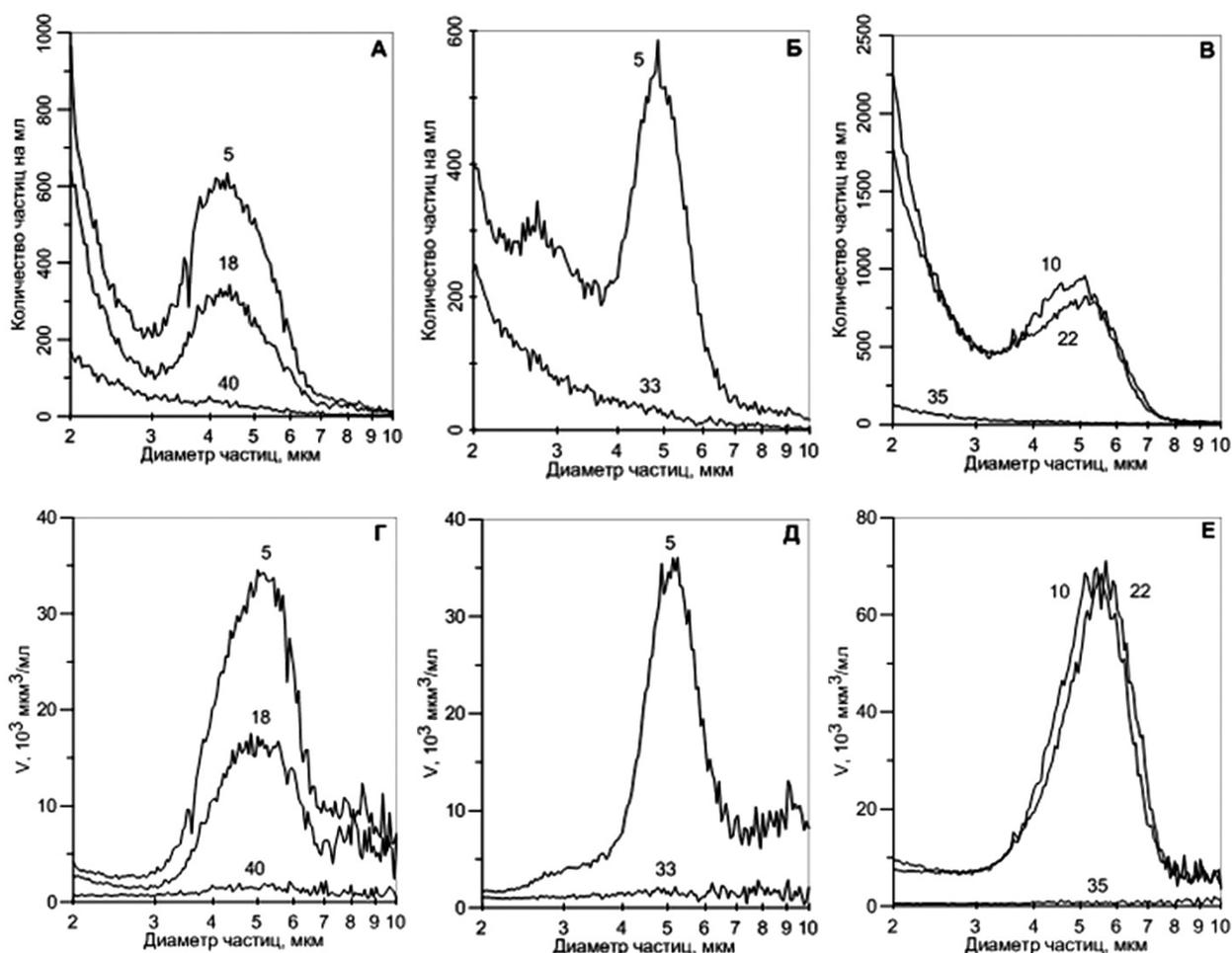


Рис. 4. Числовые (А–В) и объемные (Г–Е) распределения концентрации взвешенных частиц по данным измерений посредством счетчика Коултера для станций с кокколитофоридными цветениями: 5550 (А, Г); 5576 (Б, Д); 5580 (В, Е). Цифры у кривых показывают горизонт, м, с которого отобраны пробы

Как видно на рисунке, числовые распределения четко показывают максимумы вблизи 5 мкм, соответствующие клеткам кокколитофорид, а на ст. 5576 (горизонт 5 м) хорошо виден максимум вблизи 2,7 мкм, соответствующий отделившимся кокколитам. Такие максимумы отсутствуют на горизонтах глубже 30 м и на станциях, где нет цветений.

Для восьми станций, где наблюдались цветения, были рассчитаны коэффициенты детерминации  $R^2$  для связи между объемными концентрациями частиц во фракциях 2–5 и 5–10 мкм и показателем  $b_{bp}$ ; они составили соответственно 0,91 и 0,83. Такие высокие значения  $R^2$  указывают на хорошее соответствие данных, полученных разными приборами — лабораторным счетчиком Коултера и плавающим спектро- радиометром.

Счетчик Коултера, безусловно, перспективный прибор для валидации алгоритмов дистанционной оценки параметров кокколитофоридных цветений. Конечно, он не может

полностью заменить прямые микроскопические определения видового состава фитопланктона, но имеет и определенные преимущества перед последними. Прежде всего, это оперативность — данные счетчика Коултера можно получить уже через несколько часов после отбора проб, тогда как микроскопические определения требуют длительной подготовки и трудоемкой работы за микроскопом. Другое важное преимущество — возможность получения числовых и объемных распределений взвешенных частиц по размерам (рис. 4). Анализ этих распределений позволяет, во-первых, оценить размеры клеток кокколитофорид и обнаружить происходящие изменения их размеров, непосредственно влияющие на ошибки используемого алгоритма. Во-вторых, появляется возможность оценки влияния «некокколитофоридной» составляющей взвеси и разработки метода учета этого влияния. В табл. 3, рассчитанной по представленным выше данным, иллюстрируется изменение доли фракций 2–5, 5–10 и 2–10 мкм в общей объемной концентрации взвеси 2–60 мкм.

Таблица 3. Доли фракций 2–5, 5–10 и 2–10 мкм (%) в общей объемной концентрации взвеси 2–60 мкм в зависимости от показателя рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}$  ( $m^{-1}$ ) и величины общей концентрации ( $cm^3/m^3$ )

№ станции	5548	5550	5576	5577	5580	5581
$b_{bp}, 10^{-2} \cdot m^{-1}$	0,69	1,70	1,12	2,69	4,78	0,74
$V_{2-60}, cm^3/m^3$	5,1	3,8	2,2	3,4	4,2	2,4
$V_{2-5}, \%$	6,8	22,7	28,1	27,1	32,7	11,9
$V_{5-10}, \%$	15,3	25,9	40,7	42,1	43,1	41,3
$V_{2-10}, \%$	22,1	48,6	68,8	69,2	75,8	53,2

Как видно из таблицы, доля фракций 2–10 мкм, к которым относятся кокколитофориды и кокколиты, растет с увеличением  $b_{bp}$ , достигая почти 76% на ст. 5580, где наблюдалось ярко выраженное кокколитофоридное цветение. На ст. 5548 эта доля минимальна — примерно 22%; предположительно на этой станции цветут диатомовые или динофлагеллаты (на это указывает высокая концентрация хлорофилла — 2,6 мг/м<sup>3</sup> на горизонте 5 м).

### Заключение

– По данным натурных определений биооптических характеристик и параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море в 2014–2016 гг. выполнены оценки изменения коэффициента  $K$  для связи между показателем рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}$  и концентрацией клеток кокколитофорид. Показано, что его значения изменяются в течение летнего сезона: для исследуемого массива данных его среднее значение равно 145 до середины августа, позже уменьшается до 65.

– Показано, что между среднемесячными концентрациями взвешенного неорганического углерода PIC и клеток кокколитофорид  $N_{coc}$ , рассчитанными по спутниковым данным за период 1998–2016 гг., существует достаточно тесная корреляционная связь

(коэффициент детерминации  $R^2$  равен 0,82 для июля–августа), выведено уравнение регрессии для связи между РС и  $N_{\text{coc}}$ .

– Показана перспективность использования данных счетчика Коултера для исследования различных характеристик цветения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00095), предоставленного Институту океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Авторы выражают признательность старшему научному сотруднику ИО РАН канд. биол. наук Л.А. Паутовой и зав. лабораторией экологии ЮО ИО РАН д-ру биол. наук В.А. Силкину за предоставленные данные по количественному и видовому составу фитопланктона.

### Литература

1. *Артемов В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н.* Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 1. С. 148–155.
2. *Буренков В.И., Ершова С.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Шевченко В.П.* Оценка пространственного распределения взвеси в водах Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета океана SeaWiFS // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 5. С. 653–659.
3. *Каралли П.Г.* Валидация спутниковых оценок биооптических параметров поверхностных вод Баренцева моря по данным судовых измерений // Труды 9-й Всерос. конф. «Современные проблемы оптики естественных вод». СПб., 2017. С. 149–153.
4. *Кондрик Д., Поздняков Д., Петтерсон Л.* Тенденции в кокколитофоридных цветениях в ряде акваторий Северного полушария по данным спутниковых наблюдений за 1998–2013 гг. // *Исследования Земли из космоса*. 2017. № 2. С. 26–37.
5. *Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В., Шеберстов С.В.* Проблемы индикации кокколитофоридных цветений по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 5. С. 241–250.
6. *Копелевич О.В., Вазюля С.В., Григорьев А.В., Храпко А.Н., Шеберстов С.В., Салинг И.В.* Проникновение солнечной радиации видимого диапазона в воды Баренцева моря в зависимости от облачности и кокколитофоридных цветений // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 3. С. 445–453.
7. *Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Вазюля С.В., Салинг И.В., Буренков В.И.* Сравнительные оценки характеристик кокколитофоридных цветений в Баренцевом и Черном морях по данным спутниковых сканеров цвета // Труды 8-й Международной конф. «Современные проблемы оптики естественных вод». СПб., 2015. С. 31–35.
8. *Ли М.Е., Шибанов Е.Б., Мартынов О.В., Корчелкина Е.Н.* Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // *Морской гидрофиз. журн.* 2015. Т. 186. № 6. С. 17–33.
9. *Girardeau J., Hulot V., Hanquiez V., Devaux L., Howa H., Garlan Th.* A survey of the summer coccolithophore community in the western Barents Sea // *J. Marine System*. 2016. Vol. 158. P. 93–105.
10. *Hovland E.K., Hancke K., Alver M.O., Drinkwater K., Hokendal J., Jonsen G., Moline M., Sakshaug E.* Optical impact of an *Emiliana huxleyi* bloom in the frontal region of the Barents Sea // *J. Marine Systems*. 2014. Vol. 130. P. 228–240.
11. *Voss K.J., Balch W.M., Kilpatrick K.A.* Scattering and attenuation properties of *Emiliana huxleyi* cells and their detached coccoliths // *Limnology and Oceanography*. 1998. Vol. 43, No. 5. P. 870–876.

# Prospects for improving the accuracy of estimates of the parameters of coccolithophore blooms in the Barents Sea from satellite data

O.V. Kopelevich<sup>1</sup>, P.G. Karalli<sup>1,2</sup>, A.S. Lokhov<sup>1</sup>, I.V. Sahling<sup>1</sup>, S.V. Sheberstov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: oleg@ocean.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (State University)  
Moscow region, Dolgoprudnyi, Russia

In the previously proposed algorithm (Kopelevich et al., 2012), the concentration of coccolithophore cells  $N_{coc}$  during the coccolithophore blooms (CB) in the Barents Sea is estimated through the values of the particle backscattering coefficient  $b_{bp}$  derived from satellite data. It is assumed that the  $b_{bp}$  values are entirely determined by plated cells and detached coccoliths; the accepted values of specific backscattering coefficients for cells and coccoliths were taken from Voss et al. (1998). The K factor for relationship between  $N_{coc}$  and  $b_{bp}$  depends on the ratio of the number of detached coccoliths to the number of plated cells and can be varied several times. In the work presented, quantitative estimates of changes in the K factor are made by using data of the direct measurements 2014–2016. According to the estimates, the value of K depends on the age of the blooms — the mean K value for the blooms observed until mid-August is equal to 145, later — 65. The monthly means of  $N_{coc}$  and of the concentration of particulate inorganic carbon PIC (standard product of NASA), derived from satellite data for July, August and September 1998–2016, were compared. The correlation between them proved to be quite close.

Analysis of measurements of particles size in the sea water by means of the Coulter counter in the Barents Sea expedition in July–August 2017 showed the maxima near 5  $\mu\text{m}$  clearly visible on the numerical distributions in the presence of coccolithophore blooms, they are not observed in the absence of the blooms. A close correlation was found between the particle concentration in the fractions of 2–5  $\mu\text{m}$  and 5–10  $\mu\text{m}$  and the  $b_{bp}$  values derived from the measurement data by a floating spectroradiometer. These results indicate a good consistency of data and opportunities for using the Coulter counter data to assess the effect of cell size changes and the “non-coccolithophore” contribution to the  $b_{bp}$  values from terrigenous particles and phytoplankton cells of other species.

**Keywords:** coccolithophore blooms, Barents Sea, satellite data, biooptical algorithm, analysis of the acting factors, improving the accuracy

Accepted: 13.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-267-279

## References

1. Artemiev V.A., Burenkov V.I., Vortman M.I., Grigoriev A.V., Kopelevich O.V., Khrapko A.N., Sea-truth measurements of ocean color: a new floating spectroradiometer and its metrology, *Oceanology*, 2000, Vol. 40, No. 1, pp. 139–145.
2. Burenkov V.I., Ershova S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Shevchenko V.P., An estimate of the distribution of suspended matter in the Barents Sea waters on the basis of the SeaWiFS satellite ocean color scanner, *Oceanology*, 2001, Vol. 41, No. 5, pp. 622–628.
3. Karalli P.G., Validatsiya sputnikovykh otsenok bioopticheskikh parametrov poverkhnostnykh vod Barentseva morya po dannym sudovykh izmerenii (Validation of satellite estimates of biooptical parameters of the surface waters of the Barents sea according to ship measurements), *Trudy IX Vserossiiskoi konferentsii “Sovremennye problemy optiki estestvennykh vod”* (Proc. 9<sup>th</sup> All-Russia Conference “Current Problems on Optics of Natural Waters”), Saint Petersburg, 2017, pp. 149–153.
4. Kondrik D., Pozdnyakov D., Petterson L., Tendentsii v kokkolitoforidnykh tsvetenyakh v ryade akvatorii Severnogo polushariya po dannym sputnikovykh nablyudenii za 1998–2013 gg. (Trends in coccolithophore blooms in some areas of the Northern hemisphere, according to satellite observations for 1998 to 2013), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 2, pp. 26–37.
5. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Vazyulya S.V., Sheberstov S.V., Problemy indikatsii kokkolitoforidnykh tsveteni po sputnikovym dannym (Problems of detection of coccolithophore blooms from satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 241–250.
6. Kopelevich O.V., Vazyulya S.V., Grigor’ev A.V., Khrapko A.N., Sheberstov S.V., Sahling I.V., Penetration of Visible Solar Radiation into Waters of the Barents Sea Depending on Cloudiness and Coccolithophore Blooms, *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No 3, pp. 402–409.
7. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V., Saling I.V., Burenkov V.I., Sravnitel’nye otsenki kharakteristik kokkolitoforidnykh tsveteni v Barentsevom i Chernom moryakh po dannym sputnikovykh skanerov tsвета (Electronic atlas “Biooptical characteristics of the Russian Seas from satellite ocean color data of 1998–2014”), *Trudy VIII Vserossiiskoi konferentsii “Sovremennye problemy optiki estestvennykh vod”* (Proc. 8<sup>th</sup> All-Russia Conference “Current Problems on Optics of Natural Waters”), Saint Petersburg, 2015, pp. 31–35.

8. Li M.E., Shibanov E.B., Martynov O.V., Korchemkina E.N., Opredelenie kontsentratsii primesei v morskoi vode po spektru yarkosti voskhodyashchego izlucheniya (Determination of the impurities concentration in the sea water on the range of the rising radiation brightness), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2015, Vol. 186, No. 6, pp. 17–33.
9. Giraudeau J., Hulot V., Hanquiez V., Devaux L., Howa H., Garlan Th., A survey of the summer coccolithophore community in the western Barents Sea (Retrieval of seawater components' concentration from upwelling radiation spectrum), *J. Marine System*, 2016, Vol. 158, pp. 93–105.
10. Hovland E.K., Hancke K., Alver M.O., Drinkwater K., Hokendal J., Jonsen G., Moline M., Sakshaug E., Optical impact of an *Emiliana huxleyi* bloom in the frontal region of the Barents Sea, *J. Marine Systems*, 2014, Vol. 130, pp. 228–240.
11. Voss K.J., Balch W.M., Kilpatrick K.A., Scattering and attenuation properties of *Emiliana huxleyi* cells and their detached coccoliths, *Limnology and Oceanography*, 1998, Vol. 43, No. 5, pp. 870–876.