

УДК 551.463.5

© П. Г. Каралли^{1,2}, О. В. Копелевич¹, И. В. Салинг¹, С. В. Шеберстов¹, Л. А. Паутова¹, В. А. Силкин¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Россия
e-mail:

ВАЛИДАЦИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ КОККОЛИТОФОРИДНЫХ ЦВЕТЕНИЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Статья поступила в редакцию 26.04.2018, после доработки 26.07.2018.

Представлены результаты валидации параметров кокколитофоридных цветений, рассчитанных по данным спутниковых наблюдений и натурных измерений спектрального коэффициента яркости моря R_{rs} в экспедициях ИО РАН в Баренцевом море в 2016 и 2017 гг. Основные рассматриваемые параметры — концентрация клеток кокколитофорид N_{coc} , рассчитанная по региональному алгоритму ИО РАН, и концентрация взвешенного неорганического углерода PIC, стандартный продукт НАСА. Оба параметра рассчитываются через показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} . Выполненная валидация включала, во-первых, оценку ошибок атмосферной коррекции путем сопоставления значений R_{rs} , рассчитанных по спутниковым данным и данным судового спектро-радиометра. Во-вторых, — валидацию «дистанционных» значений показателя b_{bp} и концентрации N_{coc} , используя данные прямых определений концентраций клеток кокколитофорид и отделившихся кокколитов на отобранных пробах морской воды. В-третьих, сопоставление рассчитанных значений N_{coc} и PIC. Результаты работы показывают, что при благоприятных погодных условиях по спутниковым данным можно получать приемлемые оценки концентрации N_{coc} ; для улучшения точности необходимо учитывать особенности изменчивости характеристик фитопланктона. Получено уравнение регрессии для связи между среднемесячными значениями N_{coc} и PIC для июля-августа с коэффициентом детерминации 0.82 и относительной ошибкой 18 % для расчета PIC через N_{coc} .

Ключевые слова: дистанционные методы, Баренцево море, кокколитофоридное цветение, биооптические характеристики, оценка ошибок.

P. G. Karalli^{1,2}, O. V. Kopelevich¹, I. V. Sahling¹, S. V. Sheberstov¹, L. A. Pautova¹, V. A. Silkin¹

¹P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

VALIDATION OF REMOTE SENSING ESTIMATES OF COCCOLITHOPHORE BLOOM PARAMETERS IN THE BARENTS SEA FROM FIELD MEASUREMENTS

Received 26.04.2018, in final form 26.07.2018.

The results of validation of the parameters of coccolithophorid blooms, calculated from satellite observations and field measurements of the spectral radiance reflectance R_{rs} in the expeditions of the IO RAS in the Barents Sea in 2016 and 2017, are presented. The main parameters under consideration are the concentration of coccolithophoride cells, N_{coc} calculated with the regional algorithm of the IO RAS and the concentration of Particulate Inorganic Carbon, PIC, the standard product of NASA. Both parameters are calculated through the particle backscattering coefficient b_{bp} . The performed validation included, first, the estimation of errors in atmospheric correction by comparing the values of R_{rs} from satellite data and from data measured by ship spectroradiometers. Secondly, the validation of "remote sensing" values of the b_{bp} and N_{coc} , using data from direct determination of concentrations of plated cells and detached coccolites. Third, a

Ссылка для цитирования: Каралли П. Г., Копелевич О. В., Салинг И. В., Шеберстов С. В., Паутова Л. А., Силкин В. А. Валидация дистанционных оценок параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море по данным натурных измерений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 55—63.

For citation: Karalli P. G., Kopelevich O. V., Sahling I. V., Sheberstov S. V., Pautova L. A., Silkin V. A. Validation of remote sensing estimates of coccolithophore bloom parameters in the Barents Sea from field measurements. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 3, 55—63.

doi: 10.7868/S2073667318030073

comparison of calculated values of N_{coc} and PIC. The obtained results showed that, under favorable weather conditions, it is possible to obtain acceptable estimates of the N_{coc} from satellite data. To improve accuracy, it is necessary to take into account the features of phytoplankton variability.

Key words: remote sensing, Barents Sea, coccolithophore bloom, bio-optical parameters, error estimation.

Кокколитофоридные цветения (КЦ), занимающие площади в десятки и даже сотни тысяч км² во многих морях и океанах, относятся к числу климатически значимых явлений, их исследованию по-прежнему уделяется большое внимание, в том числе в Баренцевом море. В ссылках [1—6] на публикации последних лет заинтересованный читатель найдет ссылки на многочисленные предшествующие работы.

Важнейшую роль в исследовании КЦ играют спутниковые наблюдения со сканеров цвета, причем для оценки климатически важных проявлений КЦ (влияние на баланс CO₂ в системе атмосфера-океан, увеличение альбеда водной толщи [3]) по спутниковым данным требуется определять количественные параметры КЦ, а не только их относительные изменения.

Основные количественные характеристики цветений, рассчитываемые по спутниковым данным, — это концентрация взвешенного неорганического углерода (*Particulate Inorganic Carbon* — PIC) — стандартный продукт, доступный на сайте НАСА (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), и концентрация клеток кокколитофорид N_{coc} [3—4]. В данной работе последняя величина рассчитывается с помощью регионального алгоритма ИО РАН, предложенного в [7]. Как PIC, так и N_{coc} рассчитываются по значениям показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} , в предположении, что эти значения целиком определяются клетками кокколитофорид и отделившимися кокколитами, а «некокколитофоридный» вклад в b_{bp} пренебрежимо мал. Показатель b_{bp} рассчитывается по спутниковым данным: соответствующий алгоритм ИО РАН описан в [8], описание алгоритма НАСА можно найти на сайте (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>).

Количественные расчеты параметров КЦ по данным дистанционных определений должны сопровождаться оценками точности полученных результатов. Сделать такие оценки можно только посредством прямого сопоставления рассчитанных значений с данными натурных измерений, так как теоретические оценки связаны с трудностями учета совокупности многих изменяющихся факторов.

В работе [4] по данным натурных определений биооптических характеристик и параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море в 2014—2016 гг. выполнены оценки изменений количественной связи между показателем b_{bp} и N_{coc} (см. формулу (3)). Исследования показали, что коэффициент связи K между N_{coc} и b_{bp} зависит от возраста популяции; его среднее значение примерно до середины августа равно 145 и лишь позже уменьшается до значения 66, принятого в алгоритме [7]. В настоящей работе рассматриваются не только ошибки биооптического алгоритма оценки N_{coc} через b_{bp} , но и ошибки атмосферной коррекции исходных спутниковых данных, а также проводится сопоставление различных методов оценки показателя b_{bp} .

Используемые данные, подходы и методы. Используемые данные были получены в 65-м и 68-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш»; измерения в Баренцевом море проводились 5—7.07.2016 г. [9] и 23.07—16.08.2017 г. [10].

На рис. 1 показано расположение точек отбора проб на ходу судна и дрейфовых станций в экспедициях 2014—2017 гг. Как видно, большая часть точек получения данных относится к 68-му рейсу «АМК» 2017 г.

В 65-м рейсе «АМК» 2016 г. исследования выполнялись в основном в режиме отбора проб воды на ходу судна, а также посредством дистанционных, в частности, спутниковых измерений; только в конце экспедиции в районе интенсивных кокколитофоридных цветений в Баренцевом море удалось выполнить три дрейфовые станции 6533—6535 [9]. На протяжении всего рейса на ходу судна и на дрейфовых станциях измерялся спектральный коэффициент яркости поверхности моря и отдельно его часть, обусловленная излучением, отраженным от поверхности. Измерения проводились с помощью палубного спектрорадиометра, разработанного в Морском гидрофизическом институте (МГИ), г. Севастополь [11].

Отобранные пробы воды использовались для измерений показателей ослабления и поглощения света, спектров флуоресценции посредством лабораторных приборов, гидрохимических определений;

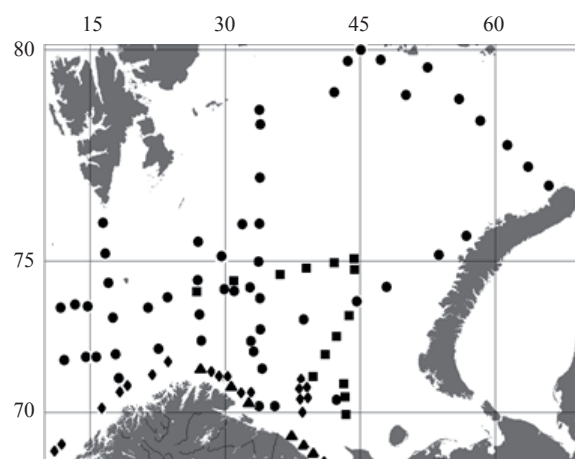


Рис. 1. Расположение точек отбора проб на ходу судна и дрейфовых станций, выполненных в Баренцевом море в экспедициях ИО РАН в 2014—2017 гг. Треугольники — 127-й рейс НИС «Профессор Штокман», 2014 г.; квадраты — 62-й, 2015 г., ромбы — 65-й, 2016 г.; кружки — 68-й, 2017 г. рейсы НИС «Академик Мстислав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

Fig. 1. Location of sampling points on the way of the ship and drift stations in the Barents Sea in expeditions of the IO RAS in 2014—2017.

Triangles — 127th voyage of the R/V *Professor Shtokman*, 2014; squares — 62nd, 2015, diamonds — 65th, 2016; circles — the 68th, 2017 voyage of the R/V *Akademik Mstislav Keldysh*.

часть проб консервировалась для определения концентрации хлорофилла и взвеси, количественного и видового состава фитопланктона в береговых лабораториях [10].

Большой комплекс оптических и сопутствующих измерений на ходу судна и на дрейфовых станциях был выполнен в 68-м рейсе «АМК» 2017 г. [10]. Для определения коэффициента яркости водной толщи использовался плавающий спектрорадиометр, который на дрейфовых станциях измерял спектральную облученность поверхности моря и спектральную яркость восходящего излучения непосредственно под поверхностью. Измерения проводились на расстоянии нескольких десятков метров от судна, чтобы исключить влияние на измерение корпуса судна [12].

Валидация значений спектрального коэффициента яркости моря, рассчитанных по спутниковым данным. Эта валидация проводилась путем сопоставления значений R_{rs} , рассчитанных по спутниковым данным, и данных судового спектрорадиометра и дала возможность оценить ошибки атмосферной коррекции. Спутниковые данные скачивались с сайта NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), в основном данные сканера MODIS-Aqua (также MODIS-Terra и VIIRS). К сожалению, возможность использования таких данных в Баренцевом море часто была ограничена облачными условиями. При отсутствии облачности, для сопоставления с данными натурных измерений использовались данные 2-го уровня для коэффициента яркости моря (“remote sensing reflectance”) $R_{rs}(\lambda) = L(\lambda, 0^+)/E_d(\lambda, 0^+)$, где $L(\lambda, 0^+)$ — спектральная яркость в надир излучения, вышедшего из-под поверхности, $E_d(\lambda, 0^+)$ — спектральная облученность моря.

Для проведения сопоставления такая же величина рассчитывалась по данным судовых измерений. Для данных измерений палубным спектрорадиометром в 2016 г. по специальной методике вводилась поправка на излучение, отраженное от поверхности [11]. Для данных измерений плавающим спектро-радиометром в 2017 г. измеренный коэффициент яркости водной толщи $\rho(\lambda)$ пересчитывался в $R_{rs}(\lambda)$ по формуле [13]:

$$R_{rs}(\lambda) = 0.165 \cdot \rho(\lambda) / [1 - 0.497 \cdot \rho(\lambda)].$$

Результаты сопоставления для двух станций в 2016 г. показаны на рис. 2. В табл. 1 представлены данные для 2016 и 2017 гг. о координатах станций и времени судовых измерений и пролетов спутников. Спутниковые значения рассчитывались как средние по 9 пикселям вокруг станции (не менее 5 значащих пикселей).

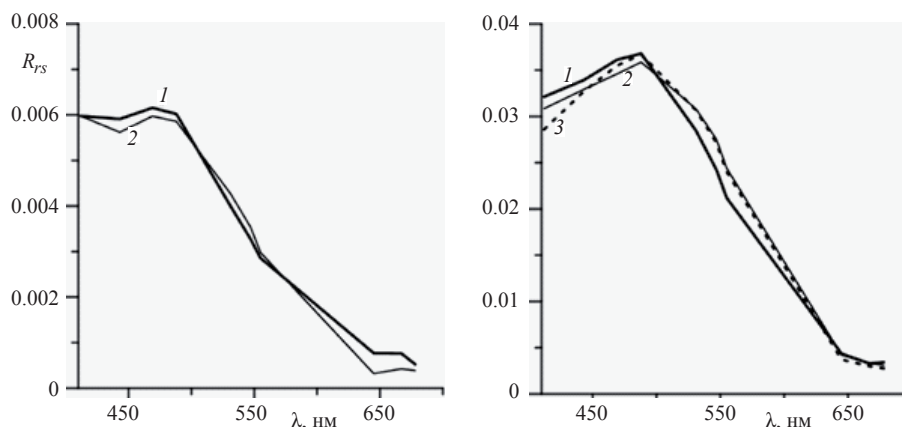


Рис. 2. Сопоставление данных спутниковых измерений спектрального коэффициента яркости моря $R_{rs}(\lambda)$ с данными судовых измерений палубным спектрометриком на двух станциях в Баренцевом море: ст. 6527 (а) вне зоны цветения, ст. 6531 (б) — в зоне.
Кривые 1 — измерения палубным спектрометриком, кривые 2 — данные сканера MODIS-Aqua, кривые 3 — MODIS-Terra.

Fig. 2. Comparison of values of the spectral remote sensing reflectance $R_{rs}(\lambda)$ from satellite and ship measurements at two stations in the Barents Sea: st. 6527 (a) outside the blooming zone, st. 6531 (b) — in the zone.
The curves 1 — the data from a deck spectroradiometer; 2 — MODIS-Aqua; 3 — MODIS-Terra.

Таблица 1

Координаты станций, время судовых измерений и пролетов спутников в 2016 и 2017 гг.

Coordinates, times of the ship measurements and satellites overpasses in 2016 and 2017

№ станции		Дата и время пролета спутника		Дата и время судовых измерений		Широта, с.ш. и долгота, в.д	
2016 г.							
6527		06.07.2016, 08:20		06.07.2016, 06:59		71.46, 28.23	
6531	MODIS-Aqua	06.07.2016, 11:15		07.07.2016, 06:58		70.84, 38.96	
	MODIS-Terra	06.07.2016, 11:20					
2017 г.							
5576		14.08.2017, 09:35		14.08.2017, 06:02		72.46, 32.75	
5577		14.08.2017, 10:55		14.08.2017, 11:10		72.21, 33.08	
5580	MODIS-Aqua	14.08.2017, 11:15		15.08.2017, 12:15		70.23, 35.45	
		16.08.2017, 09:23, 11:02					
	MODIS-Terra	14.08.2017, 10:55					
		16.08.2017, 09:05, 10:45, 12:20					
	VIIRS	14.08.2017, 10:44					
		15.08.2017, 05:24					
		16.08.2017, 10:06 и 11:48					

Представленные на рис. 2 результаты показывают хорошее соответствие между спутниковыми и судовыми значениями $R_{rs}(\lambda)$, несмотря на то, что для ст. 6531 разница во времени между судовыми и спутниковыми измерениями составила около суток. Это можно объяснить стабильностью как кокколи-тофоридных цветений, так и условий наблюдения. Для MODIS-Aqua максимальные различия с судовыми значениями $R_{rs}(\lambda)$ не превышают 0.002, относительное расхождение — в пределах 10 %. На ст. 6527, где цветение отсутствовало, и значения $R_{rs}(\lambda)$ в максимуме были примерно в 6 раз ниже, чем на ст. 6531, различие между судовыми и спутниковыми значениями почти во всем спектральном диапазоне не превышало 0.0003 и лишь вблизи 650 нм возросло до 0.0004.

Результаты сопоставления для трех станций в 2017 г. показаны на рис. 3.

В 2017 г. условия для спутниковых наблюдений были гораздо хуже, чем в 2016 г.: на протяжении большей части экспедиции получению спутниковых данных препятствовала сплошная облачность, и только в конце рейса появились «окна», благодаря которым удалось получить представление о расположении КЦ и провести там комплексные исследования. На рис. 4 (см. вклейку) видно, что и на завершающем этапе экспедиции большая часть района исследований закрыта облачностью; по данным судовых измерений КЦ наблюдались и к северо-западу от показанного района, непосредственно у южной границы Полярного фронта [10].

Рис. 4 показывает, что спутниковые данные для ст. 5576 и 5577 фактически «точечные», т. к. станции окружены облаками; в таких условиях расхождение кривых $R_{rs}(\lambda)$ на рис. 3, а, вероятнее всего связано с 3.5-часовой разницей во времени между судовыми и спутниковыми измерениями и ошибками атмосферной коррекции (табл. 1). Для станции 5580 пролеты спутников значительно различались во времени, тем не менее, наблюдается хорошее совпадение спутниковых кривых $R_{rs}(\lambda)$ и удовлетворительное согласие с судовыми измерениями. Это дает основание предполагать стабильность цветения на данной станции.

Валидация «дистанционных» значений показателя b_{bp} и концентрации N_{coc} по данным натурных измерений. Значения показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} , в рейсе непосредственно не измерялись, поэтому рассчитанные по данным дистанционных измерений значения b_{bp} и N_{coc} сопоставлялись с величинами, рассчитанными через значения концентраций клеток кокколитофорид и отделившихся кокколитов, непосредственно измеренные на отобранных пробах (эти определения проводились Л. А. Паутовой по стандартной методике [14]).

Показатель b_{bp} рассчитывался по формуле [7]:

$$b_{bp} = b_{coc} \cdot N_{coc} + b_{bc} \cdot N_c, \quad (1)$$

где N_{coc} — концентрация клеток кокколитофорид, N_c — концентрация кокколитов, b_{coc} — коэффициент рассеяния клетки, равный $6.6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, b_{bc} — коэффициент рассеяния кокколита, равный $1.6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ [15]. Результаты расчетов показаны в табл. 2.

В табл. 2 обращают на себя внимание большие различия между значениями b_{bp} , рассчитанными по (1) и по данным дистанционных измерений для 6530—6533 в 2016 г. (на ст. 6528 не стоит обращать внимание, там фактически не было цветения — см. табл. 3) и ст. 5576 в 2017 г., а также «спутникового» значения от «судового» для ст. 5581. В последнем случае различие, по-видимому, связано с плохими условиями спутниковых наблюдений, а для ст. 5576 как спутниковых, так и судовых измерений — на этой станции скорость ветра достигала 14 м/с, зыбь 3—4 балла. В 2016 г. наиболее вероятная причина — отличие реальных значений коэффициентов рассеяния клеток кокколитофорид и кокколитов от принятых в (1) значений, связанное с тем, что размеры клеток кокколитофорид в 2016 г. оказались меньше, чем в прошлые годы (возможно, по причине раннего цветения).

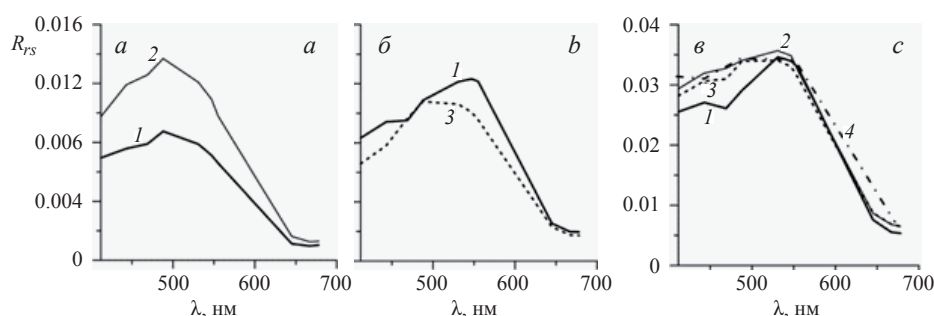


Рис. 3. Сопоставление данных спутниковых измерений спектрального коэффициента яркости моря $R_{rs}(\lambda)$ с данными судовых измерений плавающим спектрорадиометром (кривые 1) на трех станциях в Баренцевом море: ст. 5576 (а), ст. 5577 (б) и ст. 5580 (в). Кривые 2 — данные сканера MODIS-Aqua, 3 — MODIS-Terra, 4 — VIIRS.

Fig. 3. Comparison of data of values of the spectral remote sensing reflectance $R_{rs}(\lambda)$ from satellite and ship measurements (the curves 1) at three stations in the Barents Sea: st. 5576 (a), st. 5577 (b) and st. 5580 (c). The curves 2 are given by MODIS-Aqua, 3 — MODIS-Terra, 4 — VIIRS.

Сравнение значений b_{bp} , рассчитанных разными способами
(в скобках даны отклонения, % от данных судового спектрорадиометра)

Comparison between the values of b_{bp} calculated in different ways
(deviations (%) from the data of the ship spectroradiometer are given in brackets)

№ станции	Дата	b_{bp} , м ⁻¹		
		Данные судового спектрорадиометра	Спутниковые данные	Рассчитанные по формуле (1)
2016 г.				
6527	06.07	0.0040	0.0041 (+2.5 %)	0.0042 (+5 %)
6528	06.07	0.0045	0.0038 (−15.6 %)	0.0018 (−60 %)
6530	07.07	0.0304	0.0300 (−1.3 %)	0.0556 (+83 %)
6531	07.07	0.0258	0.0322 (+24.8 %)	0.0832 (+222 %)
6532	07.07	0.0118	0.0130 (+10.2 %)	0.0286 (+142 %)
6533	07.07	0.0196	0.0104 (−47 %)	0.0350 (+78.5 %)
2017 г.				
5548	01.08	0.0069	—	0.0081 (+17.4 %)
5550	02.08	0.0170	—	0.0131 (−23 %)
5574	13.08	0.0101	—	0.0093 (−8 %)
5576	14.08	0.0112	0.0167 (+49.1 %)	0.0420 (+275 %)
5577	14.08	0.0269	0.0180 (−33.1 %)	0.0283 (+5.2 %)
5578	14.08	—	0.0186	0.0200
5579	15.08	—	0.0306	0.0226
5580	15.08	0.0478	0.0480 (−1.5 %)	0.0566 (+18.4 %)
5581	16.08	0.0074	0.0220 (+197 %)	0.0111 (+50 %)

Валидация «дистанционных» значений концентрации N_{coc} . Формула для расчета концентрации клеток кокколитофорид N_{coc} , предложенная в [7], имеет вид:

$$N_{coc} = 152 \cdot b_{coc} / (1 + 0.024\alpha) = K \cdot b_{bp}, \quad (2)$$

где параметр α равен отношению N_c/N_{coc} числа отделившихся кокколитофоровидов (*plated cells*) N_{coc} . Как отмечалось выше, значение K , предложенное в [7], равнялось 66; в [4] было показано, что примерно до середины августа лучше подходит значение K , равное 145. Ниже рассматриваются результаты оценок по (2) с обоими значениями K с использованием как судовых, так и спутниковых значений b_{bp} .

Как видно из табл. 3, практически для всех станций рассчитанные значения N_{coc} лучше совпадают с данными прямых определений, если использовать коэффициент $K = 145$. Исключение составляют станции 6528 в 2016 г. и 5550 в 2017 г. Первая из них уже упоминалась выше; на второй, как видно из табл. 3, оценки N_{coc} при использовании $K = 145$ оказываются завышенными примерно в 2.2 раза. Возможное объяснение в том, что на этой станции доминировали динофлагелляты, составлявшие 66 % по биомассе; алгоритм же «приписывал» их вклад в показатель b_{bp} кокколитофоридам.

Для цветения 2016 г. наш алгоритм дает заниженные значения N_{coc} ; причина этого уже указывалась выше — отличие реальных значений коэффициентов рассеяния клеток кокколитофорид и кокколитофоровидов от принятых в (1) значений, связанное с меньшими размерами клеток кокколитофорид в 2016 г. В 2017 г. для всех станций, кроме 5576 и уже отмеченной выше ст. 5550, совпадение значений N_{coc} , рассчитанных по данным плавающего спектрорадиометра, с данными прямых определений очень хорошее. Причина заниженных значений N_{coc} для ст. 5576 пока неясна.

Сопоставление рассчитанных значений N_{coc} и РИС. Как указывалось выше, стандартный продукт NASA — концентрация взвешенного неорганического углерода РИС. Предполагается, что РИС содержится

Таблица 3

Сравнение значений N_{coc} по данным дистанционных оценок и прямым определениямComparison between the N_{coc} values estimated from remote sensing data and by direct determination

№ станции	Дата	$N_{\text{сос}}$, млн.кл./л			
		Спутниковые данные	Данные судового спектрорадиометра		Данные прямых определений
			$K = 66$	$K = 145$	
2016 г.					
6527	06.07	0.27	0.26	0.58	0.61
6528	06.07	0.25	0.30	0.65	0.17
6530	07.07	1.98	2.01	4.41	7.51
6531	07.07	2.13	1.70	3.74	12.0
6532	07.07	0.86	0.78	1.71	4.15
6533	07.07	0.69	1.29	2.84	5.09
2017 г.					
5548	01.08	—	0.45	1.00	1.10
5550	02.08	—	1.13	2.47	1.10
5574	13.08	—	0.67	1.46	1.37
5576	14.08	2.43	0.74	1.62	6.31
5577	14.08	2.61	1.78	3.90	4.11
5578	14.08	2.70	—	—	3.02
5579	15.08	4.44	—	—	3.11
5580	15.08	5.03	3.16	6.93	6.96
5581	16.08	3.18	0.49	1.08	1.55

только в кокколитах, и его значение менее зависимо от соотношения между числом целых клеток (*plated cells*) и отделившихся кокколитов (*detached coccoliths*), а также от изменения размеров клеток. Нами было выполнено сопоставление значений РИС, представленных на сайте НАСА; рассчитанных по нашим значениям b_{bp} , вычисленных по данным судового радиометра и спутниковым данным, с использованием коэффициента удельного рассеяния кальцита $1.628 \text{ м}^2/\text{моль}$, указанным на сайте НАСА (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>); по данным прямых определений концентрации клеток кокколитофорид и отделившихся кокколитов. В последнем случае использовались данные [5] для Баренцева моря — масса одного кокколита $2.3 \cdot 10^{-12} \text{ г}$, 20 кокколитов на 1 клетку. Для сопоставления с данными НАСА сначала рассчитывалась весовая концентрация РИС, мгС/л по формуле:

$$\text{РИС} = 0.276 \cdot (20 \cdot N_{coc} + N_c) \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где N_{coc} , млн кл/л; N_c , млн шт/л. Полученные значения затем пересчитывались в мольС/м³ (табл. 4).

Как видно из табл. 4, представленные данные могут значительно расходиться, что связано и с различием используемых алгоритмов, и, в случае плохих погодных условий, с плохим качеством исходных данных. Однако для спутниковых среднемесячных значений РИС и N_{coc} , рассчитанных по площади цветений (ограниченной изолинией 0.5 млн кл/л) удалось выявить достаточно тесную корреляционную связь (расчеты были выполнены для июля, августа и сентября за период 1998—2016 гг.). Установление такой связи важно, так как, во-первых, показывает согласованность спутниковых оценок параметров кокколитофоридных цветений, полученных для Баренцева моря разными алгоритмами, а во-вторых, дает возможность выполнять приближенные оценки одной из вышеуказанных величин через значения другой.

На рис. 5 показана линия регрессии, рассчитанной между среднемесячными значениями РИС и N_{coc} за указанный период ($n = 38$) для объединенной выборки июль + август. Как видно, корреляция между значениями РИС и N_{coc} довольно высокая: коэффициент детерминации R^2 равен 0.82.

Значения PIC, мольС/м³, рассчитанные разными способами

PIC values calculated in different ways

№ станции	Дата	Данные с сайта НАСА	Расчеты по алгоритму НАСА		Расчет по формуле (3)	
			по данным судового спектрорадиометра	по спутниковым данным	мольС/м³	мгС/л
2016 г.						
6527	06.07	0.0005	0.0025	0.0025	0.0002	0.002
6528	06.07	0.0004	0.0028	0.0023	0.0000	0.001
6530	07.07	0.0104	0.0187	0.0184	0.0025	0.030
6531	07.07	0.0107	0.0158	0.0198	0.0034	0.041
6532	07.07	0.0088	0.0072	0.0080	0.0012	0.014
6533	07.07	0.0026	0.0120	0.0064	0.0014	0.017
2017 г.						
5548	01.08	—	0.0042	—	0.0006	0.0076
5550	02.08	—	0.0104	—	0.0013	0.0162
5574	13.08	—	0.0062	—	0.0007	0.0080
5576	14.08	0.0042	0.0069	0.0103	0.0030	0.035
5577	14.08	0.0049	0.0165	0.0111	0.0021	0.0274
5578	14.08	0.0050	—	0.0115	0.0014	0.0169
5579	15.08	0.0092	—	0.0188	0.0017	0.0207
5580	15.08	—	0.0294	0.0295	0.0057	0.068
5581	16.08	0.0059	0.0045	0.0135	0.0008	0.010

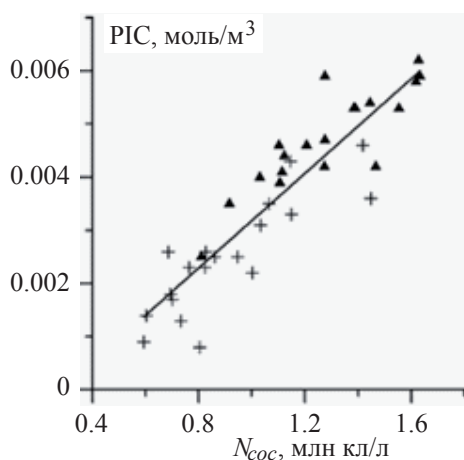


Рис. 5. Линия регрессии между среднемесячными значениями PIC и N_{coc} за период 1998—2016 г. для объединенной выборки июль—август, рассчитанная по данным спутниковых сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua, где крестики — выборка за июль, треугольники — за август.

Fig. 5. The regression line between the average monthly PIC and N_{coc} values for the period 1998—2016 for the combined data set July—August, calculated from the data of the SeaWiFS and MODIS-Aqua satellite scanners, where crosses are a sample for July, triangles for August.

Для пересчета в PIC среднемесячных значений N_{coc} для июля и августа (<http://optics.ocean.ru>) использовалась следующая формула:

$$\text{PIC, ммоль/м}^3 = 4.45 N_{coc} - 1.27,$$

где N_{coc} , млн кл./л. Ошибка регрессии для этого уравнения составляет 0.65 ммоль/м³, коэффициент вариации 18 %.

Отношения средних значений $РІС/N_{\text{coc}}$ составляют 39 пгС/кл для июля, 33 — для августа, 44 пгС/кл. — сентября. Если взять значение РІС на один кокколлит, равное 0.276 пг/шт [5], получим, соответственно, 14 кокколлитов на 1 клетку в июле, 19 — в августе, 22 — в сентябре, что по порядку величины соответствует значению 20 кокколлитов на 1 клетку, принятому для Баренцева моря в вышеупомянутой работе. Увеличение числа кокколлитов на 1 клетку в сентябре можно объяснить возрастанием в сентябре числа отделившихся кокколлитов, которые также входят в РІС.

Выполненная валидация, которая включала оценку ошибок атмосферной коррекции и биооптических алгоритмов расчета параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море, показала, что при благоприятных погодных условиях по спутниковым данным можно получать приемлемые оценки концентрации клеток кокколитофорид N_{coc} .

Для улучшения точности необходимо учитывать особенности изменчивости характеристик фито-планктона, в частности изменение отношения числа отделившихся кокколлитов к числу целых клеток, возможного изменения размера клеток, наличие других видов фитопланктона.

Показана достаточно тесная корреляционная связь между среднемесячными значениями концентраций клеток N_{coc} и взвешенного неорганического углерода РІС для июля-августа с коэффициентом детерминации 0.82. Рассчитано уравнение регрессии для расчета РІС через N_{coc} с относительной ошибкой 18 %.

Результаты исследований в 68-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» получены в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0002). Остальные результаты за счет средств РНФ (проект № 14-50-00095). Авторы выражают признательность зав. отделом оптики и биофизики моря МГИ РАН (Севастополь) проф. М. Е. Ли за предоставленную возможность использовать палубный спектрофотометр МГИ в 65-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Литература

1. Neukermans G., Oziel L., Babin M. Increased intrusion of warming Atlantic water leads to rapid expansion of temperate phytoplankton in the Arctic // *Glob Change Biol.* 2018. С. 1—9. <https://doi.org/10.1111/gcb.14075> (дата обращения: 24.04.18).
2. 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.
3. 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. DOI: 10.7868/S0030157417020095.
4. Копелевич О. В., Каралли П. Г., Лохов А. С., Салинг И. В., Шеберстов С. В. Перспективы улучшения точности оценки параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2017. № 7. С. 267—279.
5. Giraudeau 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.
6. 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.
7. 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.
8. Буренков В. И., Еришова С. В., Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Шевченко В. П. Оценка пространственного распределения взвеси в водах Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS // *Океанология.* 2001. Т. 41, № 5. С. 653—659.
9. Копелевич О. В., Артемьев В. А. Сравнение биооптических характеристик Балтийского, Норвежского и Баренцева морей — лето 2016 г. (65-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // *Океанология.* 2017. Т. 57, № 2. С. 374—376.
10. Копелевич О. В., Артемьев В. А., Глуховец Д. И., Муравья В. О., Салинг И. В., Вазюля С. В., Шеберстов С. В. Оценка биогеохимических характеристик поверхностного слоя вод Баренцева моря летом 2017 г. по оптическим данным // *Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии.* Москва: ИО РАН. 2017. Т. IV. С. 87—91.
11. Ли М. Е., Шибанов Е. Б., Мартынов О. В., Корчемкина Е. Н. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // *Морской гидрофизический журнал.* 2015. Т. 186, № 6. С. 17—33.
12. Артемьев 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.
13. Lee Z., Carder K. L., Mobley C. D., Steward R. G., Patch J. S. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. No. 27. P. 6329-6338.
14. Микаэлян А. С., Силкин В. А., Паутова Л. А. Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // *Океанология.* 2011. Т. 51, № 1. С. 45—53.
15. 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. V. 43, № 5. P. 870—876.

К статье Каралли П. Г. и др. Валидация дистанционных оценок...

Karalli P. G. et al. Validation of remote sensing estimates...

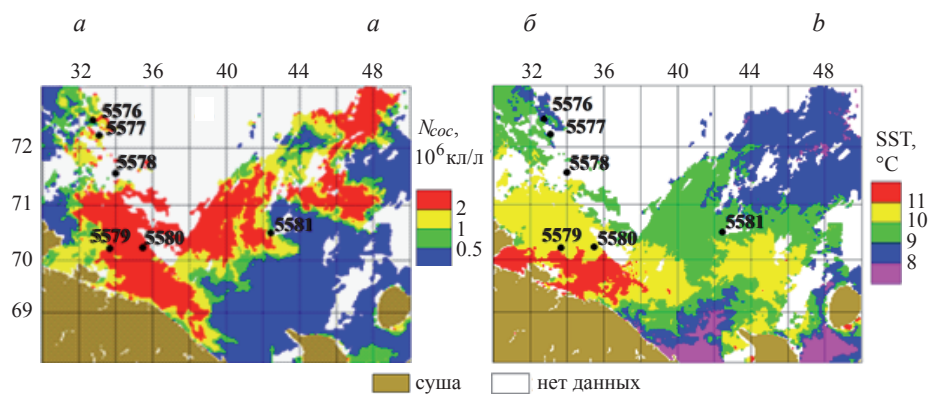


Рис. 4. Пространственные распределения концентрации клеток кокколитофорид (а) и температуры поверхности моря (б) по спутниковым данным, осредненным за 14—15 августа 2017 г. [10].

Fig. 4. Spatial distributions of concentration of coccolithophore cells (a) and sea surface temperature (b) from satellite data averaged over 14—15 Aug 2017 [10].