

Проблемы индикации кокколитофоридных цветений по спутниковым данным

О.В. Копелевич, В.И. Буренков, С.В. Вазюля, С.В. Шеберстов

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИОРАН)
117997, Москва, Нахимовский пр., 36*

E-mail: oleg@ocean.ru

*Российский государственный гидрометеорологический университет
195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98*

Исследуется возможность количественной оценки интенсивности кокколитофоридных цветений (КЦ) в Баренцевом и Черном морях по спутниковым данным. В Черном море главная проблема — влияние речного стока, в Баренцевом море это влияние в районах КЦ отсутствует. Показана возможность использования литературных данных о коэффициентах рассеяния назад кокколитофорид и кокколитов (Voss et al., 1998) для разработки алгоритма в Баренцевом море и предложен основанный на этих данных алгоритм.

Ключевые слова: спутниковые сканеры цвета, кокколитофоридные цветения, Баренцево и Черное моря, моделирование, алгоритмы.

Введение

Кокколитофориды – одноклеточные водоросли, представляющие собой сферические клетки, окруженные дискообразными чешуйками (кокколитами), состоящими из карбоната кальция CaCO_3 . Кокколитофоридные цветения (КЦ) могут охватывать громадные площади в различных океанах и многих морях и оказывать существенное влияние на важные физические и биогеохимические процессы, в частности на обмен CO_2 между океаном и атмосферой, и глобальные климатические изменения. Кокколитофориды и кокколиты отличаются сильным слабоселективным светорассеянием, что делает возможным обнаружение КЦ по данным спутниковых сканеров цвета.

Спутниковые данные стали использоваться для наблюдения кокколитофоридных цветений в Черном море, начиная с данных сканера цвета SeaWiFS (Cokacar et al., 2001), а в Баренцевом море с более ранних данных сканера цвета CZCS и радиометра AVHRR (Smyth et al., 2004) и продолжают использоваться в настоящее время. Несколько работ по этой тематике опубликованы в 2011 г. (Буренков и др., 2011; Карабашев, 2011; Kopelevich et al., 2011), там можно найти ссылки на предыдущие работы. Карты, показывающие среднемесячные распределения показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} , и диаграммы изменения среднемесячных значений b_{bp} в Баренцевом и Черном морях в 1998–2010 гг., на которых проявляются КЦ, можно найти на сайте лаборатории оптики океана ИОРАН [<http://optics.ocean.ru>].

Для Баренцева и Черного морей имеются данные прямых определений содержания кокколитофорид и кокколитов. В этих морях яркость восходящего от поверхности излучения, регистрируемая спутниковыми сканерами цвета, резко возрастает в определенные периоды: в Черном море – в июне, в Баренцевом – в июле – сентябре. В большинстве случаев это связано с КЦ, однако однозначная связь между величиной показателя рассеяния назад

взвешенными частицами b_{bp} , которая рассчитывается по спутниковым данным, и интенсивностью КЦ наблюдается не всегда.

Существующие алгоритмы количественной оценки интенсивности КЦ по спутниковым данным подразделяются на два этапа: на первом рассчитываются значения показателя b_{bp} , на втором – через рассчитанные значения b_{bp} определяются параметры КЦ. Алгоритм, используемый в программном обеспечении SeaDAS [<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>] позволяет рассчитывать концентрацию кальцита CaCO_3 (Gordon, Balch, 1999; Gordon et al., 2001). Этот параметр выбран главным образом потому, что отношение b_{bp}/C_a варьирует не так сильно, как отношение b_{bp}/N_c (где N_c – концентрация кокколитофитов).

Алгоритм, разработанный в ИОРАН для восточной части Черного моря на основе данных судовых измерений яркости выходящего из водной толщи излучения плавающим спеткрорадиометром и прямых определений концентрации кокколитофорид N_{cf} , имеет вид: $N_{cf} = 768b_{bp}^{1.55}$, где N_{cf} в млн кл./л, b_{bp} в м^{-1} ; n – число пар, $n = 48$; r – коэффициент корреляции, $r^2 = 0,54$ (Burenkov et al., 2007).

Очевидный недостаток алгоритма SeaDAS, отмечаемый самими авторами, заключается в том, что не учитывается доля b_{bp} , не связанная с кальцитом; то же касается и алгоритма ИОРАН: величина r^2 равна лишь 0,54, т. е. представленное уравнение регрессии учитывает чуть больше половины суммарной дисперсии N_{cf} . Можно предполагать, что такая слабая корреляция, по крайней мере частично, связана с вариациями вклада «некокколитофоридной» составляющей b_{bp} (см. далее).

Цель настоящей работы — разработка подходов для усовершенствования алгоритмов обработки данных спутниковых сканеров цвета для Баренцевого и Черного морей с целью получения количественных оценок их интенсивности.

1. Используемые данные, методы обработки и анализа

Разработка и верификация алгоритмов количественной оценки КЦ проводились путем совместного анализа данных спутникового сканера MODIS-Aqua [<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>] и судовых измерений, привлекались литературные данные и выполнялись модельные расчеты. Использовались данные 2-го уровня для коэффициента яркости моря (“remote sensing reflectance”) R_{rs} после их пересчета в 2009 и 2010 гг. (из-за изменений в алгоритмах, калибровке датчика и др.) [<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>]. Показатель b_{bp} рассчитывался посредством разработанного ранее алгоритма (Буренков и др., 2001) с использованием в качестве входных параметров значений R_{rs} для 531 и 547 нм (<http://optics.ocean.ru>).

Данные судовых измерений в Баренцевом море были получены только для концентрации фитопланктона (в частности кокколитофорид и кокколитофитов) на поверхностных пробах воды в западной части моря в рейсах в 2004 г. (28 июля – 13 августа) и 2009 г. (25 августа – 21 сентября). По спутниковым данным, из-за облачной погоды, удалось построить только осредненные распределения величины b_{bp} : за период 26 июля – 14 августа 2004 г. и 24 августа – 24 сентября 2009 г. (рис. 1).

Для прямого сопоставления спутниковых и судовых данных удалось отобрать всего 6 точек, для которых разница во времени между судовыми и спутниковыми измерениями не превышала 1...2 сут (табл. 1).

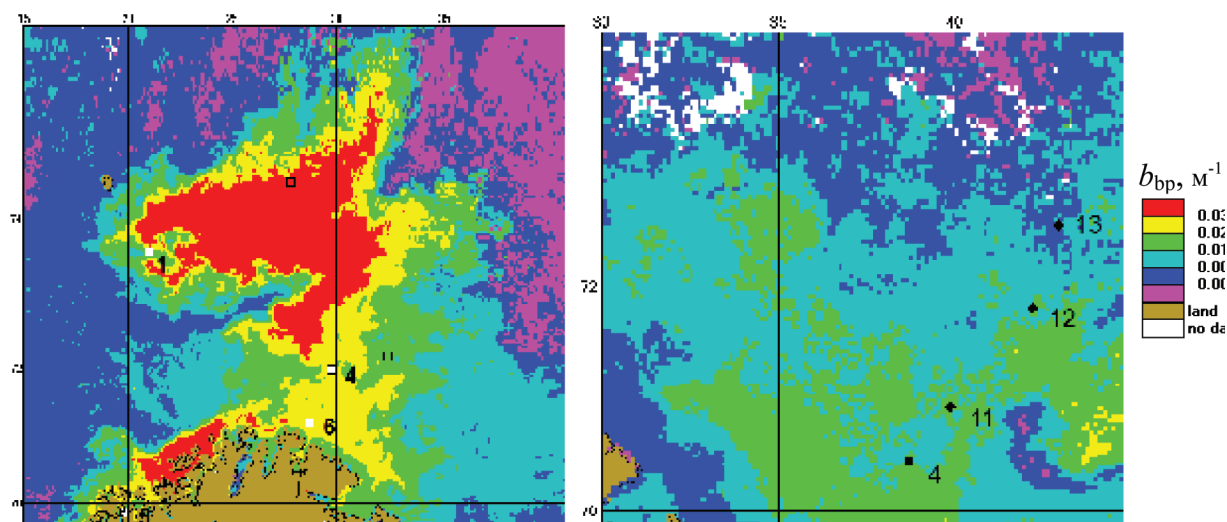


Рис. 1. Пространственные распределения значений показателя рассеяния назад взвешенными частицами (b_{bp} , M^{-1}) в западной части Баренцевого моря, осредненные за периоды 26 июля – 14 августа 2004 г. (слева) и 24 августа – 24 сентября 2009 г. (справа) по данным спутникового сканера цвета MODIS-Aqua.

Цифры на рисунках – номера точек отбора проб

Таблица 1. Даты и координаты точек отбора проб, концентрации кокколитофорид (N_{cf}) и кокколитов (N_c), показатель рассеяния назад взвешенными частицами (b_{bp}) по данным сканера MODIS

№ точки	Дата	координаты		N_{cf} , млн кл./л	N_c , млн шт./л	Спутниковый файл	Дата	b_{bp} , M^{-1}
		Широта, северная	Долгота, восточная					
4_2004	10.08	71° 59'	29° 44'	19,90	100	A20042241015	11.08	0,0335
6_2004	12.08	71° 13'	28° 44'	2,50	40	A20042241005	13.08	0,0212
04_2009	27.08	70° 27'	38° 42'	0,96	96	A20092380925	27.08	0,0197
11_2009	30.08	70° 57'	39° 52'	0,77	51	A20092440850	01.09	0,0140
12_2009	02.09	71° 49'	42° 12'	0,52	44	A20092461015	03.09	0,0083
13_2009	04.09	72° 31'	42° 56'	0,41	10	A20092470920	04.09	0,0057

В Черном море судовые измерения выполнялись в его северо-восточной части, как в открытом море, так и прибрежной зоне, ежегодно, начиная с 2004 г., в период июньского «помутнения» (Буренков и др., 2011).

Помимо спутниковых и судовых данных, для анализа и модельных расчетов использовались данные лабораторных исследований оптических характеристик кокколитофорид и кокколитов (Voss et al., 1998).

2. Сравнение Баренцева и Черного морей

Как уже отмечалось во Введении, одна из главных проблем разработки количественной оценки интенсивности КЦ — разделение «кокколитофоридной» и «некокколитофоридной» составляющих в показателе рассеяния назад b_{bp} . С этой точки зрения, Баренцево и Черное моря существенно различаются: в Черном море вклад в b_{bp} «некокколитофоридной» составляющей может быть значительным из-за поставки взвешенных частиц речным стоком (Korelevich et al., 2008); в Баренцевом море в районах, где наблюдаются КЦ [<http://optics.ocean.ru>], влияние речного стока практически отсутствует.

На рис. 2 даны примеры спектров коэффициента яркости водной толщи $\rho(\lambda)$, измеренных в Черном и Баренцевом морях (величины R_{rs} и ρ связаны формулой $R_{rs} = 0,165\rho / (1 - 0,497\rho)$ (Lee et al., 1998).

В табл. 2 представлена информация о времени и месте измерений, а также некоторые биооптические характеристики по данным спутниковых и судовых измерений.

Таблица 2. Даты и координаты точек измерений спектров коэффициента яркости водной толщи $\rho(\lambda)$ на рис. 2, значения показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} , рассчитанные по данным сканера MODIS, величины отношения $\rho(488)$ и $\rho(443)$, концентрации кокколитофорид N_{cf}

Точки	Черное море, 2004 г.			Черное море, 2006 г.			Баренцево море, 2009 г.	
	1	2	3	1	2	3	4	13
Дата	11.06	11.06	15.06	10.06	11.06	13.06	27.08	04.09
Широта северная	44° 32'	44° 12'	43° 24'	43° 30'	44° 07'	44° 06'	70° 27'	70° 27'
Долгота восточная	37° 58'	37° 29'	39° 46'	36° 17'	37° 30'	38° 55'	38° 42'	38° 42'
b_{bp}, M^{-1}	0,014	0,0225	0,034	0,0315	0,011	0,022	0,020	0,0057
$\rho(488)/\rho(443)$	1,50	1,23	1,29	1,17	1,10	1,30	1,04	0,97
N_{cf} , млн кл./л	~0,4	1,2	~3	~7	1,4	1,8	0,96	0,41

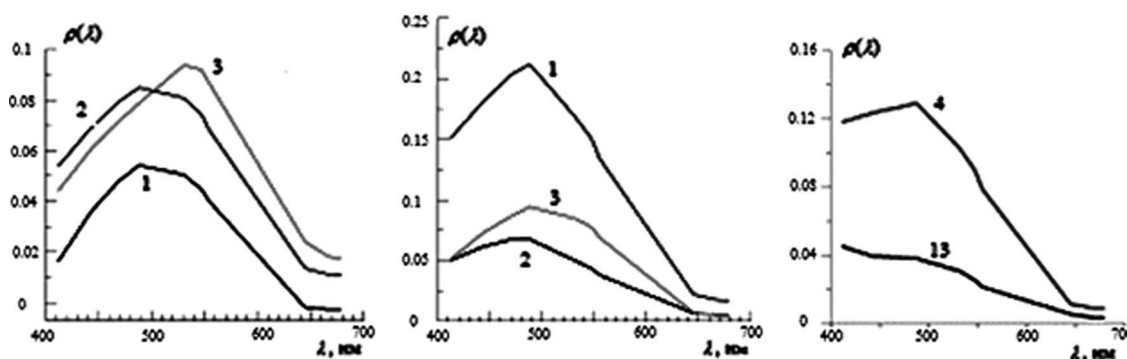


Рис. 2. Сравнение спектров коэффициента яркости водной толщи $\rho(\lambda)$, измеренных в Черном море в 2004 г. (левый рисунок) и в 2006 г. (в центре) и в Баренцевом море в 2009 г. (правый рисунок)

Анализируя представленные на рис. 2 спектры и данные табл. 2, можно отметить различия спектров для Черного и Баренцева морей. Черноморские спектры отличаются более резким уменьшением значений $\rho(\lambda)$ от максимума в сторону коротких длин волн: для них отношения $\rho(488)/\rho(443)$ находятся в диапазоне 1,10...1,50, тогда как для баренцевоморских – 0,97...1,04. По этому признаку также видны различия и между черноморскими спектрами 2004 и 2006 г.: значения $\rho(488)/\rho(443)$ для 2004 г. равны 1,23...1,50, для 2006 г. – 1,10...1,30. И в 2004 и в 2006 гг. точки с более высокими значениями $\rho(488)/\rho(443)$ расположены вблизи берега – это точки 1, 3 в 2004 г. и 3 в 2006 г. (значения $\rho(488)/\rho(443)$ равны, соответственно, 1,50; 1,29 и 1,30). Различие нашего выбора точек в 2004 и 2006 гг. связано с тем, что в июне 2004 г. область повышенных значений b_{bp} находилась в прибрежной зоне, тогда как в 2006 г. – вдали от берега (Burenkov et al., 2007).

Резонно предполагать, что наблюдаемые отличия связаны с влиянием поглощения окрашенным органическим веществом («желтым веществом»), которое возрастает в коротковолновой части спектра и уменьшает значения $\rho(\lambda)$ при уменьшении длины волны λ .

Главный источник поступления желтого вещества в море – речной сток, однако, вместе с желтым веществом, реки выносят и большое количество взвешенных частиц.

В табл. 2 можно заметить, что одним и тем же (или близким) значениям концентрации кокколитофорид N_{cf} соответствуют разные значения показателя b_{bp} , причем бóльшие значения b_{bp} наблюдаются там же, где повышенные величины отношения $\rho(488)/\rho(443)$ (ср. точки 1_2004 и 13_2009, 2_2004 и 2_2006). Последнее объясняется, как отмечалось выше, увеличением поглощения; первое можно объяснить возрастанием вклада некокколитофоридной составляющей. И тот и другой факторы связаны с речным стоком, благодаря которому возрастает содержание и желтого вещества и взвешенных частиц.

Отмеченные особенности биооптических характеристик можно использовать для разделения кокколитофоридной и некокколитофоридной составляющих при оценке интенсивности КЦ в Черном море; разработке такого алгоритма будет посвящена отдельная публикация. В настоящей работе мы ограничимся рассмотрением более простого случая Баренцева моря.

3. Модельные расчеты

Для модельных расчетов использовались оптические характеристики кокколитов и кокколитофорид с кокколитами (“plated cells”), измеренные в работе (Voss et al., 1998) в лабораторных экспериментах с культурой кокколитофорид *Emiliania huxleyi* – этот вид характерен для Баренцева и Черного морей. Наши модельные расчеты проводились с целью оценки точности определения показателя b_{bp} : с одной стороны, через коэффициент яркости водной толщи ρ , который рассчитывается по спутниковым данным, с другой, через концентрации кокколитофорид и кокколитов, измеряемые на пробах воды.

3.1. Ошибки расчета показателя b_{bp} через коэффициент ρ

Существует несколько приближенных формул, связывающих оптические характеристики морской воды (представленные через параметр $X = b_b/(a + b_b)$, где a и b_b — показатели поглощения и рассеяния назад) и коэффициент яркости водной толщи $\rho(\theta, \varphi) = \pi L_u(0^-, \theta, \varphi)/E_d(0^+)$, где $L_u(0^-, \theta, \varphi)$ – яркость восходящего излучения в направлении, определяемом зенитным углом θ и азимутальным углом φ ; $E_d(0^+)$ – облученность, создаваемая нисходящим потоком излучения, непосредственно под поверхностью моря. Все оптические величины – функции длины волны излучения λ , которая для краткости опущена. В работе (Копелевич и др., 2006) был проведен анализ ошибок для трех наиболее популярных формул (Morel, Gentili, 1993; Gordon et al., 1988; Lee et al., 1998) путем их сравнения с результатами точных расчетов, которые проводились модифицированным методом дискретных ординат (Sheberstov et al., 2003). Результаты расчетов показали, что для больших зенитных углов Солнца, наиболее важных для Баренцева моря, формула (Morel, Gentili, 1993) дает в среднем заметно лучший результат.

Однако эти расчеты ограничивались значениями параметра X , не превышающими 0,3, тогда как в случае кокколитофоридных цветений с аномально высоким рассеянием значения X могут доходить до 0,7. Сравнение трех вышеуказанных формул с результатами точных расчетов по программе Hydrolight, выполненное в работе (Lee et al., 1998), показало, что при $X > 0,3$ три рассматриваемые формулы начинают расходиться, и при $X = 0,6$ различие

между формулами (Morel, Gentili, 1993) и (Lee et al., 1998) достигает 30 %. Поэтому важно было оценить ошибки рассматриваемых формул путем модельных расчетов для кокколитофоридных цветений при высоких концентрациях кокколитофорид, исходя из имеющейся информации об их оптических характеристиках.

Мы использовали простую модель, учитывающую рассеяние кокколитофоридами (которое предполагалось неселективным), спектральное поглощение желтым веществом (Копелевич и др., 1989) и чистой водой (Pore, Fry, 1997). По спутниковым данным оценивалась величина показателя поглощения для длины волны 555 нм, которая оказалась равной $\sim 0,07$ м, поэтому модельные расчеты проводились для двух значений показателя поглощения желтым веществом $a_g - 0,05$ и $0,1 \text{ м}^{-1}$. Рассеяние кокколитофоридами рассчитывалось исходя из значения коэффициента рассеяния назад клетки $b_{bc}^* = 6,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{кл.}$ (Voss et al., 1998). Для расчетов точным методом нужна также полная индикатриса рассеяния, однако в вышеуказанной работе индикатриса рассеяния была измерена лишь в диапазоне углов $10 \dots 170^\circ$. Поэтому мы использовали модельную индикатрису, которая «сшивалась» в диапазоне углов $3 \dots 4^\circ$ из двух индикатрис: рассчитанной в диапазоне углов $0 \dots 3^\circ$ по дифракционной формуле и индикатрисы Хеньи – Гринштейна $K(1 - g^2)/[1 + g^2 - 2g\cos\theta]^{3/2}$. Параметр K подбирался так, чтобы минимизировать расхождение с индикатрисой (Voss et al., 1998) в диапазоне углов $10 \dots 170^\circ$; для расчета по дифракционной формуле размер клетки был выбран $6,4 \text{ мкм}$, в соответствии с вышеуказанной работой. Для оценки влияния индикатрисы на точность расчетов, параметр g задавался в двух вариантах: $0,83$ и $0,87$; значения b_g/b для «сшитой» индикатрисы равны, соответственно, $0,031$ и $0,020$.

Расчеты проводились при разных концентрациях N_{cf} вплоть до 20 млн.кл./л. , значение параметра X для такой концентрации равнялось $0,75$ при $a_g = 0,05 \text{ м}^{-1}$ и $0,6$ при $0,1 \text{ м}^{-1}$. Рассчитанные спектры $\rho(\lambda)$ для этой концентрации при измерении в надира ($\theta = 0^\circ$) показаны на рис. 3.

Значения альbedo однократного рассеяния $b(555)/[a(555) + b(555)]$ для спектров на рис. 3а–г равны, соответственно, $0,990$; $0,980$; $0,993$ и $0,987$. Видно, что для 555 нм наблюдаются наибольшие ошибки приближенных формул (Morel, Gentili, 1993; Gordon et al., 1988). Ошибки уменьшаются как при уменьшении длины волны, так и при ее увеличении; это связано с возрастанием поглощения — за счет желтого вещества в области коротких длин волн и за счет воды в длинноволновой области — и, соответственно, уменьшением альbedo однократного рассеяния, что согласуется с теоретическими представлениями.

Как видно из рис. 3, формула (Lee et al., 1998) во всех случаях обеспечивает удовлетворительную точность расчетов, и мы рекомендуем ее для проведения расчетов в случае интенсивных кокколитофоридных цветений. Эта формула имеет вид: $\rho(\lambda) = \pi(0,070 + 0,155X^{0,752})$.

3.2. Ошибки расчета показателя показателя b_{bp} через концентрации кокколитофорид и кокколитов

Цель этих расчетов — исследование возможности использования литературных данных об оптических характеристиках кокколитофорид и кокколитов (Voss et al., 1998) для количественной оценки КЦ в Баренцевом море через показатель b_{bp} , рассчитываемый по спутниковым данным. Измеренные концентрации кокколитофорид и кокколитов (N_{cf} и N_c) приведены в табл. 1, значения коэффициентов рассеяния назад клетки $b_{bcf}^*(550)$ и кокколита $b_{bc}^*(550)$, согласно (Voss et al., 1998), равны: $6,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{кл.}$ и $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{шт.}$ Показатель b_{bp} рассчитывался в предположении, что вклад «некокколитофоридных» частиц пренебрежимо мал:

$$b_{bp} = b_{bcf}^* N_{cf} + b_{bc}^* N_c. \quad (1)$$

Рассчитанные по формуле (1) значения b_{bp} даны в табл. 3 в сравнении с данными спутникового сканера MODIS.

Таблица 3. Рассчитанные значения показателей рассеяния назад (m^{-1}), кокколитофорид (b_{bcf}), отделенных кокколитов (b_{bc}), их суммы (расчетные) в сравнении с показателями рассеяния назад по данным сканера MODIS; в скобках даны относительные вклады b_{bcf} и b_{bc} в b_{bp}

№ точки	b_{bcf}, m^{-1}	b_{bc}, m^{-1}	b_{bp}, m^{-1}		Отношение рассчитанное/MODIS
			рассчитанное	MODIS	
4_2004	0,131 (0,89)	0,016 (0,11)	0,147	0,0335	4,4
6_2004	0,0165 (0,72)	0,0064 (0,28)	0,0229	0,0212	1,08
4_2009	0,0063 (0,29)	0,0154 (0,71)	0,0217	0,0197	1,10
11_2009	0,0051 (0,38)	0,0082 (0,62)	0,0133	0,0140	0,95
12_2009	0,0034 (0,33)	0,0070 (0,67)	0,0104	0,0083	1,25
13_2009	0,0027 (0,63)	0,0016 (0,37)	0,0043	0,0057	0,75

Из табл. 3 видно, что, за исключением точки 4_2004, расхождения между значениями b_{bp} , рассчитанными двумя способами, находятся в пределах 25 %. Для точки 4_2004 наблюдается различие более чем в 4 раза. По нашему мнению, это связано с принципиальным отличием судовых и спутниковых измерений сканером MODIS: первые выполнены в точке, тогда как вторые дают значения, осредненные по площади ~ 1 км², внутри которой могут наблюдаться гораздо более высокие значения концентрации клеток.

Хотя наблюдаемые расхождения обусловлены различными ошибками (подсчета клеток кокколитофорид и кокколитов в пробах, спутниковых оценок величины b_{bp} , неодновременностью судовых и спутниковых измерений), согласие полученных оценок вполне приемлемое, и значения b_{bcf}^* и b_{bc}^* из статьи (Voss et al., 1998) можно использовать для оценок b_{bp} для КЦ в Баренцевом море.

4. Разработка спутникового алгоритма

Формула (1) содержит два входных параметра N_{cf} и N_c , однако при решении обратной задачи по спутниковым данным известен только один параметр – показатель b_{bp} – и можно найти только одно неизвестное. В качестве последнего целесообразно выбрать концентрацию кальцита (см. Введение), однако по судовым данным определялась концентрация кокколитофорид N_{cf} и ее будем определять и по спутниковым данным.

Согласно (Voss et al., 1998), коэффициент рассеяния назад клетки b_{bc}^* превышает b_{bc}^* кокколита более, чем в 40 раз, но концентрация кокколитов обычно гораздо больше, чем кокколитофорид, поэтому вклад b_{bc} в b_{bp} может даже превышать вклад b_{bcf} . Из табл. 3 видно, что вклад b_{bc} сильно варьирует, и что в 2004 г. он был заметно меньше (0,11...0,28), чем в 2009 г. (0,37...0,71). Объяснить это различие можно, по-видимому, возрастом цветения: и в 2004 г. и в 2009 г. наиболее интенсивное КЦ наблюдалось в августе [http://optics.ocean.ru], но данные 2004 г. получены 10–12.08, а 2009 г. — 27.08–04.09.

Из (1), подставляя значения b_{bcf}^* и b_{bc}^* , можно получить:

$$N_{cf} = 152b_{bp} / (1+0.024\alpha) = Kb_{bp}, \quad (2)$$

где $\alpha = N_{cf}/N_c$, N_{cf} и N_c – в млн кл./л, b_{bp} – в m^{-1} .

Значения α и K приведены в табл. 4; видно что значения α изменяются примерно в 20 раз, K — примерно в 3 раза. Если информация о величине α отсутствует, надо выбрать какое-то фиксированное ее значение, для которого вариации K минимальны. Анализ показывает, что это примерно 54; соответствующее значение K равно 66,2. Из табл. 4 видно, что в этом случае максимальная ошибка расчета N_{cf} через значения b_{bp} , рассчитанным как по (1), так и по данным MODIS (исключая точку 4_2004) — см. 3.2) — примерно 50 %.

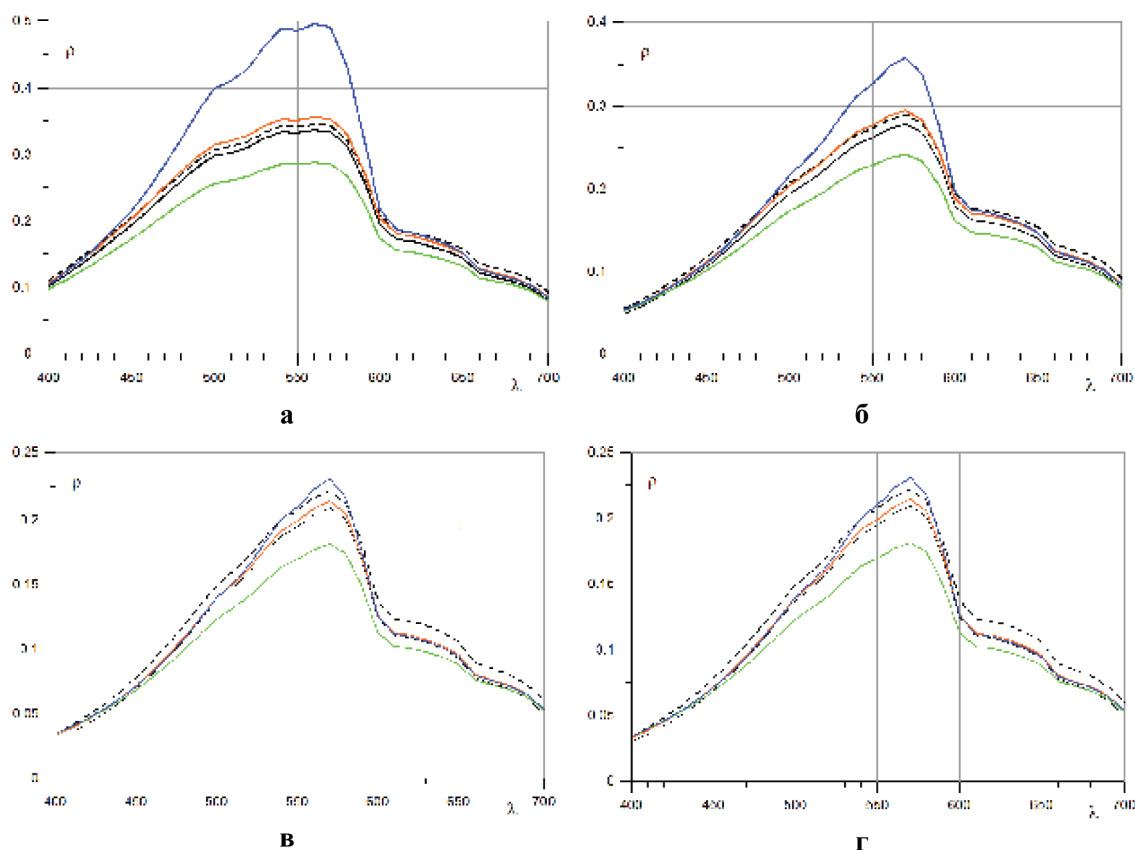


Рис. 3. Спектры коэффициента яркости водной толщи $\rho(\lambda)$, рассчитанные точным методом (черные кривые: сплошные – зенитный угол Солнца равен 30° , пунктирные – 70°) и по различным приближенным формулам: красные кривые – (Lee et al., 1998); синие – (Morel, Gentili, 1993); зеленые – (Gordon et al., 1988). Рисунки а–г соответствуют разным комбинациям значений $\alpha_g(555)$ и b_g/b : а, б – $b_g/b = 0,031$; в, г – $b_g/b = 0,020$; а, в – $\alpha_g(555) = 0,05 \text{ м}^{-1}$; б, г – $\alpha_g(555) = 0,020 \text{ м}^{-1}$.

Таблица 4. Значения $\alpha = N_{cf}/N_c$ и K в (2) и отношения рассчитанных и измеренных значений концентрации кокколитофорид при использовании фиксированного значения $\alpha = 54$. Расчет отношений выполнен в двух вариантах: через значения показателя b_{bp} по (1) и по данным MODIS (табл. 3)

№ точки	α	K	Отношение $N_{cf}^{\text{расч}} / N_{cf}^{\text{изм}}$ при $\alpha = 54$	
			через b_{bp} по (1)	через b_{bp} MODIS
4_2004	5,0	135	0,49	0,11
6_2004	16,0	109	0,61	0,56
4_2009	100	44	1,50	1,36
11_2009	66	58	1,14	1,20
12_2009	85	50	1,32	1,06
13_2009	24	95	0,69	0,92

Заключение

Отметим два практически важных результата выполненной работы:

- Показано, что для разработки алгоритма количественной оценки кокколитофоридных цветений (КЦ) по спутниковым данным в Баренцевом море можно использовать литературные данные о коэффициентах рассеяния назад кокколитофорид и кокколитов (Voss et al., 1998).

- Предложен основанный на этих данных алгоритм оценки концентрации кокколитофорид, максимальная ошибка которого составляет порядка 50 %.

Перспективы усовершенствования алгоритма связаны с получением данных натуральных измерений, которые позволят сделать статистические оценки, учитывающие, в частности, возраст КЦ, и, возможно, перейти к использованию в качестве параметра, характеризующего КЦ, концентрацию кальцита, а не клеток кокколитофорид.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (порект № 10-05-00936) и гранта Правительства РФ (Договор № 11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.

Литература

1. Буренков В.И., Ершова С.В., Копелевич О.В. и др. Оценка пространственного распределения взвеси в водах Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 5. С. 653–659.
2. Буренков В.И., Копелевич О.В., Ратькова Т.Н., Шеберстов С.В. (2001а) Цветение кокколитофорид в Баренцевом море — спутниковые и судовые наблюдения // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 5. С. 1–9.
3. Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Вазюля С.В. (2011б) Сезонные и межгодовые изменения биооптических характеристик Черного моря по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Вып. 8. Т. 4. С. 190–199.
4. Карабашев Г.С. О «цветении» кокколитофорид как факторе сезонной изменчивости хлорофилла а в Черном море // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 1. С. 42–44.
5. Копелевич О.В., Люцарев С.В., Родионов В.В. Спектральное поглощение света «желтым веществом» океанской воды // *Океанология*. 1989. Т. 29. № 3. С. 409–414.
6. Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И. и др. Оценка объемного поглощения солнечного излучения в водной толще по спутниковым данным // *Фундаментальные исследования океанов и морей*. М.: Наука, 2006. Кн. 1. С. 109–126.
7. Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V. et al. The June maxima of the particle backscatter in the Black Sea: results of three years satellite and field studies // *Proc. 4th Intern. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2007)"*. Nizhny Novgorod. 2007. P. 157–160.
8. Cokacar T., Kubilay N., Oguz T. Structure of E. huxleyi blooms in the Black Sea surface waters as detected by SeaWiFS imagery // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28. P. 4607–4610.
9. Gordon H., Boynton G., Balch W. et al. Retrieval of coccolithophore calcite concentration from SeaWiFS imagery // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28. N. 8. P. 1587–1590.
10. Gordon H.R., Brown O.B., Evans R.H. et al. A semianalytic radiance model of ocean color // *J. Geophysical Research*. 1988. V. 93. P. 10 909–10 924.
11. Gordon H.R., Balch W.M. MODIS Detached Coccolith Concentration // *Algorithm Theoretical Basis Document*. NASA. 1999.
12. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V. Case Studies of Optical Remote Sensing in the Barents Sea, Black Sea, and Caspian Sea // *Remote Sensing of the European Seas*. Springer, 2008. P. 53–66.
13. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V. Satellite observations of coccolithophore

- blooms in the Barents and Black Seas // Proc. 6th Intern. Conf. "Current problems in Optics of Natural Waters (ONW'20011)". St.-Peterburg. 2011. P. 177–180.
14. Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D. et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 1. A semianalytical model // *Applied Optics*. 1998. V. 37. N. 27. P. 6329–6338.
 15. Morel A., Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic waters. II. Bidirectional aspects // *Applied Optics*. 1993. V. 32. P. 6864–6879.
 16. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380...700 nm) of pure water. I. Integrating cavity measurements // *Applied Optics*. 1997. V. 36. N. 33. P. 8710–8723.
 17. Sheberstov S., Nabiullina M., Lukyanova E. Numerical modeling of radiative transfer in ocean-atmosphere system with wind-roughened surface // Proc. 2nd Intern. Conf. "Current Problems in Optics of Natural Waters". St.-Petersburg. 2003. P. 90–95.
 18. Smyth T. J., Tyrrell T., Tarrant B. Time series of coccolithophore activity in the Barents Sea, from twenty years of satellite imagery // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31. L11302. doi: 10.1029/2004GL019735.
 19. Voss K.J., Balch W.M., Kilpatrick K.A. Scattering and attenuation properties of *Emiliania huxleyi* cells and their detached coccoliths // *Limnology and Oceanography*. 1998. V. 43. N. 5. P. 870–876.

Problems of detection of coccolithophore blooms from satellite data

O.V. Kopelevich, V.I. Burenkov, S.V. Vazyulya, S.V. Sheberstov

Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences (IO RAS)
117997, Moscow, Nakhimovsky prospect, 36
E-mail: oleg@ocean.ru
Russian State Hydrometeorological University
195196, St-Petersburg, Malookhtinsky prospect, 98

A feasibility of quantitative assessment of the intensity of coccolithophore blooms (CB) in the Barents and Black seas from satellite data is studied. The main problem in the Black Sea is influence of river runoff, there is not a such effect on CB in the Barents Sea. The possibility to use the published data on the backscattering coefficients of coccolithophore and coccolith (Voss et al., 1998) is shown, and the algorithm based on these data has been proposed for the Barents Sea.

Keywords: satellite color scanner, coccolithophore blooms, Barents and Black seas, modeling, algorithms.