

## Восстановление оптических характеристик поверхностного слоя вод арктических морей России по судовым и спутниковым данным

П. Г. Каралли, Д. И. Глуховец

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия  
Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141701, Россия  
E-mail: karalli.pg@phystech.edu*

Работа посвящена восстановлению первичных оптических характеристик вод поверхностного слоя по спектрам яркости выходящего из морской толщи излучения на примере Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского морей и моря Лаптевых. Рассматриваются показатели поглощения жёлтым веществом и пигментами фитопланктона, а также показатель рассеяния назад взвешенными частицами. Расчёт этих характеристик производится при помощи полуаналитического алгоритма GIOP. В Карском, Восточно-Сибирском морях и море Лаптевых результаты GIOP сравниваются с результатами регионального алгоритма, разработанного в Институте океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук для оценки показателя поглощения жёлтого вещества; в Баренцевом море — с данными прямых определений, полученными с помощью спектрофотометра с интегрирующей сферой. Производится сравнение рассчитанных данных и информации, полученной при помощи спутникового сканера цвета MODIS/Aqua. Показано, что алгоритм GIOP применим в условиях кокколитофоридных цветений в Баренцевом море. Полученные результаты дают основание полагать, что применённые алгоритмы могут использоваться в условиях арктических морей России.

**Ключевые слова:** первичные оптические характеристики, модель GIOP, спутниковые сканеры цвета, судовые измерения, Баренцево море, Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море

Одобрена к печати: 11.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-191-202

### Введение

Для глобальной оценки биологической продуктивности и содержания примесей в поверхностных водах морей и океанов наиболее удобны дистанционные оптические методы. Их преимущество по сравнению с трудоёмкими и дорогими контактными океанологическими наблюдениями заключается в оперативности, регулярности и возможности получения больших объёмов информации при хороших погодных условиях. Одна из информативных гидрооптических характеристик — коэффициент яркости моря. В отличие от абсолютной яркости восходящего излучения коэффициент яркости моря слабо зависит от условий внешнего освещения и почти целиком определяется взвешенными частицами и растворёнными веществами, содержащимися в морской воде. Получаемая информация важна для понимания биогеохимических процессов, происходящих в поверхностном слое, таких как создание первичной продукции, действие «биологического насоса», реакция морской экосистемы на климатические изменения (Копелевич и др., 2018).

В данной статье используется модель оптических свойств морской воды — GIOP (Generalized Inherent Optical Property), представленная в работах (Werdell et al., 2013, 2018). Алгоритм имеет приближённый характер и основан на применении различных аналитических моделей, параметризованных для поверхностного слоя океана в разные сезоны. Для расчётов в алгоритме используются данные о коэффициенте яркости моря  $R_{rs}(\lambda)$  (англ. remote sensing reflectance) в видимом диапазоне. На выходе из модели получаются показатели поглощения  $a_g(\lambda)$  окрашенного растворённого органического вещества (ОРОВ) и пигментов фитопланктона  $a_{ph}(\lambda)$ , а также показатель рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}(\lambda)$ . Следует

подчеркнуть, что алгоритм GIOP позволяет получать спектральные значения первичных оптических характеристик. На основе GIOP можно разрабатывать региональные алгоритмы, выделять и оценивать конкретные этапы моделирования. Отсюда возникает вопрос проверки работоспособности модели с учётом особенностей характеристики оптических свойств арктических морей России. Также алгоритм GIOP рассматривается в работе (Суевин, Королев, 2018), где используются оптические данные для Чёрного моря.

### Используемые данные, подходы и методы

Судовые измерения выполнены в 59-м (сентябрь 2011 г.) рейсе, 65-м (июнь – июль 2016 г.), 68-м (июнь – август 2017 г.), 69-м (август – сентябрь 2017 г.) и 71-м (июнь – август 2018 г.) рейсах научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» (АМК) в Баренцевом, Карском и Восточно-Сибирском морях, а также в море Лаптевых. На *рис. 1* (см. с. 193) показано расположение точек станций. В *табл. 1* представлены данные о координатах станций и времени судовых измерений.

Таблица 1. Координаты станций и время судовых измерений, 2011, 2016–2018 гг.

№ станции	Широта, с. ш.	Долгота, в. д.	Дата	Время
<i>АМК-59, Карское море</i>				
5021	72,16	81,24	18.09.2011	11:02
5025	72,15	81,01	19.09.2011	15:11
5046	77,55	76,70	25.09.2011	17:43
<i>АМК-65, Баренцево море</i>				
6527	71,46	28,20	05.07.2016	06:55
6531	70,85	38,95	07.07.2016	07:04
6532	71,09	29,49	07.07.2016	08:57
6533	70,88	38,49	07.07.2016	10:27
<i>АМК-68, Баренцево море</i>				
5576	72,44	32,75	14.08.2017	07:07
5577	72,22	33,09	14.08.2017	10:18
5581	70,51	42,46	16.08.2017	08:10
<i>АМК-69, Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море</i>				
5587	74,79	66,58	28.08.2017	05:50
5602	73,23	156,43	06.09.2017	02:44
5612	74,38	168,20	08.09.2017	02:28
5617	71,36	164,33	09.09.2017	03:14
5596	74,25	130,51	14.09.2017	03:19
<i>АМК-71, Баренцево море</i>				
5940	72,39	42,17	12.08.2018	15:25
7104	77,13	43,95	12.08.2018	11:40
7105	72,49	42,51	12.08.2018	14:10
7107	69,91	38,05	13.08.2018	14:00

Значения коэффициента яркости моря  $R_{rs}(\lambda)$  в Баренцевом море в 65-м и 71-м рейсах АМК были получены с борта судна с помощью палубного спектрорадиометра, разработанного в Морском гидрофизическом институте Российской академии наук (Ли и др., 2015). Для него по специальной методике вводилась поправка на излучение, отражённое от по-

верхности. В 68-м рейсе в Баренцевом море измерения проводились на дрейфовых станциях с помощью плавающего спектро радиометра (Артемьев и др., 2000). Во всех трёх рейсах в Баренцевом море для измерения спектрального поглощения использовался портативный спектрофотометр с интегрирующей сферой (ICAM — Integrating Cavity Absorption Meter) (Погосян и др., 2009). Абсолютные значения спектральных величин показателей поглощения морской воды определялись по данным измерений с пустой сферой, а также сферой, заполненной морской водой и дистиллятом, по специально разработанной методике обработки (Глуховец и др., 2017).

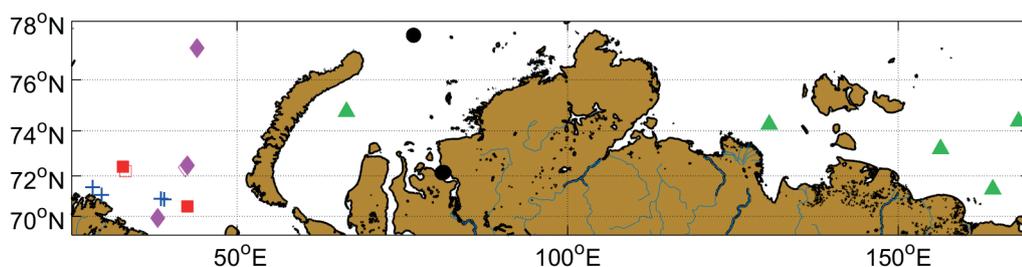


Рис. 1. Расположение точек отбора проб на ходу судна и на дрейфовых станциях, выполненных в Арктических морях России в экспедициях ИО РАН в 2011, 2016–2018 гг. Рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш»: кружки — 59-й, 2011 г., крестики — 65-й, 2016 г.; квадраты — 68-й, 2017 г.; треугольники — 69-й, 2017 г.; ромбы — 71-й, 2018 г. Приведены станции, сопоставленные со спутниковыми данными

В 59-м рейсе в Карском море и в 69-м в Карском, Восточно-Сибирском морях и море Лаптевых значения  $R_{rs}(\lambda)$  были получены также с помощью плавающего спектро радиометра. Прибора ICAM в данных рейсах не было, для расчёта первичных оптических свойств морской воды, таких как показатель поглощения жёлтого вещества  $a_g(\lambda)$ , показатель рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}(\lambda)$  и показатель диффузного ослабления подводной облучённости  $K_d$ , использовался алгоритм, разработанный в Лаборатории оптики океана Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН) (Вазюля и др., 2014). В этом алгоритме используются величины  $R_{rs}(\lambda)$  для семи спектральных каналов сканера MODIS-Aqua (488 нм, 531, 547, 555, 645, 667 и 678 нм). Все расчёты производились в среде программирования MatLab. Для связи спектральных величин  $\rho(\lambda)$  с показателями поглощения  $a(\lambda)$  и рассеяния назад  $b_b(\lambda)$  морской воды используется формула (Morel, Gentili, 1993):

$$\rho(\lambda) = 0,0922\pi \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)}.$$

При расчётах также учитываются спектральный наклон для поглощения жёлтым веществом на длинах волн <500 нм и коэффициент диффузного ослабления  $K_d$  на длинах волн 443, 490, 555 и 625 нм.

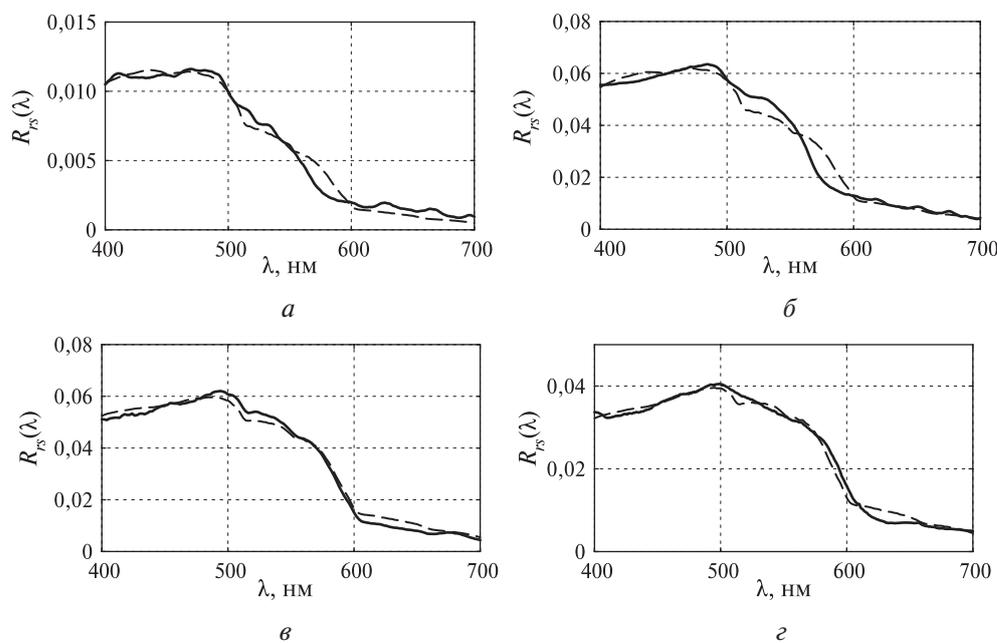
В качестве исходных спутниковых данных для расчёта биооптических параметров поверхностного слоя использовались величины коэффициента яркости моря  $R_{rs}(\lambda)$ , измеренные спутниковым сканером цвета MODIS-Aqua; данные второго уровня с пространственным разрешением 1 км скачивались с сайта <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>. Использованы средние значения для доступных пикселей из девяти ближайших к точке судовых измерений; временной интервал между натурными измерениями и съёмкой спутникового сканера цвета ограничен 72 ч. Такой большой допустимый интервал между спутниковыми и натурными измерениями объясняется частой плотной облачностью над исследуемыми акваториями, которая препятствует получению спутниковых данных в видимом диапазоне. К сожалению, даже при таком интервале спутниковые данные для 59-го, 68-го, 69-го и 71-го рейсов НИС АМК практически отсутствовали.

Значения показателя рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}(\lambda)$  в рейсах непосредственно не измерялись. Для расчёта использовались спутниковые данные, а также алгоритм, описанный в работе (Буренков и др., 2001).

В модели GIOP как вводный параметр используются данные  $R_{rs}(\lambda)$  для длин волн в видимом диапазоне. Модель предусматривает возможность настройки параметров с целью уточнения и улучшения качества расчётов для рассматриваемого региона. В данной статье для такого уточнения использовалась концентрация хлорофилла  $a$ , полученная экстракционным методом в тех же экспедициях. Далее рассчитываются спектральные значения  $a_g$ ,  $a_{ph}$  и  $b_{bp}$ . После каждого цикла работы алгоритма по этим спектрам строится смоделированный коэффициент яркости моря и сравнивается с измеренным. Искомые спектральные значения подбираются из минимизации разницы между измеренным и смоделированным спектрами  $R_{rs}(\lambda)$ .

### Сопоставление измеренных и рассчитанных с помощью модели GIOP спектральных значений $R_{rs}(\lambda)$ для судовых и спутниковых данных

Сравнение двух спектральных коэффициентов яркости моря — измеренного и восстановленного с помощью модели GIOP — представлено на *рис. 2*.



*Рис. 2.* Сравнение коэффициентов яркости  $R_{rs}(\lambda)$  для Баренцева моря по данным палубного спектрометра (станции 6527 (а), 6531 (б)) и плавающего (станции 5581 (в), 7107 (г)) вне зоны цветения кокколитофорида (а) и в зоне цветения (б–г). Сплошная линия — данные судовых измерений; пунктирная — данные, восстановленные по модели GIOP

На *рис. 2* видно, что восстановленные значения коэффициента яркости моря хорошо совпадают с измеренными. Были рассчитаны коэффициенты детерминации  $R^2$  для связи между восстановленными и измеренными значениями: для станции 6527  $R^2$  равно 0,98; для 6531 — 0,97; для 5581 — 0,99; для 7107 — 0,99. Результаты показывают, что кокколитофоридное цветение практически не влияет на работу алгоритма GIOP. Отсюда можно предположить, что рассчитанные с помощью этого алгоритма первичные оптические характеристики при благоприятных условиях измерений (безоблачное небо, отсутствие сильного волнения, бликов, пены) могут дать неплохое совпадение с данными, полученными с использованием региональных алгоритмов.

Расчёты с помощью модели GIOP производились и по спутниковым данным. Сравнение измеренных и восстановленных коэффициентов яркости моря подтверждает работоспособность этого алгоритма в Баренцевом море (рис. 3).

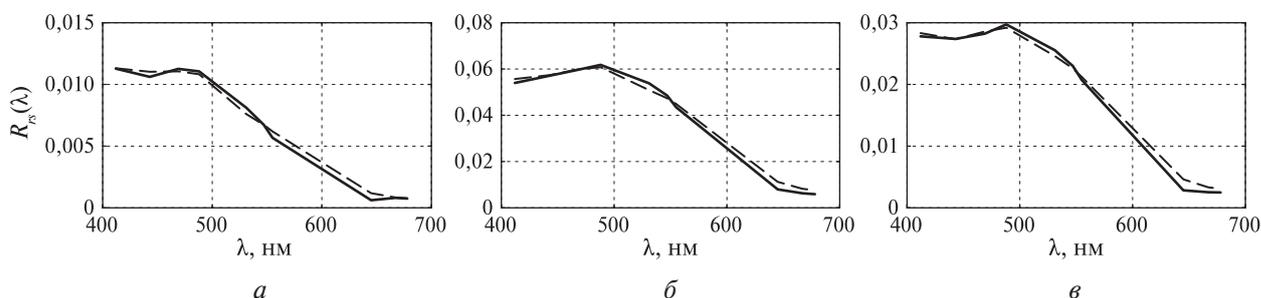


Рис. 3. Сравнение коэффициентов яркости  $R_{rs}(\lambda)$  для Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета MODIS-Aqua: а — вне зоны цветения кокколитофорид (станция 6527); б, в — в зоне цветения (станции 6531, 5581 соответственно). Сплошная линия — спутниковые данные MODIS-Aqua; пунктирная — восстановленные данные по модели GIOP

Коэффициент детерминации для спутниковых расчётов для всех представленных станций составил 0,99.

### Сопоставление спектральных значений $R_{rs}(\lambda)$ по спутниковым и судовым данным

Валидация проводилась сопоставлением спутниковых данных и информации, полученной с помощью судовых спектрорадиометров, для спектральных значений  $R_{rs}(\lambda)$ . Спутниковые данные 2-го уровня для коэффициента яркости моря рассчитывались по следующей формуле:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L(\lambda, 0^+)}{E_d(\lambda, 0^+)},$$

где  $L(\lambda, 0^+)$  — спектральная яркость в надир излучения, вышедшего из-под поверхности;  $E_d(\lambda, 0^+)$  — спектральная облучённость моря.

Такая же величина рассчитывалась по данным судовых измерений. Коэффициент яркости водной толщи  $\rho(\lambda)$ , измеренный плавающим спектрорадиометром в 2017 г., пересчитывался в  $R_{rs}(\lambda)$  по формуле (Lee et al., 1998):

$$R_{rs}(\lambda) = 0,165 \frac{\rho(\lambda)}{1 - 0,497\rho(\lambda)}.$$

На рис. 4 (см. с. 196) представлены результаты сопоставления спутниковых и судовых измерений для станций, где были получены спутниковые данные.

Представленные на рис. 4 результаты сопоставления показывают хорошее соответствие между спутниковыми и судовыми значениями  $R_{rs}(\lambda)$ , несмотря на то, что для станции 6531 разница во времени между судовыми и спутниковыми измерениями составила практически сутки. Это можно объяснить стабильностью как кокколитофоридных цветений, так и условий наблюдения. В 2017 г. на протяжении большей части 68-й экспедиции получению спутниковых данных препятствовала сплошная облачность, и только в конце рейса появились «окна», благодаря которым удалось получить представление о расположении кокколитофоридного цветения и провести там комплексные исследования.

Фактически данные на станции 5581 являются «точечными», тем не менее наблюдается хорошее совпадение спутниковых кривых  $R_{rs}(\lambda)$  и неплохое согласие с судовыми измерениями. Это можно связывать с сохранением во времени положения кокколитофоридного цветения на станции.

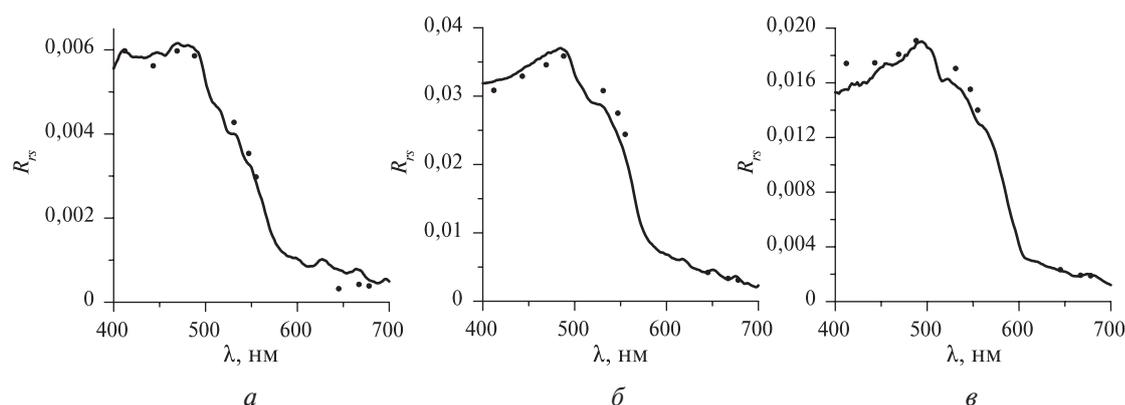


Рис. 4. Сопоставление данных спутниковых измерений спектрального коэффициента яркости моря  $R_{rs}(\lambda)$  с данными судовых измерений в Баренцевом море: а — вне зоны цветения кокколитофорид (станция 6527); б, в — в зоне цветения (станции 6531, 5581 соответственно). Сплошные кривые — измерения спектрорадиометром; точки — данные сканера цвета MODIS-Aqua

Таблица 2. Дата, время и координаты спутниковых и судовых данных для рис. 4

№ станции	Дата пролёта спутника	Время пролёта спутника	Дата станции	Судовое время станции	Координаты станции, с. ш./в. д.
6527	06.07.2016	08:20	06.07.2016	06:59	71,46/28,24
6531	06.07.2016	08:20	07.07.2016	06:58	70,85/38,97
5581	15.08.2017	10:20	16.08.2017	07:26	70,51/42,43

Информация о времени, датах и координатах судовых измерений и пролётов спутников представлена в табл. 2.

### Сравнение результатов расчёта показателя поглощения окрашенного вещества

Показатель поглощения окрашенного растворённого органического вещества  $a_g$  обуславливает поглощение света морской водой и характеризует содержание окрашенной органики. Кроме того, он влияет на спектр коэффициента яркости моря  $R_{rs}$ , что определяет возможность его оценки по данным спутниковых сканеров цвета и судовым данным.

Для Баренцева моря регионального алгоритма определения  $a_g$  нет. Сравнение производилось только по данным портативного спектрофотометра в конфигурации ICAM и расчётов, выполненных с помощью модели GIOP. Результаты расчётов для станций в Баренцевом море представлены в табл. 3.

Для станции 6527 в 65-м рейсе вне зоны цветения отмечается вполне удовлетворительное совпадение полученных значений. Для станций 6532 и 6533, где наблюдалось мощное кокколитофоридное цветение, видно завышение показателей  $a_g$ , полученных с помощью GIOP, несмотря на то, что алгоритм показал хорошее восстановление спектров яркости выходящего из воды излучения. Наблюдаемые расхождения значений  $a_g$ , скорее всего, связаны с тем, что в 2016 г. было зафиксировано молодое кокколитофоридное цветение (Копелевич и др., 2016), а удельное поглощение пигментами зависит от видового состава, сезона и региона. Также нужно отметить, что сами значения показателей поглощения малы и для таких значений возрастает ошибка измерений спектрофотометром ICAM.

Для станций в 68-м рейсе разница между прямыми измерениями и пролётом спутников составляла трое суток. Для станций с цветением (5576–5581) модельные расчёты дают хорошее совпадение. В районе станции 5581 наблюдалось весьма устойчивое и большое по пло-

щади цветение кокколитофорид (Копелевич и др., 2017) и были получены удовлетворительные спутниковые данные.

В 71-м рейсе представлены только станции с цветением. Как видно из *табл. 3*, наблюдается удовлетворительное совпадение результатов по данным ICAM и расчётов по данным палубного спектро радиометра. Для единственной подспутниковой станции 7104 видно завышение результатов судовых измерений по сравнению с результатами спутниковых. Это объясняется разницей во времени между прямыми измерениями и пролётом спутника. Возраст популяции клеток кокколитофорид на станции был в завершающей стадии (Копелевич и др., 2017), поэтому такой стабильности, как в 68-м рейсе, не наблюдалось.

Результаты сравнения двух алгоритмов по данным плавающего спектро радиометра для станций в Карском море представлены в *табл. 4*.

Таблица 3. Значения  $a_g(443)$ , рассчитанные по разным данным для Баренцева моря

№ станции	$a_g(443)$		
	По данным ICAM	GIOP по данным плавающего и палубного спектро радиометров	GIOP по данным сканера MODIS-Aqua
<i>АМК-65</i>			
6527	0,04	<u>0,06</u>	0,06
6531	–	<u>0,05</u>	0,06
6532	0,02	<u>0,08</u>	0,06
6533	0,01	<u>0,05</u>	0,07
<i>АМК-68</i>			
5576	0,07	0,06	0,01
5577	0,10	0,06	0,03
5581	0,07	0,07	0,05
<i>АМК-71</i>			
5940	0,08	<u>0,06</u>	–
7104	0,06	<u>0,05</u>	0,02
7105	0,07	<u>0,06</u>	–
7107	0,09	<u>0,06</u>	–

Таблица 4. Значения  $a_g(443)$  в Карском море, рассчитанные по судовым данным

№ станции	$a_g(443)$ по данным плавающего спектро радиометра	
	По региональному алгоритму ИО РАН	По модели GIOP
<i>АМК-59</i>		
5021	0,90	0,69
5025	0,51	0,49
5046	0,04	0,04
<i>АМК-69</i>		
5587	0,31	0,31
5602	0,42	0,33
5612	0,06	0,13
5617	0,16	0,13
5596	0,30	0,29

Как видно из *табл. 4*, для рейса АМК-59 сравнение по приборным данным для регионального алгоритма и модели GIOP показывает близкие значения ( $R^2 = 0,97$ ). Удовлетворительное

согласие данных регионального алгоритма и алгоритма GIOP наблюдается и для АМК-69 ( $R^2 = 0,89$ ). Единственной станцией в 69-м рейсе, для которой удалось получить спутниковые данные, была станция 5587. По региональному алгоритму значение  $a_g(443) = 0,72$ , по GIOP —  $a_g(443) = 0,82$ . Видно, что эти цифры дают удовлетворительное совпадение, но превышают значения, полученные с помощью плавающего спектрорадиометра. Это можно объяснить тем, что для этой станции бралось среднее значение спутниковых данных за три дня.

### Сравнение результатов расчёта показателя рассеяния назад взвешенными частицами

Значения показателя рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}$  в рейсе непосредственно не измерялись. Расчёт данных для плавающего и палубного спектрорадиометров производился по алгоритму, описанному в работе (Каралли и др., 2018). Для данных MODIS/Aqua использовался региональный алгоритм (Вазюля и др., 2014). В табл. 5 представлено сравнение значений  $b_{bp}$  по восстановленным измерениям и спутниковым данным, рассчитанным по алгоритмам ИО РАН и GIOP.

Таблица 5. Значения  $b_{bp}$  (555), рассчитанные по разным данным

№ станции	$b_{bp}(555)$			
	По данным плавающего и палубного спектрорадиометров		По данным сканера MODIS-Aqua	
	Региональный алгоритм ИО РАН	Алгоритм GIOP	Региональный алгоритм ИО РАН	Алгоритм GIOP
<i>АМК-59</i>				
5021	0,035	0,046	—	—
5025	0,018	0,018	—	—
5046	0,007	0,006	—	—
<i>АМК-65</i>				
6527	<u>0,004</u>	<u>0,004</u>	0,004	0,005
6531	<u>0,026</u>	<u>0,035</u>	0,032	0,049
6532	<u>0,012</u>	<u>0,018</u>	0,013	0,043
6533	<u>0,020</u>	<u>0,023</u>	0,010	0,015
<i>АМК-68</i>				
5576	0,011	0,079	0,017	0,010
5577	0,027	0,085	0,018	0,023
5581	0,007	0,024	0,022	0,020
<i>АМК-69</i>				
5587	0,010	0,010	0,027	0,032
5602	0,028	0,030	—	—
5612	0,005	0,009	—	—
5617	0,014	0,017	—	—
5596	0,008	0,010	—	—
<i>АМК-71</i>				
5940	<u>0,021</u>	<u>0,040</u>	—	—
7104	<u>0,008</u>	<u>0,006</u>	0,020	0,001
7105	<u>0,010</u>	<u>0,016</u>	—	—
7107	<u>0,018</u>	<u>0,136</u>	—	—

В 59-м рейсе алгоритм ИО РАН и модель GIOP показывают хорошее совпадение результатов, полученных с помощью контактных измерений ( $R^2 = 0,99$ ). Такая же схожесть данных всех измерений наблюдалась и в рейсе АМК-69 ( $R^2 = 0,97$ ).

В 65-м рейсе видно хорошее соответствие как приборных, так и спутниковых данных между собой для станции 6527, находящейся вне кокколитофоридного цветения. Для станций с цветением заметно большее расхождение и между спутниковыми данными, и между приборными. Для спутниковых данных, скорее всего, это связано с временной разницей между прямыми измерениями и пролётами спутников. В 65-м рейсе было зафиксировано молодое цветение, размеры клеток были гораздо меньше по сравнению с теми, которые использовались при выводе регионального алгоритма (Копелевич и др., 2017). Этот фактор сильно повлиял на расхождение результатов алгоритмов, полученных по данным приборов и по спутниковой информации.

В 68-м рейсе зафиксировано значительное различие в расчётах ( $R^2 = 0,55$  для судовых данных,  $R^2 = 0,31$  — для спутниковых). На данный результат повлияли неблагоприятные погодные условия и быстрая изменчивость освещённости во время выполнения судовых измерений, а также большая разница во времени между ними и спутниковыми измерениями. По этим же причинам совпадение данных в рейсе АМК-71 ( $R^2 = 0,37$ ) неудовлетворительное.

## Выводы

Выполнено восстановление первичных оптических характеристик поверхностного слоя вод арктических морей России по спектрам яркости выходящего из воды излучения с помощью модели GIOP и региональных алгоритмов лаборатории оптики океана ИО РАН. Показано, что модель GIOP в целом применима для данных, полученных в Баренцевом море, тем не менее в условиях кокколитофоридного цветения расхождение между рассчитанными и измеренными значениями может возрастать (см. табл. 3, станции 6532 и 6533).

Полученные результаты дают основание полагать, что применённые алгоритмы могут использоваться в условиях арктических морей России. Например, при расчётах спектральных значений показателя поглощения жёлтого вещества в Карском море в 2017 г. получено удовлетворительное согласие ( $R^2 = 0,89$ ) результатов модели GIOP и регионального алгоритма (Вазюля и др., 2014). Однако полученных результатов недостаточно для того, чтобы считать выводы окончательными.

Экспедиционные исследования и первичная обработка данных проведены в рамках государственного задания (темы № 0149-2018-0002 и 0149-2019-0003). Анализ судовых данных, построение спутниковых карт и их сопоставление выполнены за счёт средств Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-35-00525). Грант предоставлен через Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

Авторы благодарят д-ра физ.-мат. наук С.И. Погосяна (Московский государственный университет) и д-ра физ.-мат. наук М.Е. Ли (Морской гидрофизический институт Российской академии наук) за предоставленную возможность использовать соответственно измеритель поглощения ICAM и палубный спектро радиометр; А.Н. Храпко — за вклад в получение оптических данных; д-ра биол. наук А.Б. Демидова и канд. биол. наук А.В. Лифанчук — за предоставленные результаты измерений концентрации хлорофилла *a*, а также д-ра физ.-мат. наук О.В. Копелевича за внимание к работе.

## 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 спектро радиометр и его метрология // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 1. С. 148–155.

2. Буренков В. И., Ведерников В. И., Еришова С. В., Копелевич О. В., Шеберстов С. В. Использование данных спутникового сканера цвета океана SeaWiFS для оценки биооптических характеристик вод Баренцева моря // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 4. С. 485–492.
3. Вазюля С. В., Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Артемьев В. А. Оценка по спутниковым данным показателей поглощения окрашенного органического вещества и диффузного ослабления солнечного излучения в водах Белого и Карского морей // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 4. С. 31–41.
4. Глуховец Д. И., Шеберстов С. В., Копелевич О. В., Зайцева А. Ф., Погосян С. И. Измерения показателя поглощения морской воды с помощью интегрирующей сферы // *Светотехника*. 2017. № 5. С. 39–43.
5. 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.
6. Копелевич О. В., Салинг И. В., Шеберстов С. В., Каралли П. Г., Григорьев А. В., Храпко А. Н. Кокколитофоридное цветение 2016 г. в Баренцевом море по данным спутниковых сканеров цвета // 14-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва: ИКИ РАН, 2016. С. 252.
7. 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. Т. 14. № 7. С. 267–279
8. Копелевич О. В., Салинг И. В., Вазюля С. В., Глуховец Д. И., Шеберстов С. В., Буренков В. И., Каралли П. Г., Юшманова А. В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. М.: ООО «Ваш формат», 2018. 140 с.
9. Ли М. Е., Шибанов Е. Б., Мартынов О. В., Корчемкина Е. Н. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // *Морской гидрофиз. журн.* 2015. Т. 186. № 6. С. 17–33.
10. Погосян С. И., Дургарян А. М., Конюхов И. В., Чикунова О. Б., Мерзляк М. Н. Абсорбционная спектроскопия микроводорослей цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы // *Океанология*. 2009. № 6. С. 934–939.
11. Суетин В. С., Королев С. Н. Оценка особенностей изменчивости оптических свойств вод Черного моря по данным спутниковых приборов SeaWiFS и MODIS // *Морской гидрофиз. журн.* 2018. Т. 34. № 4. С. 357–368.
12. Lee Z., Carder K. L., Mobley C. D., Steward R. G., Patch J. S. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 1. A semianalytical model // *Applied Optics*. 1998. V. 37. No. 27. P. 6329–6338.
13. Morel A., Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic waters. II. Bidirectional aspects // *Applied Optics*. 1993. V. 32. P. 6864–6879.
14. Werdell P. J., Franz B. A., Bailey S. W., Feldman G. C., Boss E., Brando V. E., Mangin A. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties // *Applied Optics*. 2013. V. 52. No. 10. P. 2019–2037.
15. Werdell P. J., McKinnon L. I. W., Boss E., Ackleson S. G., Craig S. E., Gregg W. W., Lee Z., Maritorena S., Roesler C. S., Rousseaux C. S., Stramski D., Sullivan J. M., Twardowski M. S., Tzortziou M., Zhang X. An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing // *Progress in Oceanography*. 2018. V. 160. P. 186–212.

## Retrieving optical characteristics of the Russian Arctic seas water surface layer from shipboard and satellite data

P. G. Karalli, D. I. Glukhovets

*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny 141701, Russia*

*E-mail: karalli.pg@phystech.edu*

This work is dedicated to the inherent optical properties of the water surface layer retrieving from the remote-sensing reflectance in the Barents, Kara, Laptev, and East Siberian seas. Colored dissolved organic matter and phytoplankton pigments absorption spectra as well as backscattering coefficient are considered. These characteristics are calculated using the GIOP semi-analytical algorithm. The GIOP results obtained in the Kara, Laptev and East Siberian seas are compared with the results of the Shirshov Institute of Oceanology RAS regional algorithm, which was developed for the estimation of the colored dissolved organic matter absorption in the Kara Sea. Also its results obtained in the Barents Sea are compared with the data of direct determinations, measured with a spectrophotometer with an integrating sphere. The calculated data are compared with the MODIS/Aqua satellite ocean color scanner data. It is shown that the GIOP algorithm is applicable in the conditions of coccolithophore blooms in the Barents Sea. The results suggest that the applied algorithms can be used in the Russian Arctic seas.

**Keywords:** inherent optical properties, GIOP, satellite ocean color scanners, shipboard measurements, Barents Sea, Kara Sea, Laptev Sea, East Siberian Sea

Accepted: 11.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-191-202

### 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., Vedernikov V.I., Yershova S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Estimation of the spatial distribution of particulate matter in the waters of the Barents Sea from the data of the SeaWiFS satellite ocean color scanner, *Oceanology*, 2001, Vol. 41, No. 1, pp. 148–155.
3. Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Artemiev V.A., Otsenka po sputnikovym dannym pokazatelei pogloshcheniya okrashennogo organicheskogo veshchestva i diffuznogo oslableniya solnechnogo izlucheniya v vodakh Belogo i Karskogo morei (Satellite estimation of the coefficients of CDOM absorption and diffuse attenuation in the White and Kara Seas), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 31–41.
4. Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Kopelevich O.V., Zaytseva A. F., Pogosyan S.I., Measuring the sea water absorption factor using integrating sphere, *Light & Engineering*, 2018, Vol. 26, No. 1, pp. 120–126.
5. Karalli P.G., Kopelevich O.V., Sahling I.V., Sheberstov S.V., Pautova L.A., Silkin V.A., Validatsiya distantsionnykh otsenok parametrov kokkolitoforidnykh tsvetenii v Barentsevom more po dannym naturnykh izmerenii (Validation of remote sensing estimates of coccolithophore bloom parameters in the Barents sea from field measurements), *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2018, Vol. 11, No. 3, pp. 55–63.
6. Kopelevich O.V., Sahling I.V., Sheberstov S.V., Karalli P.G., Grigoriev A.V., Khrapko A.N., Kokkolitoforidnoe tsvetenie 2016 g. v Barentsevom more po dannym sputnikovyykh skanerov tsveta (Coccolithophore bloom in 2016 in the Barents Sea according to satellite ocean color scanners), *14-ya Vserossiiskaya konferentsiya "Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"*, Book of abstracts, Moscow: IKI RAN, 2016, p. 252.
7. Kopelevich O.V., Karalli P.G., Lokhov A.S., Sahling I.V., Sheberstov S.V., Perspektivy uluchsheniya tochnosti otsenki parametrov kokkolitoforidnykh tsvetenii v Barentsevom more po sputnikovym dannym (Prospects for improving the accuracy of estimates of the parameters of coccolithophore blooms in the Barents Sea from satellite data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 7, pp. 267–279.

8. Kopelevich O. V., Sahling I. V., Vazyulya S. V., Glukhovets D. I., Sheberstov S. V., Burenkov V. I., Karalli P. G., Yushmanova A. V., *Bioopticheskie kharakteristiki morei, omyvayushchikh berega zapadnoi poloviny Rossii, po dannym sputnikovykh skanerov tsveta 1998–2017 gg.* (Bio-optical characteristics of the seas, surrounding the western part of Russia, from data of the satellite ocean color scanners of 1998–2017), Moscow: OOO “Vash Format”, 2018, 140 p.
9. Li M. E., Shibano E. B., Martynov O. V., Korchemkina E. N., *Opreделение 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), *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 2015, Vol. 186, No. 6, pp. 17–33.
10. Pogosyan S. I., Durgaryan A. M., Konyukhov I. V., Chivkunova O. B., Merzlyak M. N., *Absorption spectroscopy of microalgae, cyanobacteria, and dissolved organic matter: Measurements in an integrating sphere cavity*, *Oceanology*, 2009, Vol. 49, No. 6, pp. 866–871.
11. Suetin V. S., Korolev S. N., *Otsenka osobennosti izmenchivosti opticheskikh svoystv vod Chernogo morya po dannym sputnikovykh priborov SeaWiFS i MODIS* (Estimating specific features of the optical Properties’ variability in the Black Sea waters using the data of satellite instruments SeaWiFS and MODIS), *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 2018, Vol. 34, No. 4, pp. 357–368.
12. Lee Z., Carder K. L., Mobley C. D., Steward R. G., Patch J. S., *Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model*, *Applied Optics*, 1998, Vol. 37, No. 27, pp. 6329–6338.
13. Morel A., Gentili B., *Diffuse reflectance of oceanic waters. II. Bidirectional aspects*, *Applied Optics*, 1993, Vol. 32, pp. 6864–6879.
14. Werdell P. J., Franz B. A., Bailey S. W., Feldman G. C., Boss E., Brando V. E., Mangin A., *Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties*, *Applied Optics*, 2013, Vol. 52, No. 10, pp. 2019–2037.
15. Werdell P. J., McKinna L. I. W., Boss E., Ackleson S. G., Craig S. E., Gregg W. W., Lee Z., Maritorena S., Roesler C. S., Rousseaux C. S., Stramski D., Sullivan J. M., Twardowski M. S., Tzortziou M., Zhang X., *An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing*, *Progress in Oceanography*, 2018, Vol. 160, pp. 186–212.