

Валидация спутниковых алгоритмов расчёта показателя поглощения окрашенного растворённого органического вещества в Баренцевом море

А. В. Юшманова^{1,2}, С. В. Вазюля¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: yushmanova.av@ocean.ru

² *Московский физико-технический институт (НИУ)*
Долгопрудный, 141701, Московская обл., Россия

Статья посвящена анализу результатов работы спутниковых алгоритмов на основе данных MODIS Aqua, используемых для расчёта показателя поглощения окрашенного растворённого органического вещества (ОРОВ) в Баренцевом море: регионального алгоритма RSA (*англ.* Regional Semi-Analytical Algorithm) лаборатории оптики океана Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН), квазианалитического QAA (*англ.* Quasi-Analytical Algorithm) и GIOP (*англ.* Generalized Inherent Optical Property). Произведена валидация этих алгоритмов по данным судовых измерений, полученных в шести экспедициях ИО РАН в летнем сезоне с 2016 по 2021 г. в рейсах на НИС «Академик Мстислав Келдыш». Сравнение с данными натурных измерений, выполненных на интегрирующей сфере ICAM (*англ.* Integrated Cavity Absorption Meter), продемонстрировало применимость регионального алгоритма показателя поглощения ОРОВ: относительная ошибка — 31 %, среднеквадратичное отклонение (RMSE) — $0,022 \text{ м}^{-1}$. Алгоритмы QAA и GIOP занижают значения данного параметра в среднем на 45 и 60 % соответственно. Получаемые в результате применения этих алгоритмов показатели рассеяния назад взвешенными частицами близки между собой ($R^2 = 0,99$). Общий показатель поглощения, получаемый с помощью GIOP, занижен по сравнению с данными прямых определений. При этом QAA и RSA показывают схожие результаты (относительная ошибка — 25 % в обоих случаях), однако QAA выдаёт более высокие значения показателя поглощения взвешенными частицами по сравнению с измеренными. Отдельно рассмотрена станция с кокколитофоридным цветением (5 млн кл/л) и рассчитаны обсуждаемые биооптические параметры морской воды по спутниковым данным и данным плавающего спектрометра. Рассчитанные по GIOP и QAA показатели поглощения морской воды и ОРОВ также ниже измеренных, а алгоритм RSA определил близкие значения: относительные ошибки в среднем 12 и 8 % соответственно. Пространственное распределение показателя поглощения ОРОВ по региональному алгоритму позволяет рассмотреть региональные особенности Баренцева моря, алгоритмы QAA и GIOP делают данный процесс затруднительным.

Ключевые слова: показатель поглощения, окрашенное растворённое органическое вещество, показатель рассеяния назад взвешенными частицами, Баренцево море, ICAM, MODIS, RSA, QAA, GIOP, репроцессинг

Одобрена к печати: 12.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-28-39

Введение

Стандартные спутниковые биооптические алгоритмы разработаны для открытых районов Мирового океана с относительно невысоким содержанием взвешенных и растворённых веществ. Их использование для обработки спутниковых данных, полученных в Арктических морях, зачастую приводит к высоким ошибкам определения значений биооптических характеристик, которые могут достигать нескольких сотен процентов (Glukhovets et al., 2020; Lewis et al., 2016). Региональные алгоритмы, учитывающие особенности конкретных акваторий, позволяют повысить точность расчётов (Demidov et al., 2017; Kopelevich et al., 2004; Vazyulya et al., 2014). К настоящему времени в лаборатории оптики океана Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН) создан ряд региональных биооптических алгоритмов (Копелевич и др., 2018). Однако для Баренцева моря определение показателя поглощения

окрашенным органическим веществом (ОРОВ) всё ещё является проблемой, одна из причин которой — ограниченность набора данных подспутниковых измерений. Это в значительной мере связано с частой облачностью в Арктическом регионе, препятствующей получению синхронных судовых и спутниковых данных, и относительно небольшим количеством экспедиций, в которых выполняется прямое определение показателя поглощения морской воды. За последние годы база судовых измерений, полученных сотрудниками лаборатории оптики океана, существенно расширилась, что позволило провести работы по анализу существующих алгоритмов. Другая причина сложности определения показателя поглощения ОРОВ заключается в низких значениях этой величины в Баренцевом море (Hancke et al., 2014) вследствие отсутствия существенного влияния речных вод, наблюдаемого, например, в Карском море (Зацепин и др., 2010; Glukhovets, Goldin, 2020; Osadchiev et al., 2021). Цель настоящего исследования — сравнительный анализ результатов работы спутниковых биооптических алгоритмов, используемых для расчёта значений показателя поглощения ОРОВ, с данными судового определения этой величины, выполненного в поверхностном слое вод Баренцева моря в рейсах ИО РАН в 2016–2021 гг. Для анализа были использованы три алгоритма: региональный RSA (*англ.* Regional Semi-Analytical Algorithm) лаборатории оптики океана ИО РАН (Вазюля и др., 2014), квазианалитический QAA (*англ.* Quasi-Analytical Algorithm) (Lee et al., 2013) и GIOP (*англ.* Generalized Inherent Optical Property) (Werdell et al., 2013).

Район исследования, материалы и методы

Прямое определение показателя поглощения получено с помощью спектрофотометра с интегрирующей сферой ICAM (*англ.* Integrated Cavity Absorption Meter) (Глуховец и др., 2017; Погосян и др., 2009). Показатель поглощения взвешенными частицами $a_p(\lambda)$ в диапазоне длин волн 400–700 нм рассчитывался как разность между поглощением морской и профильтрованной (размер пор 0,2–0,45 мкм) водой. Поглощение окрашенным растворённым органическим веществом ОРОВ $a_g(\lambda)$ — как разность между поглощением профильтрованной и чистой водой (Pore, Fry, 1997). Для сравнения со спутниковыми данными использованы величины поглощения на длине волны 443 нм. Точность определения показателя поглощения ОРОВ на интегрирующей сфере составляет $0,01 \text{ м}^{-1}$.

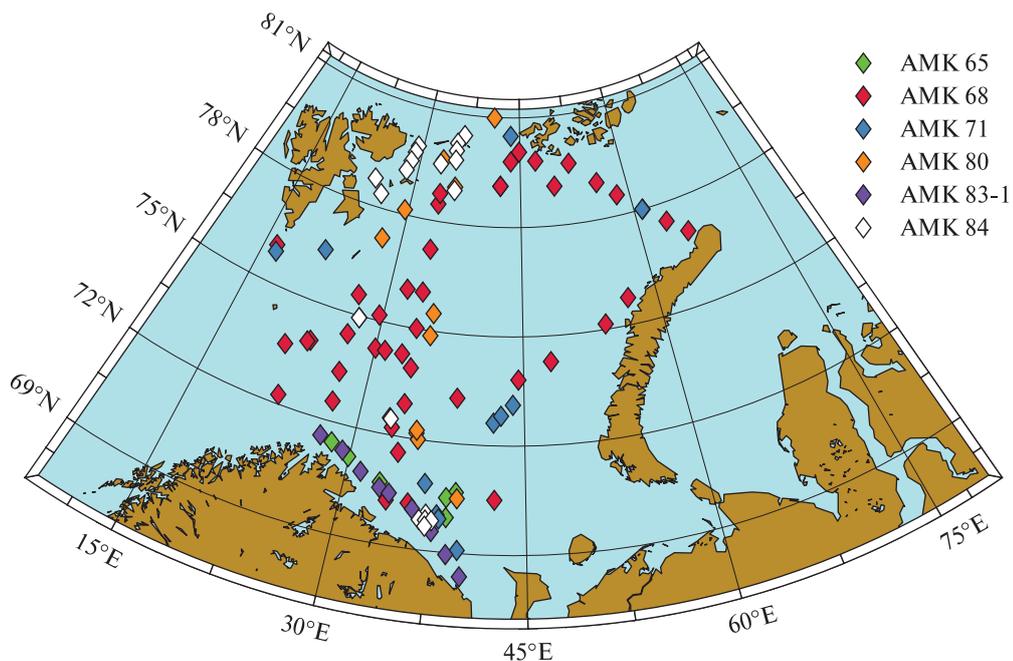


Рис. 1. Карта станций с прямыми измерениями показателя поглощения морской воды в рейсах АМК 2016–2021 гг., для которых подбирались спутниковые данные

Карта станций судовых измерений, данные которых использовались для валидации спутниковых алгоритмов, показана на *рис. 1* (см. с. 29). Они получены в ходе шести экспедиций в летний период 2016–2021 гг. на научно-исследовательском судне «Академик Мстислав Келдыш» (АМК). Массив данных из 115 станций охватил большую часть акватории Баренцева моря.

С помощью плавающего спектрорадиометра ПРО-1 (Артемьев и др., 2000) измерены спектральная яркость восходящего излучения непосредственно под поверхностью моря и спектральная облучённость поверхности моря; по полученным данным рассчитывался спектральный коэффициент яркости водной толщи.

Спутниковые величины коэффициента яркости водной толщи (R_{rs}) по данным спектрорадиометра MODIS Aqua (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) получены с сайта НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США, *англ.* NASA — National Aeronautics and Space Administration, <http://ocean-color.gsfc.nasa.gov>). Сканирование цвета имеет 10 спектральных каналов в видимой области; размер полосы сканирования — 2330 км в поперечном направлении (относительно орбиты спутника); глобальное покрытие обеспечивается каждые двое суток. Частая облачность существенно ограничила набор синхронных судовых и спутниковых данных. Для получения достаточно большой выборки допустимый временной интервал между судовыми и спутниковыми измерениями составлял 48 ч. Поиск проводился с использованием программного обеспечения SMCS (*англ.* Satellite Monitoring of Caspian Sea) (Шеберстов, 2015) по ближайшему пикселю, анализировались различные флаги качества: *Straylight*, *Hipol*, *Hisatzen*, *Hisolzen*, *Modglint* и *Coccolith*. Из полученного массива спутниковых данных исключались спектры с отрицательными значениями, а также те, для которых хотя бы один алгоритм определял отрицательные значения биооптических параметров. В итоге осталось 125 пар данных для 39 станций.

Для анализа применялись следующие алгоритмы:

- Региональный алгоритм RSA, разработанный в лаборатории оптики океана ИО РАН (Вазюля и др., 2014), который использует модификацию полуаналитического алгоритма (Буренков и др., 2001; Копелевич и др., 2006). Его особенность в том, что он не учитывает коротковолновую часть спектра (каналы 412, 443 и 469 нм), где велика вероятность ошибок атмосферной коррекции. В качестве входного параметра использовались результаты расчёта концентрации хлорофилла a по региональному алгоритму для Баренцева моря (Каралли, Вазюля, 2021). В дополнение внедрена модификация алгоритма расчёта показателя поглощения взвешенными частицами или пигментами фитопланктона (Bricaud et al., 1998) в зависимости от присутствия кокколитофоридного цветения. Для улучшения качества работы этого алгоритма проводились расчёты с различными значениями степени спектральной зависимости показателя рассеяния назад взвешенными частицами $b_{bp}(\lambda)$. Получено, что оптимальное для Баренцева моря значение равно 0,4. При увеличении его с 0,4 до 1,5 существенно увеличивается ошибка оценки показателя поглощения ОРОВ по спутниковым данным (с 33 до 55 %), при уменьшении до нуля — в меньшей степени.
- Алгоритм GIOP (Werdell et al., 2013) разработан и используется NASA как стандартный продукт поглощения ОРОВ совместно с нефитопланктонной составляющей взвеси — $a_{dg_IOP}(443)$. Относительно низкая концентрация взвеси в Баренцевом море (Политова и др., 2019), за исключением района цветения кокколитофорид, позволяет пренебречь её поглощением и сравнивать спутниковые данные $a_{dg_IOP}(443)$ непосредственно с результатами прямых определений $a_g(443)$.
- Квазианалитический алгоритм (QAA) (Lee et al., 2013), особенность которого — определение оптических параметров в зависимости от типа вод: прибрежных ($R_{rs}(670) > 0,0015$) или открытого океана. Согласно данному алгоритму $a_{dg_QAA}(443) = a_{g_QAA}(443)$.

Результаты

Влияние репроцессинга спутниковых данных NASA

Группа по разработке океанских биооптических алгоритмов (*англ.* Ocean Biology Processing Group) в центре космических полётов имени Годдарда NASA (*англ.* NASA's Goddard Space Flight Center — GSFC) раз в несколько лет проводит пересчёт (репроцессинг) спутниковых данных для улучшения качества биооптических продуктов. Он заключается в многоцелевой переобработке, включающей обновление калибровки инструментов и улучшение моделей атмосферной коррекции. На *рис. 2* приводится пример сравнения результатов репроцессингов в 2014, 2018 и 2022 гг. для коэффициентов яркости водной толщи R_{rs} для двух различных станций, выполненных в 2017 г. в Баренцевом море. Особенностью ст. 5544 является кокколитофоридное цветение — 1,75 млн кл/л, что приводит к увеличению значений всего спектра R_{rs} за счёт сильного светорассеяния. Как видно на *рис. 2*, наиболее заметны различия репроцессингов в 2014 и 2018 гг., последний привёл к увеличению величин R_{rs} в основном для канала 412 нм.

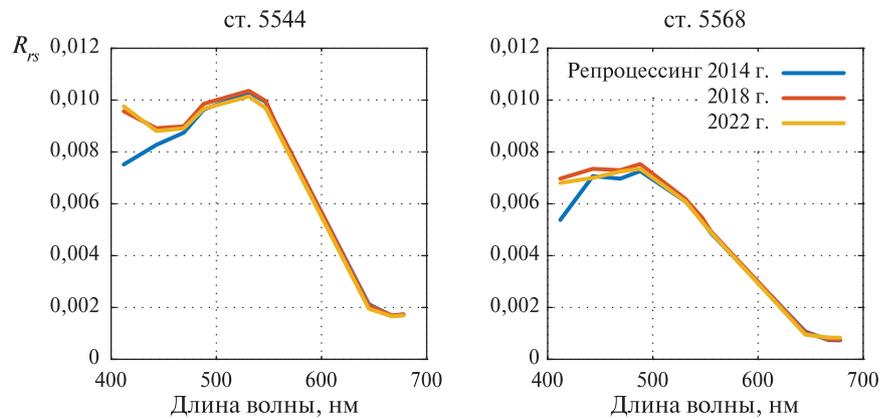


Рис. 2. Примеры изменения коэффициентов яркости моря в зависимости от версии репроцессинга данных MODIS для станций Баренцева моря: АМК 68, 31 июля и 10 августа 2017 г.

Таблица 1. Показатели поглощения ОРОВ на длине волны 443 нм, рассчитанные с использованием различных спутниковых алгоритмов в зависимости от репроцессинга NASA и измеренные на интегрирующей сфере ICAM

Алгоритм	Станция	$a_{g, 2014}, \text{M}^{-1}$	$a_{g, 2018}, \text{M}^{-1}$	$a_{g, 2022}, \text{M}^{-1}$	$a_{g, \text{ICAM}}, \text{M}^{-1}$
RSA	5544	0,079	0,077	0,087	0,061
QAA		0,079	0,039	0,032	
GIOP		0,042	0,018	0,016	
RSA	5568	0,063	0,060	0,068	0,048
QAA		0,078	0,044	0,043	
GIOP		0,045	0,028	0,029	

Увеличение R_{rs} для канала 412 на станциях 5544 и 5568 сказалось на биооптических продуктах, рассчитываемых через коэффициент яркости моря. В *табл. 1* приведены результаты расчётов показателя поглощения ОРОВ для соответствующих станций с использованием различных алгоритмов. Больше всего изменения проявились на алгоритмах QAA и GIOP при репроцессинге в 2018 г.: уменьшение $a_g(443)$ произошло на рассматриваемых станциях примерно на 50 %. Для алгоритма RSA в среднем изменения $a_g(443)$ незначительны, так как используется только длинноволновая область (488–678 нм) R_{rs} .

Дальнейший анализ представленных алгоритмов проведён для репроцессинга 2018 г., так как приведённые выше примеры показали, что изменения R_{rs} по сравнению с более современной версией обработки не столь значительны.

Влияние качества спутниковых данных

Существует множество факторов, препятствующих получению качественных спутниковых данных в арктических морях. Во-первых, вследствие частой облачности (в Арктике доля покрытия облаками в среднем составляет около 70 % (Копелевич и др., 2018)) спутниковые данные отбираются в интервале времени ± 48 ч. За этот интервал могут произойти существенные изменения параметров морской среды. Во-вторых, из-за низкого солнца над горизонтом доля отражённого света падающего потока от поверхности моря может увеличиваться (Очаковский и др., 1970), что уменьшает долю полезного сигнала в принимаемом спутниками излучении. В разделе рассматривается влияние основных факторов на точность оценки по спутниковым данным показателя поглощения ОРОВ в зависимости от используемого алгоритма. В отобранном наборе данных наблюдалось шесть часто встречающихся флагов/масок качества: *Straylight* (засветка от суши и облаков), *Hipol* (высокая поляризация), *Hisatzen* (большой зенитный угол спутника), *Hisolzen* (большой зенитный угол солнца), *Modglint* (солнечный блик) и *Coccolith* (цветение кокколитофорид).

На *рис. 3* представлена диаграмма рассеяния показателя поглощения ОРОВ между спутниковыми и натурными данными в зависимости от используемого алгоритма: RSA, QAA, GIOP. Синим цветом показан весь набор данных, а красным — $a_g(443)$, рассчитанные через коэффициенты яркости моря, не отмеченные флагами качества (no flags), т.е. без предупреждения о возможных рисках получения некачественных спутниковых данных. Малое количество не отмеченных флагами спутниковых данных (27 пролётов, 16 станций) на фоне общего массива (125 пролётов, 40 станций) за шесть рейсов вследствие частой облачности вынуждает рассматривать пролёты спутника с различными флагами качества. Из рисунка видно, что по сравнению с натурными данными, полученными с помощью интегрирующей сферы ICAM, показатели поглощения ОРОВ, определяемые алгоритмами QAA и GIOP, занижены, а оценки RSA ближе к данным прямых измерений.

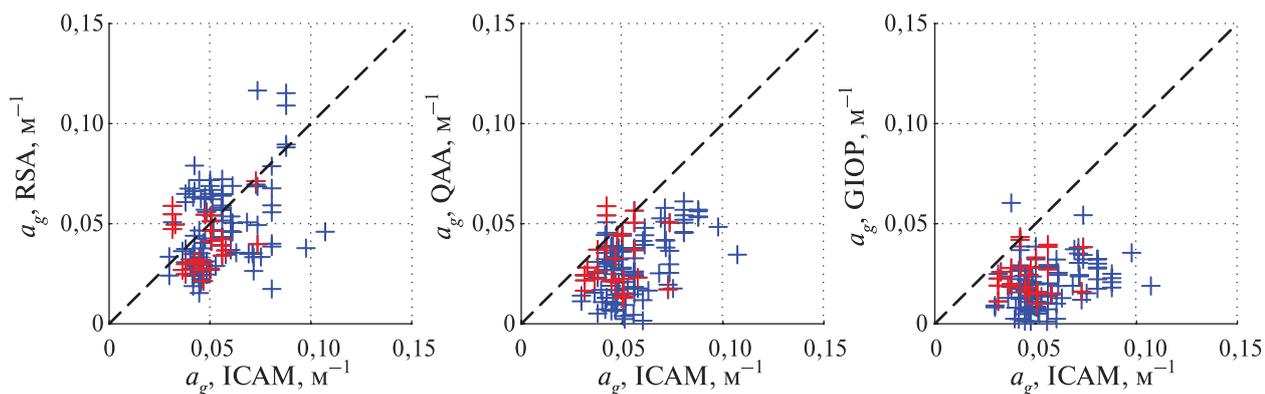


Рис. 3. Сопоставление спутниковых и судовых данных показателя поглощения ОРОВ. Красным цветом показан набор данных ($N = 27$), полученный после исключения спектров, отмеченных флагами качества; синим — полный набор данных ($N = 125$)

Стоит заметить, что алгоритм RSA чаще остальных определял значимые (не отрицательные) величины показателей поглощения и рассеяния, но полученные данные имели часто завышенные значения по сравнению с натурными. А также для удобства сопоставления различных алгоритмов в настоящей работе рассматривался тот набор спутниковых данных, где все три алгоритма показывали положительные значения, что, таким образом, позволило отбросить некачественные коэффициенты яркости толщи моря.

В табл. 2 приведены величины относительной ошибки (RE — *англ.* Relative Error) и среднеквадратичного отклонения (RMSE — *англ.* Root Mean Square Error) для значений показателя поглощения ОРОВ, полученных по спутниковым данным, в зависимости от исследуемых алгоритмов в результате исключения данных, отмеченных флагами качества: *Straylight*, *Hipol*, *Hisatzen*, *Hisolzen*, *Modglint* и *Coccolith*.

Таблица 2. Среднеквадратичное отклонение (RMSE) и относительная ошибка (RE) между спутниковыми и судовыми данными показателя поглощения ОРОВ в зависимости от исключения учитываемых флагов качества. *N* — количество пар данных

	<i>Straylight</i>	<i>Hipol</i>	<i>Hisatzen</i>	<i>Hisolzen</i>	<i>Modglint</i>	<i>Coccolith</i>	No flags	Все данные
RE, %								
RSA	33	33	32	31	32	31	31	33
QAA	41	38	44	43	44	46	38	45
GIOP	59	56	61	60	61	58	48	61
RMSE, м ⁻¹								
RSA	0,022	0,024	0,022	0,022	0,021	0,018	0,016	0,022
QAA	0,027	0,027	0,029	0,028	0,028	0,028	0,023	0,029
GIOP	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,032	0,027	0,037
<i>N</i>	94	73	117	109	119	93	27	125

Наибольшие ошибки получаются для алгоритма GIOP почти независимо от флага качества, при этом значения отклонений высоки: RE = 58–61 %, RMSE = 0,037 м⁻¹. Наименьшие — с использованием алгоритма RSA, причём ошибка заметно уменьшается при исключении данных с флагом цветения кокколитофорид. По всем алгоритмам заметно уменьшение ошибок при исключении всех флагов качества: RMSE составляет 0,016; 0,023; 0,027 м⁻¹ для алгоритмов RSA, QAA и GIOP соответственно.

Также рассматривалось изменение ошибок в зависимости от углов солнца и спутника, от времени между пролётом спутника и измерением *in situ*. Но определённой закономерности для этих факторов в нашем наборе спутниковых данных не обнаружено.

Обсуждение

Все исследуемые нами алгоритмы, кроме показателя поглощения ОРОВ, позволяют рассчитать такие биооптические характеристики морской воды, как показатели рассеяния назад взвешенными частицами $b_{bp}(555)$, общего поглощения морской воды $a_{tot}(443)$ и поглощения взвешенными частицами $a_p(443)$. Для лучшего понимания работы тестируемых алгоритмов в Баренцевом море был проведён анализ и этих продуктов. В Чёрном море анализ стандартных продуктов GIOP показал, что для вод второго типа этот алгоритм даёт некорректные оценки поглощения как для морской воды в целом, так и для отдельных оптически активных компонент (Скороход и др., 2021; Суетин, Королев, 2018, 2021).

Анализ величин показателя рассеяния назад взвешенными частицами $b_{bp}(555)$ выявил, что все три алгоритма оказались довольно близки: отклонение QAA от RSA в среднем составило 19 %, GIOP от RSA — 18 %, GIOP от QAA — 10 %, коэффициенты корреляции Пирсона $R^2 = 0,98–0,99$.

На рис. 4 представлены диаграммы рассеяния между спутниковыми и натурными данными общего поглощения света морской водой на длине волны 443 нм. Красным цветом отмечены станции с флагом цветения кокколитофорид. За счёт известкового состава они обладают сильным светорассеянием, вследствие чего может возникнуть необходимость корректировки всех биооптических алгоритмов с учётом вклада данного фитопланктона. Например,

в алгоритме GIOP присутствует сильное занижение a_{tot} для ст. 5580. На этой станции измерен максимальный коэффициент поглощения по ICAM, который связан с интенсивным цветением, по натурным данным — 5 млн кл/л.

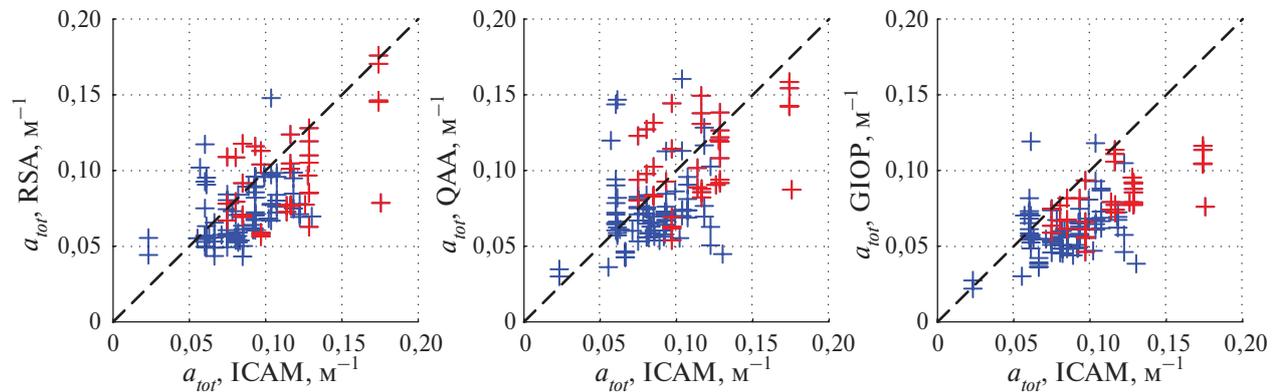


Рис. 4. Сопоставление спутниковых и судовых данных общего поглощения на длине волны 443 нм. Красным цветом представлены данные с флагом *Cocolith*

В табл. 3 представлены основные оптические характеристики для ст. 5580 с кокколитофоридным цветением, рассчитанные по спутниковому и натурному коэффициентам яркости моря, а также измеренные напрямую в интегрирующей сфере. Выбраны два пролёта, ближайšie к натурным измерениям: первый пролёт — за 26 ч до измерений (№ 1 в табл. 3), второй — через 22 ч после (№ 2 в табл. 3).

Таблица 3. Оптические характеристики для ст. 5580 по спутниковым пролётам и по данным плавающего спектро радиометра ПРО: показатель рассеяния назад взвешенными частицами $b_{bp}(555)$, общий показатель поглощения морской воды $a_{tot}(443)$, показатель поглощения взвешенными частицами $a_p(443)$, показатель поглощения ОРОВ $a_g(443)$

	ΔT , ч	$b_{bp}(555), m^{-1}$			$a_{tot}(443), m^{-1}$			
		RSA	QAA	GIOP	ICAM	RSA	QAA	GIOP
ПРО	0	0,057	0,065	0,068	0,175	0,139	0,139	0,150
№ 1	-26	0,078	0,090	0,075		0,170	0,154	0,116
№ 2	22	0,060	0,070	0,056		0,145	0,142	0,104
		$a_g(443), m^{-1}$			$a_p(443), m^{-1}$			
		ICAM	RSA	QAA	GIOP	ICAM	RSA	QAA
ПРО	0,088	0,079	0,059	0,028	0,057	0,052	0,073	0,122
№ 1		0,110	0,053	0,021		0,055	0,094	0,095
№ 2		0,087	0,056	0,025		0,050	0,079	0,081

Несмотря на разницу во времени около суток между выбранными пролётами спутников и проведением натурных измерений, коэффициенты яркости и рассчитанные по ним оптические характеристики имеют близкие значения, что говорит о малой изменчивости вод вблизи этой станции в период наблюдений, а также о хорошем качестве спутниковых данных. Общее поглощение по алгоритмам RSA и QAA определяется довольно точно (RE составляет 13 и 17 % соответственно). Показатели поглощения ОРОВ и взвешенными частицами ближе всего к измеренным по алгоритму RSA (RE — 12 и 8 %), алгоритм QAA завышает значения a_p на 40 % и на столько же занижает a_g . Алгоритм GIOP неверно определяет обе составляющие суммарного поглощения, которое и так занижено, что приводит к заниженным оценкам $a_g(443)$ и завышенным для $a_p(443)$.

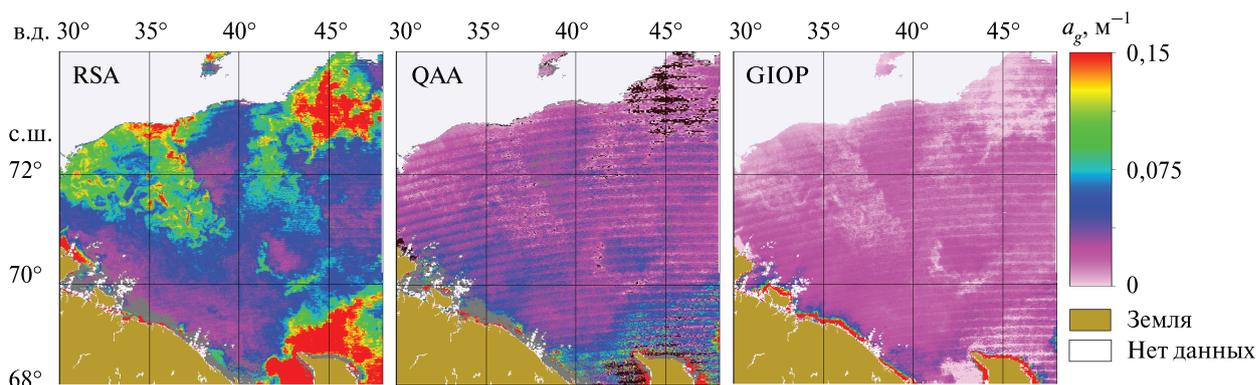


Рис. 5. Карты пространственного распределения показателя поглощения ОРОВ для алгоритмов RSA, QAA и GIOP во время 1-го этапа экспедиции АМК 83, 12 июня 2021 г.

На рис. 5 представлены карты пространственного распределения показателя поглощения ОРОВ для одного пролёта спутника 12 июня 2021 г. во время 1-го этапа экспедиции АМК 83. Региональный алгоритм позволяет увидеть аллохтонное ОРОВ в южной части Баренцева моря, связанное с влиянием вод Белого моря, и автохтонное ОРОВ севернее 71° с. ш., связанное с цветением фитопланктона, в то время как алгоритмы QAA и GIOP определяют значения $a_g(443)$ близкие к нулю по всей представленной акватории.

Выводы

Проведён анализ работы трёх алгоритмов для расчёта поглощения ОРОВ в Баренцевом море: регионального алгоритма лаборатории оптики океана ИО РАН (RSA), квазианалитического (QAA) и GIOP. В связи с перерасчётом спутниковых данных NASA в 2018 г. увеличились коэффициенты яркости водной толщи в коротковолновой области по сравнению с 2014 г. Это сказалось на показателе поглощения ОРОВ по алгоритмам QAA и GIOP. Региональный алгоритм RSA за счёт того, что в нём не используются длины волн 412, 443 и 469 нм, показал более стабильный результат. Это говорит о большей надёжности работы алгоритма RSA по сравнению с QAA и GIOP и подтверждает достоверность результатов, полученных нами ранее по данным предыдущих версий репроцессинга.

Анализ отклонения спутниковых данных показателя поглощения ОРОВ в зависимости от флагов качества выявил, что для этого набора данных в большинстве случаев у алгоритма GIOP самые высокие среди трёх алгоритмов значения среднеквадратичных и относительных ошибок ($RE = 58\text{--}61\%$, $RMSE = 0,037 \text{ м}^{-1}$). Наименьшие отклонения наблюдаются при исключении всех флагов качества, но это ограничивает набор данных с 125 до 27 пар. Исключение флага цветения кокколитофорид уменьшает $RMSE$ для алгоритма RSA с 0,022 до $0,018 \text{ м}^{-1}$.

При сравнении с натурными измерениями, полученными с помощью интегрирующей сферы ICAM, значения, определяемые алгоритмом RSA, чаще ближе к измеренным, а QAA и GIOP занижают показатели поглощения ОРОВ. Но ошибка всё равно значительна ($RE = 31\%$), коэффициент корреляции невысок, и требуются дальнейшие исследования по улучшению связи между судовыми и спутниковыми данными.

Спутниковые карты распределения показателя поглощения ОРОВ дают возможность анализировать пространственно-временное распределение $a_g(443)$. Однако широко используемые алгоритмы QAA и GIOP занижают величины $a_g(443)$, что делает затруднительным проведение такого исследования. Алгоритм RSA справляется с этой задачей, что позволяет увидеть изменения показателя поглощения ОРОВ, связанные с влиянием стока вод Белого моря, богатых ОРОВ, и цветением фитопланктона в Баренцевом море.

Судовые исследования проведены в рамках государственного задания по теме № FMWE-2022-0003, обработка данных и их анализ выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-77-10059. Грант предоставлен через ИО РАН. Авторы выражают благодарность д-ру биол. наук С. И. Погосяну за возможность использования интегрирующей сферы ICAM; Агловой Е. А., Салинг И. В., Муравье В. О., Каралли П. Г., Храпко А. Н., Паутовой Л. А. — за данные и помощь в проведении натуральных измерений; Глуховцу Д. И. — за ценные замечания.

Литература

1. *Артемов В. А., Буренков В. И., Вортман М. И., Григорьев А. В., Копелевич О. В., Храпко А. Н.* Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 1. С. 148–155.
2. *Буренков В. И., Ершова С. В., Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Шевченко В. П.* Оценка пространственного распределения взвеси в водах Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета океана SeaWiFS // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 5. С. 653–659.
3. *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. *Зацепин А. Г., Завьялов П. О., Кременецкий В. В., Поярков С. Г., Соловьев Д. М.* Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
6. *Каралли П. Г., Вазюля С. В.* Модификация регионального спутникового алгоритма определения концентрации хлорофилла-а в Баренцевом море // *Тр. 11-й Всерос. конф. «Современные проблемы оптики естественных вод»*. СПб., 2021. С. 234–239.
7. *Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В.* Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Т. 3. № 2. С. 99–105.
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. *Очаковский Ю. Е., Копелевич О. В., Войтов В. И.* Свет в море. М.: Наука, 1970. 174 с.
10. *Погосян С. И., Дургарян А. М., Конюхов И. В., Чукунова 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. *Политова Н. В., Кравчишина М. Д., Новигатский А. Н., Лохов А. С.* Рассеянное осадочное вещество Баренцева моря // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 5. С. 777–790. DOI: 10.31857/S0030-1574595777-790.
12. *Скорород Е. Ю., Чурилова Т. Я., Ефимова Т. В., Моисеева Н. А., Суслин В. В.* Биооптические характеристики прибрежных вод Черного моря вблизи Севастополя: оценка точности спутниковых продуктов, восстановленных по данным MODIS и VIIRS // *Морской гидрофиз. журн.* 2021. Т. 37. № 2. С. 233–246. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-2-233-246.
13. *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. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-4-357-368.
14. *Суетин В. С., Королев С. Н.* Использование спутниковых данных для определения характеристик поглощения света в водах Черного моря // *Морской гидрофиз. журн.* 2021. Т. 37. № 2. С. 222–232. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-2-222-232.
15. *Шеберстов С. В.* Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 6. С. 154–161.
16. *Bricaud A., Morel A., Babin M., Allali K., Claustre H.* Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103. P. 31033–31044. DOI: 10.1029/98JC02712.

17. Demidov A. B., Kopelevich O. V., Mosharov S. A., Sheberstov S. V., Vazyulya S. V. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: development and skill assessment of regional algorithms // *J. Sea Research*. 2017. V. 125. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.seares.2017.05.004.
18. Glukhovets D. I., Goldin Yu. A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // *Oceanologia*. 2020. V. 62. No. 3. P. 364–373. DOI: 10.1016/j.oceano.2020.04.002.
19. Glukhovets D. I., Kopelevich O. V., Yushmanova A. V., Vazyulya S. V., Sheberstov S. V., Karalli P. G., Sahling I. V. Evaluation of the CDOM Absorption Coefficient in the Arctic Seas Based on Sentinel-3 OLCI Data // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 19. Art. No. 3210. DOI: 10.3390/rs12193210.
20. Hancke K., Hovland E. K., Volent Z., Pettersen R., Johnsen G., Moline M., Sakshaug E. Optical properties of CDOM across the Polar Front in the Barents Sea: Origin, distribution and significance // *J. Marine Systems*. 2014. V. 130. P. 219–227. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2012.06.006.
21. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Ershova S. V., Sheberstov S. V., Evdoshenko M. A. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2004. V. 51. No. 10–11. P. 1063–1091. DOI: 10.1016/j.dsr2.2003.10.009.
22. Lee Z. P., Lubac B., Werdell J., Arnone R. An Update of the Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v6): Intern. Ocean Color Group Software Report. 2013. 9 p.
23. Lewis K. M., Mitchell B. G., van Dijkena G. L., Arrigo K. R. Regional chlorophyll a algorithms in the Arctic Ocean and their effect on satellite-derived primary production estimates // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2016. V. 130. P. 14–27. DOI: 10.1016/j.dsr2.2016.04.020.
24. Osadchiv A. A., Frey D. I., Shchuka S. A., Tilinina N. D., Morozov E. G., Zavialov P. O. Structure of the Freshened Surface Layer in the Kara Sea During Ice-Free Periods // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2021. V. 126. No. 1. P. 2020JC016486. DOI: 10.1029/2020JC016486.
25. Pope R. M., Fry E. S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Applied Optics*. 1997. V. 36. No. 33. P. 8710–8723. DOI: 10.1364/AO.36.008710.
26. Vazyulya S., Khrapko A., Kopelevich O., Burenkov V., Eremina T., Isaev A. Regional algorithms for the estimation of chlorophyll and suspended matter concentration in the Gulf of Finland from MODIS-Aqua satellite data // *Oceanologia*. 2014. V. 56. No. 4. P. 737–756. DOI: 10.5697/oc.56-4.737.
27. Werdell P. J., Franz B. A., Bailey S. W., Feldman G. C., Boss E., Brando V. E., Dowell M., Hirata T., Lavender S. J., Lee Z., Loisel H., Maritorena S., Mélin F., Moore T. S., Smyth T. J., Antoine D., Devred E., d'Andon O. H. F., Mangin A. Generalized Ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties // *Applied Optics*. 2013. V. 52. No. 10. P. 2019–2037. DOI: 10.1364/AO.52.002019.

Validation of satellite algorithms for calculating the absorption coefficient of colored dissolved organic matter in the Barents Sea

A. V. Yushmanova^{1,2}, S. V. Vazyulya¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: yushmanova.av@ocean.ru

² *Moscow Institute of Physics and Technology*
Dolgoprudny 141700, Moscow Region, Russia

This article is devoted to the analysis of the results of the work of satellite algorithms based on MODIS Aqua data used to calculate the absorption coefficient of colored dissolved organic matter (CDOM) in the Barents Sea: the regional algorithm RSA (Regional Semi-Analytical Algorithm) of the ocean optics laboratory of the Shirshov Institute of Oceanology RAS (SIO RAS), the quasi-analytical QAA (Quasi-Analytical Algorithm) and GIOP (Generalized Inherent Optical Property). These algorithms were validated according to the data of shipboard measurements performed during six expeditions of the SIO RAS in the summer season from 2016 to 2021 on cruises of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh”. Comparison with field measurements performed on the ICAM (Integrated Cavity Absorption Meter) integrating sphere showed the applicability of the regional algorithm of the CDOM absorption coefficient retrieval: relative error — 31 %, root mean square error (RMSE) — 0.022 m⁻¹. The QAA and GIOP algorithms underestimate the values of this parameter by an average of 45 and 60 %, respectively. The coefficients of backscattering by suspended particles obtained as a result of applying these

algorithms are close to each other ($R^2 = 0.99$). The total absorption coefficient obtained by GIOP is underestimated compared to direct determinations. At the same time, QAA and RSA show similar results (relative error of 25 %); however, QAA gives higher values of the particulate absorption coefficient compared to the measured ones. The station with coccolithophore bloom (5 million cells/l) was considered separately and the discussed bio-optical parameters of seawater were calculated from the data of satellite passes and a floating spectroradiometer. Calculated by GIOP and QAA, the seawater absorption and CDOM values are also lower than measured ones, and the RSA algorithm determined close values: relative errors of 12 and 8 %, respectively. Spatial distributions of the CDOM absorption coefficient according to the regional algorithm make it possible to consider the regional features of the Barents Sea; the QAA and GIOP algorithms make this process difficult.

Keywords: absorption coefficient, colored dissolved organic matter, particulate backscattering coefficient, Barents Sea, ICAM, MODIS, RSA, QAA, GIOP, reprocessing

Accepted: 12.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-28-39

References

1. Artemiev V.A., Burenkov V.I., Vortman M.I., Grigor'ev A.V., Kopelevich O.V., Khrapko A.N., Sea-truth measurements of ocean color: a new floating spectroradiometer and its metrology, *Oceanology*, 2000, Vol. 40, No. 1, pp. 139–145.
2. Burenkov V.I., Ershova S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Shevchenko V.P., An estimate of the distribution of suspended matter in the Barents Sea waters on the basis of the SeaWiFS satellite ocean color scanner, *Oceanology*, 2001, Vol. 41, No. 5, pp. 622–628.
3. Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Artemiev V.A., Satellite estimation of the coefficients of CDOM absorption and diffuse attenuation in the White and Kara seas, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 31–41 (in Russian).
4. Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Kopelevich O.V., Zaytseva A.F., Pogosyan S.I., Measurement of Sea Water Absorption Factor Using Integrating Sphere, *Light and Engineering*, 2018, Vol. 26, No. 5, pp. 120–126.
5. Zatsepin A.G., Zavalov P.O., Kremenetskiy V.V., Poyarkov S.G., Soloviev D.M., The upper desalinated layer in the Kara Sea, *Oceanology*, 2010, Vol. 50, No. 5, pp. 657–667.
6. Karalli P.G., Vazyulya S.V., Modification of the regional satellite algorithm for determining the concentration of chlorophyll-*a* in the Barents Sea, *Trudy 9-i Vserossiiskoi konferentsii "Sovremennye problemy optiki estestvennykh vod" (ONW'2021)* (Proc. 11th All-Russia Conf. "Modern problems of the optics of natural waters" (ONW'2021)), Saint Petersburg, 2021, pp. 234–239 (in Russian).
7. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V., Development and use of regional algorithms for calculating the biooptical characteristics of the seas of Russia according to the data of satellite color scanners, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 2, pp. 99–105 (in Russian).
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 sputnikovyykh skanerov tsveta 1998–2017gg.* (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. (in Russian).
9. Ochakovskii Yu.E., Kopelevich O.V., Voitov V.I., *Svet v more* (Light in the sea), Moscow: Nauka, 1970, 174 p. (in Russian).
10. Pogosyan S.I., Durgaryan A.M., Konyukhov I.V., Chikunova 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. Politova N.V., Kravchishina M.D., Novigatsky A.N., Lokhov A.S., Dispersed sedimentary matter of the Barents Sea, *Oceanology*, 2019, Vol. 59, No. 5, pp. 697–714, DOI: 10.31857/S0030-1574595777-790.
12. Skorokhod E.Yu., Churilova T.Ya., Efimova T.V., Moiseeva N.A., Suslin V.V., Bio-optical characteristics of the Black Sea coastal waters near Sevastopol: assessment of the MODIS and VIIRS products accuracy, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2021, Vol. 37, No. 2, pp. 233–246 (in Russian), DOI: 10.22449/0233-7584-2021-2-233-246.
13. Suetin V.S., Korolev S.N., Estimating specific features of the optical properties' variability in the Black Sea waters using the data of satellite instruments SeaWiFS and MODIS, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2018, Vol. 34, No. 4, pp. 357–368 (in Russian), DOI: 10.22449/0233-7584-2018-4-357-368.

14. Suetin V. S., Korolev S. N., Application of satellite data for retrieving the light absorption characteristics in the Black Sea waters, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2021, Vol. 37, No. 2, pp. 222–232 (in Russian), DOI: 10.22449/0233-7584-2021-2-222-232.
15. Sheberstov S. V., System for batch processing of oceanographic satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 154–161 (in Russian).
16. Bricaud A., Morel A., Babin M., Allali K., Claustre H., Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models, *J. Geophysical Research*, 1998, Vol. 103, pp. 31033–31044, DOI: 10.1029/98JC02712.
17. Demidov A. B., Kopelevich O. V., Mosharov S. A., Sheberstov S. V., Vazyulya S. V., Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: development and skill assessment of regional algorithms, *J. Sea Research*, 2017, Vol. 125, pp. 1–7, DOI: 10.1016/j.seares.2017.05.004.
18. Glukhovets D. I., Goldin Yu. A., Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data, *Oceanologia*, 2020, Vol. 62, No. 3, pp. 364–373, DOI: 10.1016/j.oceano.2020.04.002.
19. Glukhovets D. I., Kopelevich O. V., Yushmanova A. V., Vazyulya S. V., Sheberstov S. V., Karalli P. G., Sahling I. V., Evaluation of the CDOM Absorption Coefficient in the Arctic Seas Based on Sentinel-3 OLCI Data, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 19, Art. No. 3210, DOI: 10.3390/rs12193210.
20. Hancke K., Hovland E. K., Volent Z., Pettersen R., Johnsen G., Moline M., Sakshaug E., Optical properties of CDOM across the Polar Front in the Barents Sea: Origin, distribution and significance, *J. Marine Systems*, 2014, Vol. 130, pp. 219–227, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2012.06.006.
21. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Ershova S. V., Sheberstov S. V., Evdoshenko M. A., Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, Vol. 51, No. 10–11, pp. 1063–1091, DOI: 10.1016/j.dsr2.2003.10.009.
22. Lee Z. P., Lubac B., Werdell J., Arnone R., *An Update of the Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v6)*, *International Ocean Color Group Software Report*, 2013, 9 p.
23. Lewis K. M., Mitchell B. G., van Dijkena G. L., Arrigo K. R., Regional chlorophyll a algorithms in the Arctic Ocean and their effect on satellite-derived primary production estimates, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, Vol. 130, pp. 14–27, DOI: 10.1016/j.dsr2.2016.04.020.
24. Osadchiv A. A., Frey D. I., Shchuka S. A., Tilinina N. D., Morozov E. G., Zavialov P. O., Structure of the Freshened Surface Layer in the Kara Sea During Ice-Free Periods, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2021, Vol. 126, No. 1, p. 2020JC016486, DOI: 10.1029/2020JC016486.
25. Pope R. M., Fry E. S., Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements, *Applied Optics*, 1997, Vol. 36, No. 33, pp. 8710–8723, DOI: 10.1364/AO.36.008710.
26. Vazyulya S., Khrapko A., Kopelevich O., Burenkov V., Eremina T., Isaev A., Regional algorithms for the estimation of chlorophyll and suspended matter concentration in the Gulf of Finland from MODIS-Aqua satellite data, *Oceanologia*, 2014, Vol. 56, No. 4, pp. 737–756, DOI: 10.5697/oc.56-4.737.
27. Werdell P. J., Franz B. A., Bailey S. W., Feldman G. C., Boss E., Brando V. E., Dowell M., Hirata T., Lavender S. J., Lee Z., Loisel H., Maritorena S., Mélin F., Moore T. S., Smyth T. J., Antoine D., Devred E., d’Andon O. H. F., Mangin A., Generalized Ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties, *Applied Optics*, 2013, Vol. 52, No. 10, pp. 2019–2037, DOI: 10.1364/AO.52.002019.