

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА В КАРСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО СКАНЕРА MODIS-AQUA

© 2013 г. О. А. Кузнецова<sup>2,3</sup>, О. В. Копелевич<sup>1,3,\*</sup>, С. В. Шеберстов<sup>1,3</sup>, В. И. Буренков<sup>1,3</sup>,  
С. А. Мошаров<sup>1</sup>, А. Б. Демидов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

<sup>2</sup>Московский государственный университет

<sup>3</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

\*E-mail: oleg@ocean.ru

Поступила в редакцию 12.03.2013 г.

Предложен и реализован новый подход к разработке регионального алгоритма оценки концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутниковых сканеров цвета, учитывающий трудности получения регулярных качественных спутниковых данных в Арктическом регионе из-за плохих условий для спутниковых наблюдений. Разработка алгоритма основана на данных судовых измерений, проведенных в Карском море в двух рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш” в сентябре 2007 и 2011 гг. С помощью нового алгоритма рассчитаны карты среднемесячных пространственных распределений концентрации хлорофилла в сентябре 2007 и 2011 гг., сравнительные графики изменения концентрации хлорофилла по маршруту экспедиций (прямые определения, расчеты посредством нового и стандартного алгоритма MODIS), гистограммы среднемесячных распределений концентрации хлорофилла по занимаемым площадям в июне–октябре обоих годов. Результаты показывают непригодность использования стандартного алгоритма MODIS для Карского моря, которое находится под сильным влиянием речного стока, и приемлемое согласие данных расчетов по новому алгоритму с данными судовых исследований.

**Ключевые слова:** спутниковые сканеры цвета, концентрация хлорофилла, судовые измерения, региональный алгоритм, пространственные распределения, сезонные изменения, Карское море

DOI: 10.7868/S0205961413050023

#### ВВЕДЕНИЕ

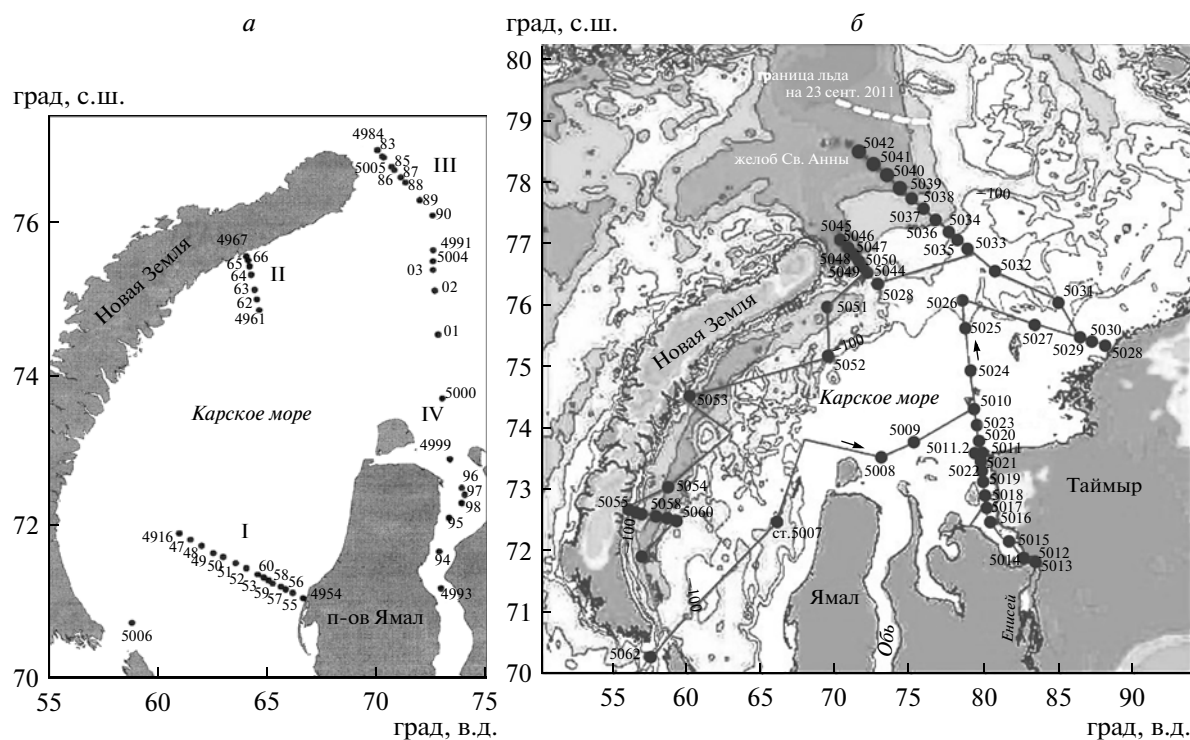
Цель данной работы – разработка регионального алгоритма оценки концентрации хлорофилла в Карском море по спутниковым данным. Концентрация хлорофилла – важнейший параметр для характеристики биомассы фитопланктона и расчета первичной продуктивности океанов и морей, чувствительный индикатор изменений, происходящих с морскими экосистемами. Это единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных и временных масштабов.

Концентрация хлорофилла входит в число стандартных продуктов обработки данных спутниковых сканеров цвета, и ее значения, рассчитанные по стандартным алгоритмам, доступны на сайтах NASA и Европейского космического агентства (см., например, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Однако стандартные алгоритмы для большинства морей России, находящиеся под сильным влиянием речного стока, могут давать большие ошибки, и для

них требуются региональные алгоритмы, учитывающие специфические особенности рассматриваемого бассейна. Такие алгоритмы могут быть разработаны только на основе данных натуральных измерений в исследуемом регионе (<http://optics.ocean.ru>).

Для Карского моря алгоритмы, существующие в настоящее время, дают результаты, неадекватные имеющимся данным судовых измерений. Проведенные нами расчеты показали, что стандартный алгоритм обработки данных сканера MODIS существенно завышает концентрацию хлорофилла по сравнению с данными прямых определений, а алгоритм для Баренцева моря, разработанный ранее в Институте океанологии РАН (ИО РАН) (<http://optics.ocean.ru>), занижает. Для Карского моря необходим свой региональный алгоритм, учитывающий его специфику.

Попытка разработки такого алгоритма уже предпринималась ранее по данным 54-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш”, проведенного в Карском море в сентябре 2007 г. (Флинт, 2010), причем не только для концентрации хлоро-



**Рис. 1.** Расположение станций в 54-м (а) и 59-м (б) рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карском море в 2007 и 2011 гг.

филла (Буренков и др., 2010а), но и для концентрации взвеси (Буренков и др., 2010б). В настоящей работе региональный алгоритм определения концентрации хлорофилла в Карском море разрабатывается на более обширном массиве данных.

Использование спутниковых данных в арктических морях связано со многими ограничениями, главное из которых — облачность, существенно лимитирующая количество доступной спутниковой информации. Долгая арктическая зима с ледовым покрытием, низкое Солнце затрудняют расчет биооптических характеристик по спутниковым данным. Если говорить о Карском море, то количество судовых измерений здесь также невелико, поэтому разработка регионального алгоритма для этого моря потребовала специального подхода, цель которого заключалась в максимально возможном использовании всей совокупности имеющихся данных.

#### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ, МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ

Данные натурных измерений, на которых основывается разработка алгоритма, получены в двух рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш», проведенных в Карском море в 2007 и 2011 гг.: 54-й рейс — 05.09–07.10.2007 г. (Флинт, 2010), 59-й — 12.09–07.10.2011 г. Расположение станций, выполненных в этих рейсах, показано на рис. 1.

Особенность Карского моря заключается в том, что оно принимает крупнейший в Арктическом бассейне пресноводный речной сток, из которого около 90% приходится на Обь и Енисей. Влияние этого стока распространяется практически на все море, и эта особенность имеет важное значение для разработки алгоритма определения концентрации хлорофилла по данным спутниковых сканеров цвета, поскольку речной сток непосредственно влияет на оптические свойства морской воды и формирование спектральных величин светового излучения, выходящего из водной толщи и определяющего исходную информацию для решения рассматриваемой задачи.

На рис. 1 видно, что районы исследований, проведенных в указанных выше рейсах, различаются: в 2007 г. исследования проводились в западной части моря, и одна из главных задач 54-го рейса заключалась в изучении трансформации речного стока Оби (Флинт, 2010); в 2011 г. — основным объектом исследований были восточная часть Карского моря и пресноводный сток Енисея.

В обоих рейсах выполнялся широкий комплекс гидрофизических, гидрохимических, биологических и геологических исследований; разработка алгоритма основывалась в первую очередь на данных прямых определений концентрации хлорофилла и измерений спектрального коэффициента яркости водной толщи посредством плавающего

спектрорадиометра, которые использовались для сопоставления со спутниковыми данными.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА

Определение хлорофилла-*a* в морской воде проводилось стандартным флуорометрическим методом (Holm-Hansen et al., 1978; Ocean optics protocols, 2003) с помощью флуорометра МЕГА-25 (производство кафедры биофизики МГУ им. М.В. Ломоносова). Флуорометр откалиброван с использованием аутентичного хлорофиллового стандарта фирмы Sigma Chemical Co. (США).

Пробы воды (0.5 л) отбирались батометрами с выбранных горизонтов, фильтровались через стекловолоконистые фильтры GF/F фирмы Whatman под вакуумом 0.2 атм. Фильтры подсушивали и помещали в 90%-ный ацетон для проведения экстракции хлорофилла-*a* при температуре +4°C в темноте в течение 24 ч. Полученные экстракты помещали в измерительную кювету флуорометра и определяли интенсивность флуоресценции. Для коррекции концентрации хлорофилла-*a* с учетом феофитина экстракт подкисляли 1 н HCl и снова определяли интенсивность флуоресценции. Расчет концентраций хлорофилла-*a* и феофитина по данным флуоресценции проводился по формулам (EPA Method, 1997; UNESCO, 1994).

В 2007 г. в период с 9 по 30 сентября, были выполнены измерения концентрации хлорофилла на 38 станциях, в 2011 г. — на 37 станциях, в период 15.09–01.10. Пробы отбирались с разных горизонтов, но для разработки спутникового алгоритма использовались данные только для подповерхностного слоя 0–3 м — если отбирались пробы с нескольких горизонтов в этом слое, то бралась средняя концентрация.

### ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ ВОДНОЙ ТОЛЩИ

Для верификации данных спутниковых измерений и разработки региональных биооптических алгоритмов в обоих рейсах использовался плавающий спектрорадиометр (Артемов и др., 2000). Этот прибор измеряет спектральную яркость выходящего из водной толщи излучения непосредственно под поверхностью  $L_u(0^-, \lambda)$  и спектральную облученность поверхности моря  $E_d(0^+, \lambda)$ , что позволяет рассчитать спектральный коэффициент яркости водной толщи, который используется для разработки биооптических алгоритмов и верификации алгоритмов атмосферной коррекции. Определяемый коэффициент яркости  $\rho(\lambda)$  выражается формулой  $\rho(\lambda) = L_u(0^-, \lambda)/E_d(0^+, \lambda)$ , где  $E_d(0^+, \lambda)$  — спектральная облученность, создаваемая нисходя-

щим потоком солнечного излучения (прямого и рассеянного) непосредственно под поверхностью моря. Величины  $E_d(0^-, \lambda)$  и  $E_d(0^+, \lambda)$  связаны формулой  $E_d(0^-, \lambda) = tE_d(0^+, \lambda)$ , где  $t$  — коэффициент пропускания поверхности, который зависит от условий освещения (высота Солнца, облачность) и состояния поверхности. В зависимости от этих факторов значение  $t$  принималось 0.85–0.95 (Иванов, 1978).

Коэффициент яркости водной толщи  $\rho(\lambda)$  и коэффициент яркости моря  $R_{RS}(\lambda)$ , определяемый по спутниковым данным (см. следующий раздел), связаны формулой Lee et al. (1998)

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

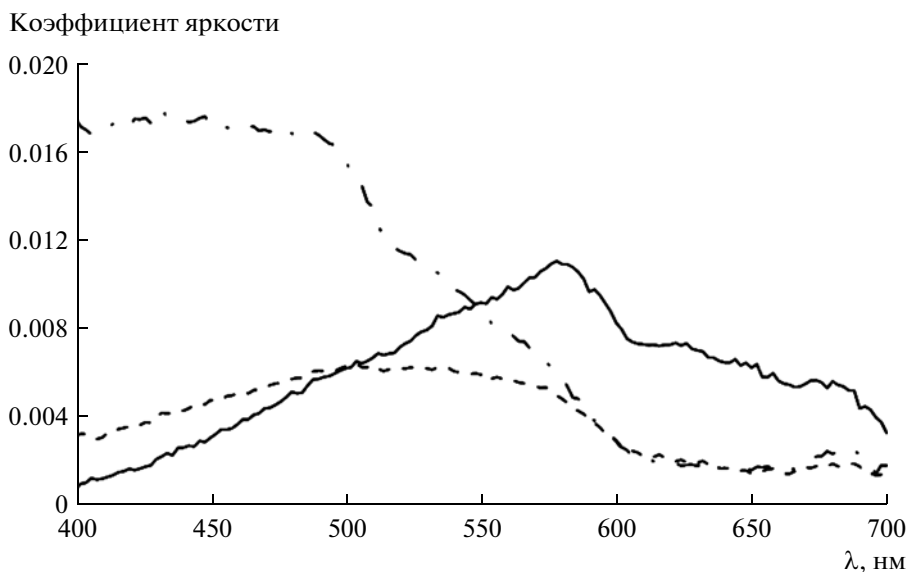
Измерения плавающим спектрорадиометром выполнялись на дрейфовых станциях. Прибор отводился от борта судна с помощью плавучего якоря на расстояние 30–50 м, чтобы избежать влияния корпуса судна на измерения. В зависимости от погодных условий выполнялись 20–50 сканирований по спектру. При обработке результаты измерений осреднялись по специально разработанному алгоритму.

Спектральный диапазон измерений — 390–700 нм, разрешение — 2.5 нм, время сканирования по спектру — 15 с. Точность измерения яркости и облученности — 5%. Перед рейсами прибор был откалиброван в лабораторных условиях в ИО РАН с помощью вторичного эталона спектральной облученности.

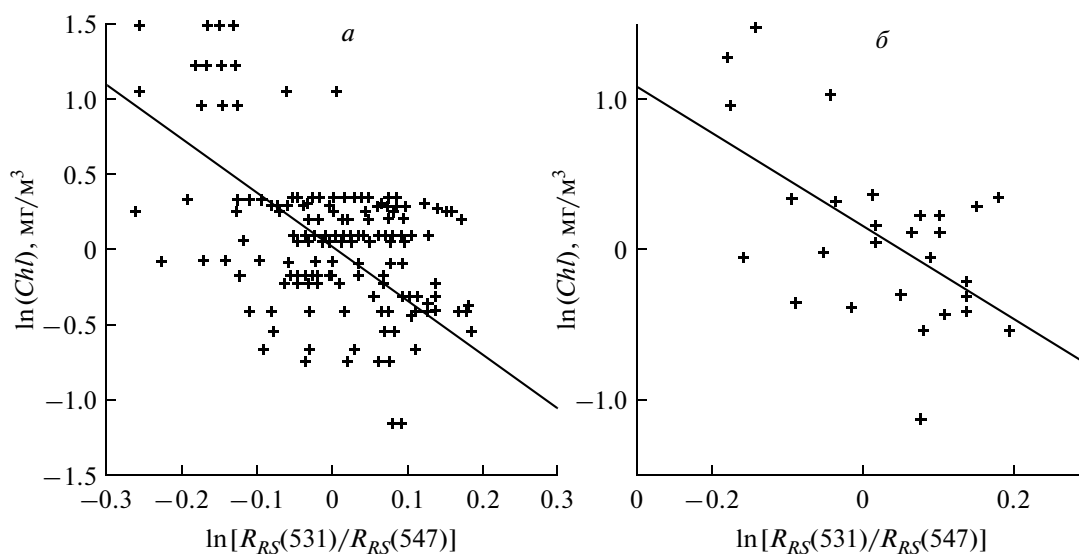
Проведение световых измерений в Карском море было затруднено погодными условиями, прежде всего почти постоянной облачностью. В первую очередь из-за нее, а также из-за низкого солнца почти все измерения проводились при невысоком уровне освещенности. Три примера спектров коэффициента яркости водной толщи  $\rho(\lambda)$ , измеренных в разных районах Карского моря (см. рис. 1), представлены на рис. 2.

На рис. 2 видно, что значения коэффициента яркости излучения, выходящего из водной толщи, на станциях 5021 и 5025, где проявлялось влияние речного стока, невелики. Причина — сильное поглощение, связанное с высоким содержанием окрашенного органического вещества. Интересно отметить, что спектр коэффициента яркости на станции 5025 практически совпадал со спектром, измеренным в Каспийском море недалеко от устья Волги в июле 2008 г. (Копелевич и др., 2010 — рис. 3а), однако поверхностная облученность во время измерений в Карском море была примерно в 7 раз ниже, чем в Каспийском.

Оптические характеристики воды на представленных станциях различны; спектры коэффициента яркости, как видно на рис. 2, также заметно различаются. Спектральный коэффициент яркости водной толщи дает количественную характе-



**Рис. 2.** Спектральные коэффициенты яркости излучения, выходящего из водной толщи, на разных станциях. Сплошная линия – ст. 5021 вблизи устья Енисея (соленость на горизонте 3 м  $S = 15.9$  PSU, концентрация хлорофилла  $Chl$  в поверхностном слое 0–3 м  $= 0.94$  мг  $m^{-3}$ ); пунктир – ст. 5025 в центральной части моря (22.9 PSU,  $0.99$  мг  $m^{-3}$ ); штрихпунктирная линия – ст. 5046 вблизи северной оконечности Новой Земли (33.9 PSU,  $0.63$  мг  $m^{-3}$ ).



**Рис. 3.** Линии регрессии  $\ln Chl$  vs  $\ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)]$ , рассчитанные для двух выборок данных спутниковых измерений  $R_{RS}$  и прямых определений концентрации хлорофилла  $Chl$  в сентябре 2007 г.: *а* – 185 спутниковых изображений (выборка 2007\_185); *б* – 29 спутниковых изображений (выборка 2007\_29).

ристку истинного цвета моря, и именно эту характеристику рассчитывают по данным измерений спутниковыми сканерами цвета после атмосферной коррекции и затем используют для расчета биооптических характеристик вод, в частности, концентрации хлорофилла.

К сожалению, общее число измерений плавающим спектро радиометром в Карском море было невелико (прежде всего, из-за погодных условий) – в 2007 г. вообще не удалось провести качественные измерения, в 2011 г. приемлемые измерения

были выполнены лишь на шести станциях. На трех из них выполнялись повторные серии измерений (при разных погодных условиях), поэтому всего в 2011 г. после отбраковки отобраны восемь серий измерений.

### СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

Использовались данные спутникового сканера цвета MODIS-Aqua 2-го уровня с разрешением  $1.1 \times 1.1$  км, доступные на сайте NASA (<http://ocean->

color.gsfc.nasa.gov/). Данные включают значения коэффициента яркости моря  $R_{RS}(\lambda_i)$  для 10 спектральных каналов с эффективными длинами волн от 412 до 869 нм, концентрацию хлорофилла, рассчитанную по стандартному алгоритму MODIS, аэрозольную оптическую толщину, а также так называемые “флаги”, показывающие качество изображения и отдельные его характеристики (суша, облака). Дальнейшая обработка спутниковых данных проводилась с помощью программного обеспечения SMCS, разработанного в ИО РАН (Sheberstov, Lukyanova, 2007), которое, наряду со стандартными, позволяет использовать новые и модифицированные алгоритмы обработки и получать продукты 3-го уровня.

Границы исследуемого региона были выбраны в соответствии с официальными границами Карского моря (Залогин, Косарев, 1999), за исключением северной границы, которая проходила от о-ва Пионер архипелага Северная Земля по  $80^\circ$  с.ш. до  $67^\circ$  в.д., дальше — по  $67^\circ$  в.д. до о-ва Северный архипелага Новая Земля. Если в контур Карского моря не попадал ни один пиксел с положительными величинами  $R_{RS}(531)$ ,  $R_{RS}(547)$ ,  $R_{RS}(488)$ , изображение исключалось из дальнейшей обработки.

Подход к разработке регионального алгоритма расчета концентрации хлорофилла в Карском море и соответствующая методика обработки данных описаны ниже. Среднемесячные распределения рассчитывались с помощью программного обеспечения SMCS. При этом использовались значения  $R_{RS}$ , положительные для всех каналов, и учитывались флаги облаков и суши. Среднемесячные значения 3-го уровня рассчитывались на стандартной сетке  $3 \times 3$  км путем осреднения значений 2-го уровня. Осреднение проводилось в следующих границах: по  $80^\circ$  с.ш. на севере,  $66^\circ$  с.ш. — на юге,  $40^\circ$  в.д. — на западе и  $115^\circ$  в.д. — на востоке.

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА

Из-за неблагоприятных условий, как для спутниковых наблюдений, так и для судовых измерений, не было возможности использовать для разработки алгоритма совпадающие во времени данные прямых определений концентрации хлорофилла и спутниковые данные — “совпадающими” (“much up”) принято считать данные спутниковых и натурных измерений, различающиеся во времени в пределах  $\pm 3$  ч (Bailey, Werdell, 2006). Нам пришлось резко смягчить эти требования и тестировать возможность использования спутниковых данных с гораздо большей разницей во времени.

## Исследования по данным 2007 г.

На первом этапе анализировалась выборка спутниковых данных 2007 г., составленная следующим образом. Для каждой станции отбирались спутниковые данные, соответствующие ее координатам. Рассматривался квадрат  $3 \times 3$  пиксел, в который попадала точка отбора пробы для определения концентрации хлорофилла; требование по качеству спутникового изображения — в рассматриваемом квадрате должно быть не менее пяти “хороших” пикселов (с положительными значениями  $R_{RS}$ ); требование по времени — разница между спутниковым и судовым измерением не превышает 480 ч (20 сут). Объем такой выборки составил 310 пар измерений; эта выборка включала все 38 станций — и в открытом море, и в устье Оби.

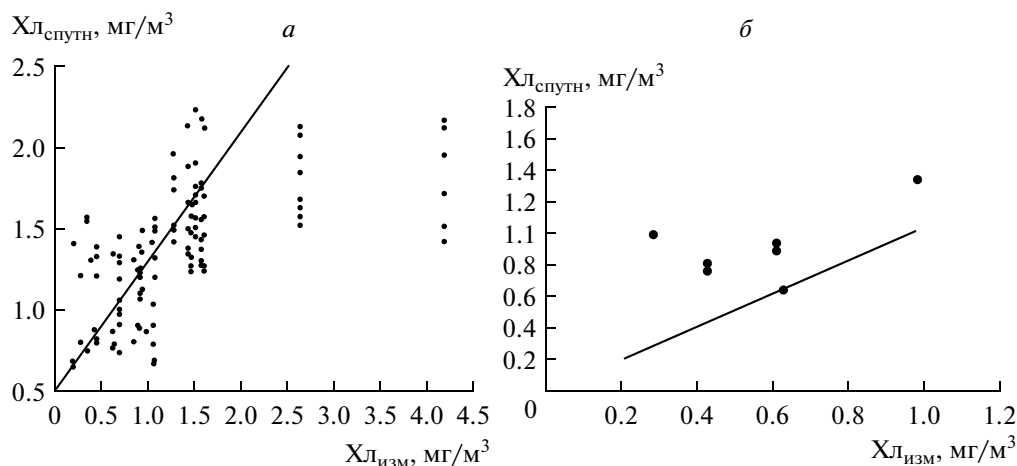
Тестировались различные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла по спутниковым данным: линейные —  $y = bx + a$  и логарифмические —  $\ln(y) = b \ln(x) + a$ , где  $y = Chl$  — концентрация хлорофилла. В качестве параметра  $x$ , рассчитываемого по спутниковым данным, использовалось отношение коэффициентов яркости  $R_{RS}$  для двух спектральных каналов сканера MODIS; тестировались два варианта этого отношения —  $R_{RS}(488)/R_{RS}(547)$  и  $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$ . Для всех анализируемых выборок (первой 2007\_310 и всех последующих) использование второго отношения давало лучшие результаты, поэтому далее в качестве параметра  $x$  везде берется отношение  $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$ .

Отметим, что в стандартном алгоритме определения концентрации хлорофилла по данным сканера MODIS (OC3M) используется более сложное выражение для расчета концентрации хлорофилла через отношения  $R_{RS}(443)/R_{RS}(551)$  и  $R_{RS}(488)/R_{RS}(551)$ . В нашем случае, из-за неудовлетворительного качества используемой спутниковой информации и соответственно большого разброса данных, использование более сложных формул не дает никакого улучшения точности алгоритма.

Для упомянутой выше выборки 2007\_310 корреляция между  $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$  и  $Chl$  оказалась слабой, и вторая выборка была сформирована, исходя из более жестких требований к спутниковым данным: вместо пяти “хороших” пикселов — семь, разница во времени — не более 360 ч (15 сут). Объем второй выборки составил 185 пар значений. Наилучшая корреляция между  $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$  и  $Chl$  получилась при использовании логарифмического уравнения регрессии

$$\ln(Chl) = -3.66 \ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)] + 0.116. \quad (1)$$

Линия регрессии  $\ln Chl$  через  $\ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)]$ , соответствующая уравнению (1), и разброс точек измерений представлены на рис. 3а. Коэффициент детерминации  $R^2$



**Рис. 4.** Результаты применения алгоритма, полученного для выборки 2007\_185, к данным 2011 г.: *a* – расчет по спутниковым данным ( $N = 111$ ); *б* – по данным плавающего спектрорадиометра ( $N = 8$ ). Прямые линии соответствуют точному совпадению рассчитанных и измеренных значений.

оказался равным 0.47, ошибка регрессии  $s_{\text{рег}}$  для  $\ln(\text{Chl})$  равна 0.56. Разброс точек относительно линии регрессии на рис. 3*a* большой, что в первую очередь связано с качеством использованных спутниковых данных.

Видно, что для одного и того же значения измеренной концентрации хлорофилла величины отношения  $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$  могут значительно отличаться, – это может объясняться как ошибками определения значений  $R_{RS}$ , так и большим расхождением во времени между спутниковыми измерениями для каждой из станций, где выполнялись прямые определения концентрации хлорофилла.

Для оценки влияния последнего фактора была построена еще одна выборка данных с еще более жесткими требованиями: для каждой станции с измеренной концентрацией хлорофилла отбиралось спутниковое изображение, удовлетворяющее условию  $\pm 48$  ч разницы во времени между отбором пробы и спутниковой съемкой, а также требованию девяти “хороших” пикселей из девяти в квадрате  $3 \times 3$ . Объем этой выборки составил 29 пар значений. Наилучшая корреляция между  $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$  и  $\text{Chl}$ , как и для предыдущей выборки, получилась при использовании логарифмического уравнения регрессии

$$\ln(\text{Chl}) = -3.07 \ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)] + 0.148. \quad (2)$$

Линия регрессии  $\ln \text{Chl}$  через  $\ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)]$ , соответствующая уравнению (2), и разброс точек представлены на рис. 3*б*. Коэффициент детерминации  $R^2$  оказался равным 0.34, ошибка регрессии  $s_{\text{рег}}$  для  $\ln(\text{Chl})$  равна 0.45. Уменьшение ошибки регрессии при одновременном уменьшении  $R^2$  объясняется уменьшением

количества точек в этой выборке и уменьшением суммарной дисперсии  $\ln \text{Chl}$ .

Как видно на рис. 3*б*, разброс точек и в этом случае достаточно большой, – уравнение регрессии (1) учитывает лишь 34% суммарной дисперсии концентрации хлорофилла. Однако важно отметить то, что полученные уравнения (1) и (2) близки друг к другу: различия значений концентрации хлорофилла, рассчитанных по этим уравнениям, составляют лишь несколько процентов для значения отношения  $\ln[R_{RS}(531)/R_{RS}(547)]$ , близкого к 0, и 10–15% для значений  $\pm 0.2$ . Этот результат показывает, что соотношение между концентрацией хлорофилла и величиной отношения  $R_{RS}(531)/R_{RS}(547)$  устойчиво во времени – можно предполагать, что выраженного тренда в рассматриваемый период времени не наблюдалось.

Данные, полученные в рейсе 2011 г., дают возможность проверить устойчивость полученного соотношения в разные годы.

#### Исследования по данным 2011 г.

Для проверки возможности использования алгоритма 2007\_185 для данных 2011 г. была составлена выборка из 111 пар значений, аналогичная по предъявляемым требованиям выборке 2007\_185. Результаты тестирования представлены на рис. 4*a*.

Значения  $X_{\text{лспутн}}$  на рис. 4*a* рассчитаны по уравнению (1), и мы видим, что рассчитанные значения вполне удовлетворительно соответствуют измеренным, за исключением 14 точек, для которых значения  $X_{\text{лизм}}$  превышают  $2.5 \text{ мг/м}^3$ . Эти значения измерены на станциях 5013–5015, которые находятся в пресных водах Енисея (см. рис. 1). Очевидно, что такие воды требуют

специального алгоритма, и эти точки целесообразно исключить из рассмотрения.

Для совокупности оставшихся 97 точек среднеквадратичная ошибка оценки концентрации хлорофилла с помощью алгоритма 2007\_185 оказалась равной  $0.54 \text{ мг/м}^3$ ; при среднем значении концентрации хлорофилла для этой выборки, равном  $1.05 \text{ мг/м}^3$ , коэффициент вариации составляет примерно 51%, что можно признать вполне приемлемым.

В 2011 г. мы располагали также данными одно-временных измерений коэффициента яркости водной толщи плавающим спектрорадиометром и концентрации хлорофилла на шести станциях (восемь пар измерений). Результаты тестирования алгоритма 2007\_185 для этих данных представлены на рис. 4б. На этом рисунке видно некоторое завышение рассчитанных концентраций хлорофилла по сравнению с измеренными (среднее рассчитанное значение равно  $0.99 \text{ мг/м}^3$ , среднее измеренное —  $0.61 \text{ мг/м}^3$ ), однако среднеквадратичное отклонение рассчитанных значений от измеренных составляет  $0.49 \text{ мг/м}^3$ , что, учитывая ошибки измерений спектральных коэффициентов яркости плавающим спектрорадиометром в плохих погодных условиях, можно считать вполне приемлемым.

Полученные результаты указывают на возможность использования алгоритма 2007\_185 (уравнение (1)) для расчета пространственных распределений концентрации хлорофилла как для сентября 2007 г., так и 2011 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Среднемесячные пространственные распределения концентрации хлорофилла для сентября 2007 и 2011 гг., построенные по спутниковым данным, представлены на рис. 5а, б (цветн. вклейка). Отметим сходство этих распределений, но следует упомянуть, что оба года относятся к числу “теплых” — вместе с 2012 г. они входят в тройку лет с наименьшим ледовым покрытием в Арктическом бассейне в сентябре ([nsdic.org/arctic-seaicenews/](http://nsdic.org/arctic-seaicenews/) — сайт National Snow and Ice Data Center). Однако главные особенности распределений проявляются независимо от межгодовых изменений — и это, в первую очередь, влияние речного стока.

Представленные распределения концентрации хлорофилла в поверхностном слое указывают на то, что речной сток играет основную роль в их формировании, что связано, по-видимому, с поставкой питательных биогенных элементов, необходимых для развития фитопланктона, и, возможно, с непосредственным увеличением концентрации за счет “речного” хлорофилла. На рис. 5 видно, что воды с наиболее высокими концентрациями хлорофилла ( $>2 \text{ мг/м}^3$ ) находятся в Оби и Енисее и затем в

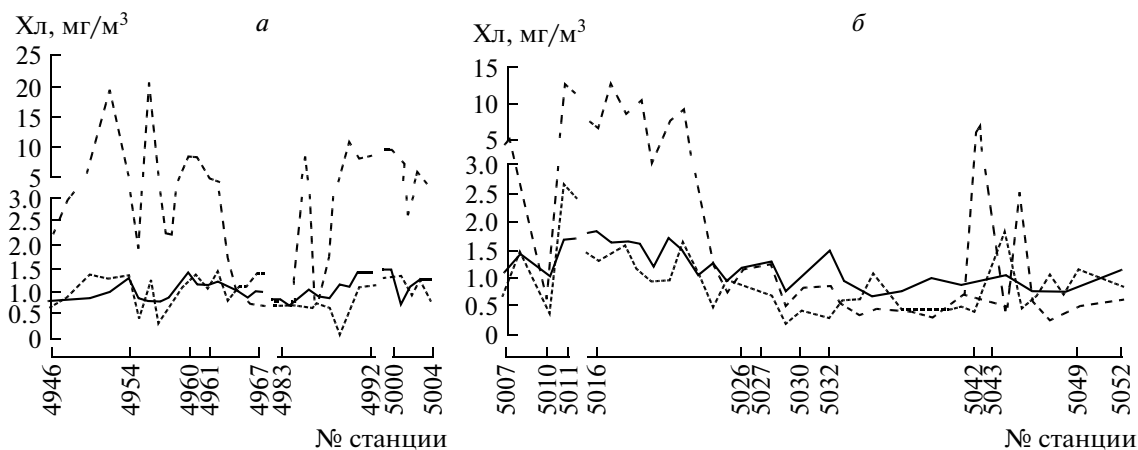
эстуарной зоне обеих рек ( $>2 \text{ мг/м}^3$ ). В этой зоне происходит смешение морских и речных вод и формирование поверхностного опресненного слоя — ПОС (Зацепин и др., 2010). В зависимости от ветровых условий, распространение опресненных вод может происходить как на восток вдоль Таймыра, так и на запад и северо-запад. Область вод с концентрацией хлорофилла более  $1 \text{ мг/м}^3$  у восточного берега Новой Земли севернее  $74^\circ$  с.ш. связана с квазиизолированной линзой опресненных вод, которая четко прослеживалась по данным измерений солёности как в 2007 г. (Зацепин и др., 2010), так и в 2011 г. Судовые измерения солёности и других характеристик в поверхностном слое в 2007 г. показали, что распространение опресненных вод по акватории Карского моря имеет не монотонный, а скачкообразный (фронтальный) характер (Зацепин и др., 2010; Буренков и др., 2010а); то же наблюдалось и в экспедиции 2011 г. К сожалению, на рис. 5 хорошо видна только фронтальная зона на северной границе эстуарной зоны, а другие “размыты” из-за пространственного (размер бина  $3 \times 3 \text{ км}^2$ ) и временного осреднения (представлены среднемесячные значения).

На рис. 6 показаны изменения концентрации хлорофилла по маршруту НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2007 и 2011 г. (см. рис. 1) — по данным прямых определений и расчета по спутниковым данным. На этих рисунках представлены следующие основные разрезы, выполненные в рейсах 2007 и 2011 гг.:

2007 г. — Ямальский (ст. 4946–4960), Новоземельский (ст. 4961–4967), разрез через желоб Св. Анны (ст. 4983–4992), Обский (ст. 5000–5004) — рис. 1а (ст. 4993–4999 в Обской Губе были исключены);

2011 г. — юго-западная часть Карского моря (ст. 5007–5010), Енисейский залив и прилегающие морские воды (ст. 5010–5026); Таймырский разрез (ст. 5026–5030); разрез “желоб Св. Анны—Восток” (ст. 5032–5042); разрез “желоб Св. Анны—Запад” (ст. 5043–5050); Новоземельская впадина и примыкающий шельф Новой Земли (ст. 5052–5062) — рис. 1б (ст. 5013–5015 в водах Енисея были исключены).

Расчет концентрации хлорофилла по спутниковым данным выполнялся как посредством разработанного регионального алгоритма, так и посредством стандартного алгоритма MODIS. Рисунок 6 четко показывает, что региональный алгоритм обеспечивает достаточно хорошую сходимость рассчитанных значений с измеренными, тогда как стандартный алгоритм MODIS на большей части маршрута значительно завышает рассчитанные значения концентрации. Это также иллюстрирует табл. 1, в которой даны средние значения концентрации хлорофилла по данным прямых определе-



**Рис. 6.** Изменения концентрации хлорофилла по маршруту НИС “Академик Мстислав Келдыш”: *а* – в 2007 г. и *б* – 2011 г. Точечная линия – данные прямых определений; сплошная – расчет по спутниковым данным посредством нового регионального алгоритма; пунктир – посредством стандартного алгоритма MODIS.

ний и расчетов по спутниковым данным в 2007 и 2011 гг.

Как видно из табл. 1, совпадение средних, рассчитанных посредством регионального алгоритма и измеренных, очень хорошее: меньше 4% для 2007 г. и порядка 20% для 2011 г. Стандартный алгоритм дает средние значения, которые превышают измеренные в разы: почти в 5 раз в 2007 г. и почти в 3 раза в 2011 г.

Объяснение полученным результатам следующее.

Стандартный алгоритм основан на регрессионном соотношении, полученном по данным измерений, главным образом, для вод открытого океана. Для таких вод характерно определенное отношение между двумя поглощающими компонентами – пигментами фитопланктона и окрашенным органическим (“желтым”) веществом. Для речного стока характерны высокая концентрация желтого вещества и соответственно повышенное поглощение. Алгоритм относит это поглощение на счет пигментов фитопланктона и завышает концентрацию хлорофилла.

Рассмотрим для сравнения, как оба алгоритма отображают сезонные изменения пространствен-

ных распределений концентрации хлорофилла в подповерхностном слое. На рис. 7 и 8 представлены гистограммы распределения значений концентрации хлорофилла по занятой площади в Карском море, рассчитанные в разные месяцы по спутниковым данным MODIS-Aqua в 2007 и 2011 гг. с помощью нового регионального алгоритма и стандартного алгоритма MODIS. Рассматривается акватория Карского моря без Обской Губы и Енисейского залива (северная граница “отсекаемой” области проведена по 73° с.ш. от о-ва Белый на западе до п-ова Таймыр на востоке). Видно, что гистограммы, построенные с помощью регионального алгоритма, гораздо более узкие, чем по стандартному алгоритму MODIS. На гистограммах MODIS видны “хвосты” в сторону больших значений, которых не существует по данным прямых определений и расчета по региональному алгоритму (см. рис. 6).

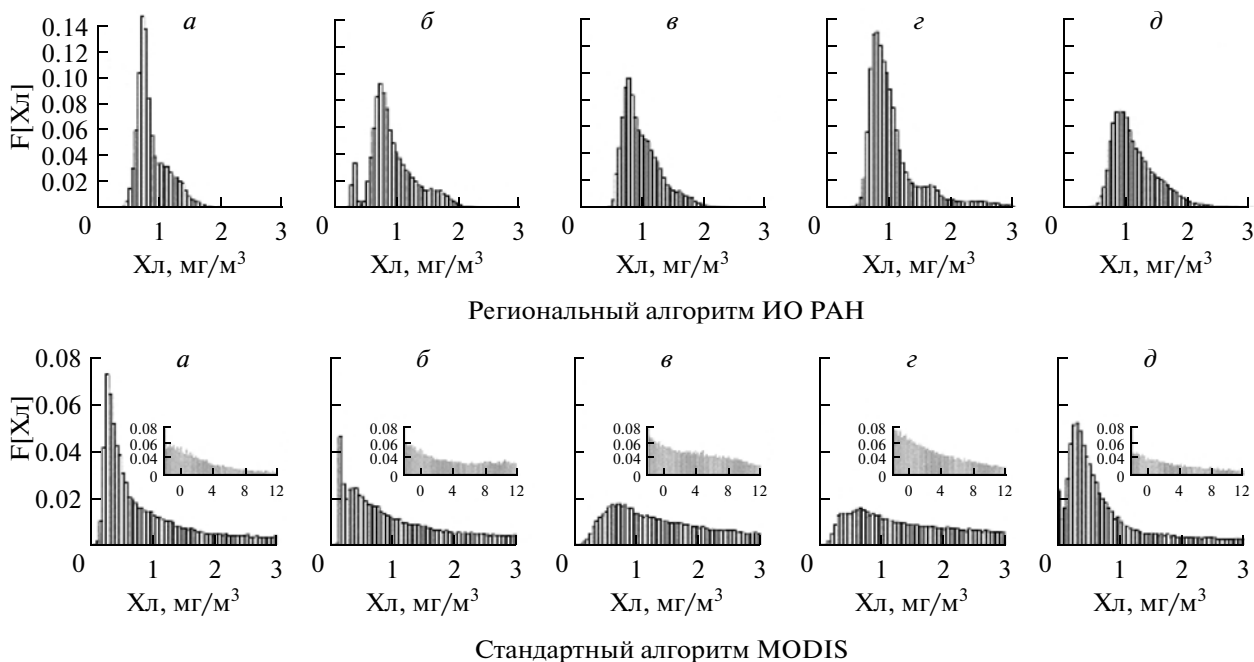
В табл. 2 даны средние по площади Карского моря концентрации хлорофилла, рассчитанные по построенным гистограммам в различные месяцы в 2007 и 2011 гг. по разным алгоритмам.

Из табл. 2 видно, что стандартный алгоритм дает значения концентрации в 2–4 раза выше, чем региональный; а в некоторые месяцы также показывает отличный от регионального сезонный ход (например, в 2007 г. от июня к июлю – увеличение в 1.8 раза). Региональный алгоритм показывает очень небольшие отличия по концентрации в рассматриваемые месяцы, исключая октябрь, но для него надежность оценок уменьшается из-за сокращения площади покрытия акватории спутниковыми данными (см. подписи к рис. 7 и 8).

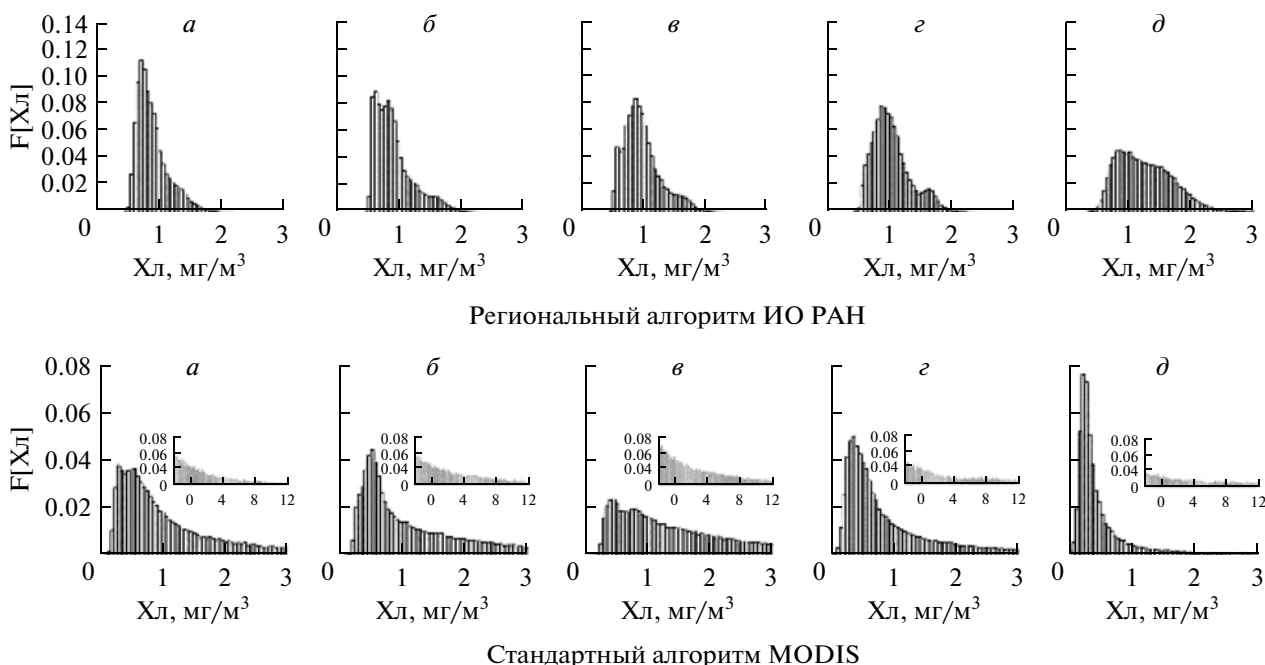
Региональный алгоритм показывает небольшие отличия между средними значениями в 2007 и 2011 гг. – в пределах 2% (исключая октябрь). У

**Таблица 1.** Средние концентрации хлорофилла ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) по маршрутам рейсов 2007 и 2011 гг., измеренные на пробах в подповерхностном слое 0–3 м и рассчитанные по спутниковым данным посредством разработанного регионального алгоритма и стандартного алгоритма MODIS

Год	Прямые определения	Региональный алгоритм	Стандартный алгоритм
2007	1.05	1.01	4.99
2011	1.13	0.90	3.23



**Рис. 7.** Сравнение гистограмм распределения значений концентрации хлорофилла по занятой площади в Каспийском море, рассчитанных в разные месяцы по спутниковым данным MODIS-Aqua в 2007 г. с помощью нового регионального алгоритма и стандартного алгоритма MODIS: *a* – июнь (общая площадь покрытия спутниковыми данными =  $4.0 \times 10^5$  км<sup>2</sup>); *б* – июль ( $6.7 \times 10^5$  км<sup>2</sup>); *в* – август ( $7.4 \times 10^5$  км<sup>2</sup>); *г* – сентябрь ( $7.4 \times 10^5$  км<sup>2</sup>); *д* – октябрь ( $5.5 \times 10^5$  км<sup>2</sup>).



**Рис. 8.** Сравнение гистограмм распределения значений концентрации хлорофилла по занятой площади в Каспийском море, рассчитанных в разные месяцы по спутниковым данным MODIS-Aqua в 2011 г. с помощью нового регионального алгоритма ИО РАН и стандартного алгоритма MODIS: *a* – июнь ( $5.8 \times 10^5$  км<sup>2</sup>); *б* – июль ( $7.1 \times 10^5$  км<sup>2</sup>); *в* – август ( $7.3 \times 10^5$  км<sup>2</sup>); *г* – сентябрь ( $7.3 \times 10^5$  км<sup>2</sup>); *д* – октябрь ( $4.8 \times 10^5$  км<sup>2</sup>).

**Таблица 2.** Средние по площади Карского моря концентрации хлорофилла ( $\text{мг/м}^3$ ), рассчитанные по построенным гистограммам в разные месяцы в 2007 и 2011 гг. по разным алгоритмам

Месяц	2007 г.		2011 г.	
	региональный алгоритм	стандартный алгоритм	региональный алгоритм	стандартный алгоритм
июнь	0.90	2.1	0.91	2.15
июль	0.93	3.8	0.92	2.65
август	0.99	3.9	0.98	3.2
сентябрь	1.03	4.2	1.05	2.6
октябрь	1.15	3.3	1.30	4.35

стандартного алгоритма отличия могут быть до 60% (для сентября).

Средние значения по площади, рассчитанные по региональному алгоритму для сентября (табл. 2), хорошо согласуются со средними, рассчитанными по маршрутам рейсов 2007 и 2011 гг. (табл. 1). Для 2007 г. различие в пределах 2%, для 2011 г. – в пределах 17%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе реализован новый подход к разработке региональных алгоритмов для расчета биооптических параметров вод Карского моря по данным спутниковых сканеров цвета. Суть подхода заключается в максимально возможном использовании всей совокупности имеющихся данных. Этот подход перспективен для Арктического бассейна, где спутниковые наблюдения ограничены часто повторяющейся облачностью и другими неблагоприятными для наблюдений условиями.

Разработка алгоритма основывалась на данных судовых измерений, проведенных в двух комплексных рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш” в сентябре 2007 и 2011 гг., в которых был выполнен большой объем биогеохимических и оптических исследований. По данным 2007 г. удалось вывести регрессионный алгоритм для определения концентрации хлорофилла и подтвердить возможность его использования для данных 2011 г. Показана непригодность использования стандартного алгоритма MODIS для определения концентрации хлорофилла в Карском море, находящемся под сильным влиянием речного стока. Применение разработанного регионального алгоритма для расчета среднемесячных пространственных распределений концентрации хлорофилла в 2007 и 2011 г. и их сезонной изменчивости дало результаты, хорошо согласующиеся с данными прямых определений концентрации хлорофилла и другими данными судовых исследований.

Разработанный алгоритм является на данный момент оптимальным с точки зрения соответствия имеющимся данным прямым определениям концен-

трации хлорофилла. Перспектива дальнейшей верификации и усовершенствования спутникового алгоритма оценки концентрации хлорофилла и других биогеохимических параметров целиком и полностью зависит от проведения новых экспедиционных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология”, гранта Правительства РФ (Договор РГГМУ № 11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 8767.

Данные сканера MODIS-Aqua были получены с сайта NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

Авторы выражают признательность сотрудникам ИО РАН Артемьеву В.А., Гольдину Ю.А. и Шатравину А.В. за помощь в проведении судовых измерений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 1. С. 148–155.
- Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Артемьев В.А., Шеберстов С.В. Оптические характеристики вод Карского моря по судовым и спутниковым наблюдениям // *Океанология*. 2010а. Т. 50. № 5. С. 716–729.
- Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Кравчишина М.Д. Распределение концентрации взвеси в Карском море в сентябре 2007 г. по судовым и спутниковым данным // *Океанология*. 2010б. Т. 50. № 5. С. 842–849.
- Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. М.: Мысль, 1999. 400 с.
- Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Пояров С.Г., Соловьев Д.М. Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 698–708.
- Иванов А.Ю. Введение в океанографию. М.: Мир, 1978. 574 с.

- Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В., Шеберстов С.В.* Региональные алгоритмы расчета по спутниковым данным биооптических характеристик поверхностного слоя моря // *Физические, геологические, и биологические исследования океанов и морей* / Под ред. С.М. Шаповалова. М.: Научный мир, 2010. С. 115–135.
- Флинт М.В.* 54-й экспедиционный рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” в Карское море // *Океанология*. 2010. № 5. С. 677–682.
- Bailey S.W., Werdell P.J.* A multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products // *Rem. Sens. Environ.* 2006. V. 102. P. 12–23.
- EPA Method 445.0. In vitro determination of chlorophyll-a and pheophytin-a in marine and freshwater algae by fluorescence. National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Revision 1.2. September 1997.
- Holm-Hansen O., Riemann B.* Chlorophyll-a determination: improvements in methodology // *Oikos*. 1978. V. 30. P. 438–447.
- Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., Patch J.S.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 1. A semi-analytical model // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. P. 6329–6338.
- Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation: Biogeochemical and bio-optical measurement and data analysis protocols // NASA Goddard Space Flight Center. NASA/TM-2003-211621. Rev. 4. V. 5. 2003.
- Sheberstov S.V., Lukyanova E.A.* A system for acquisition, processing, and storage of satellite and field biooptical data // *Proc. IV Int. Conf. “Current problems in optics of natural waters”*. Nizhny Novgorod. 2007. P. 179–183.
- UNESCO, 1994, Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) core measurements, IOC/SCOR manual and guides. Paris: UNESCO Publ., 1994. № 29. P. 128–134.

## Estimation of Chlorophyll Concentration in the Kara Sea from Data of MODIS-Aqua Satellite Scanner

O. A. Kuznetsova<sup>2, 3</sup>, O. V. Kopelevich<sup>1, 3</sup>, S. V. Sheberstov<sup>1, 3</sup>, V. I. Burenkov<sup>1, 3</sup>,  
A. B. Demidov<sup>1</sup>, S. A. Mocharov<sup>1</sup>

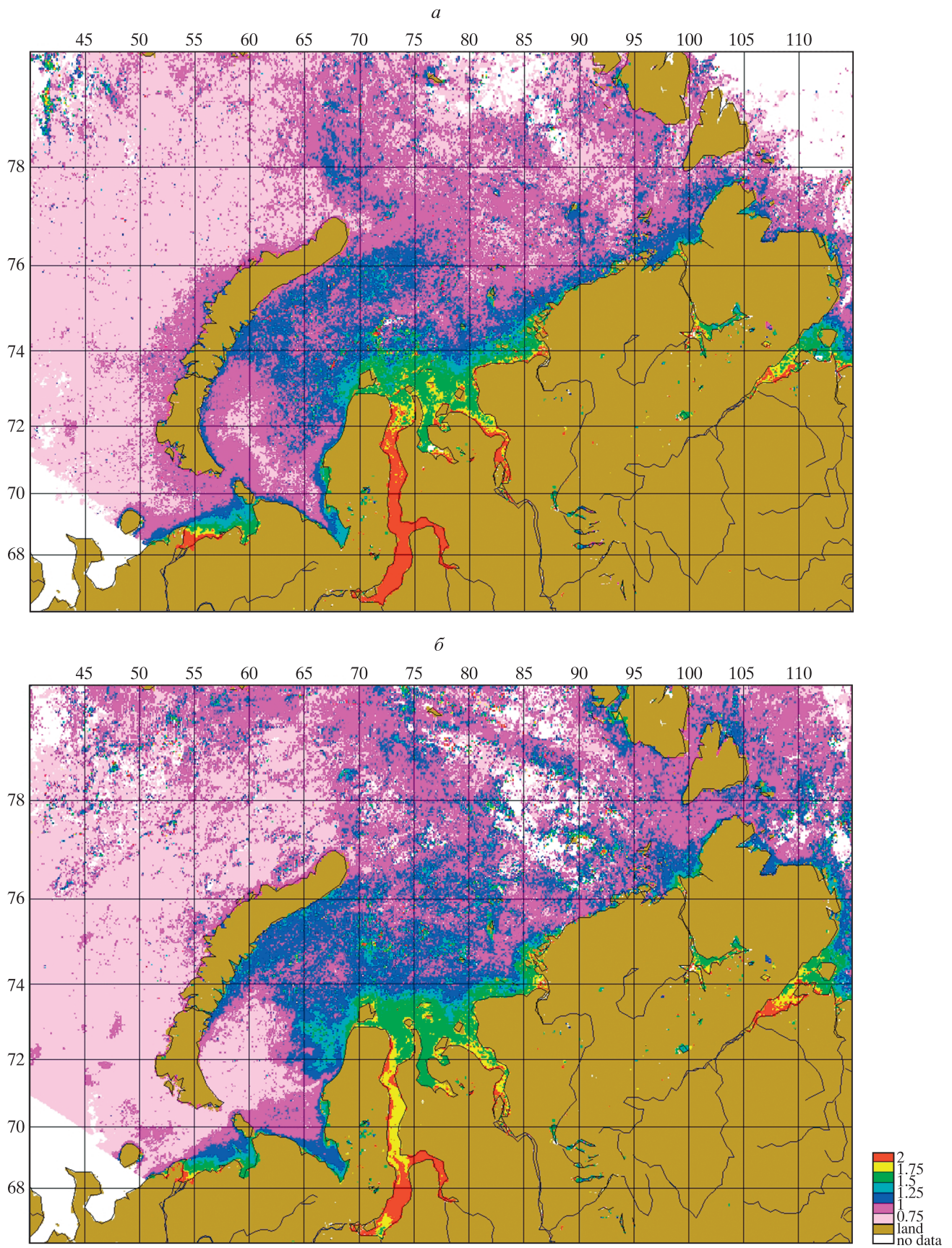
<sup>1</sup>*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow*

<sup>2</sup>*Moscow State University*

<sup>3</sup>*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg*

A new approach is proposed and implemented to development of the regional algorithm for estimation of chlorophyll concentration in the Kara Sea by using satellite color scanner data. The approach takes into account the difficulty of obtaining regular satellite data of acceptable quality in the Arctic region due to poor conditions for satellite observations. Development of the algorithm is based on the data measured in the Kara Sea in two cruises of RV *Akademik Mstislav Keldysh* in September 2007 and 2011. By using the developed algorithm, the mean monthly distributions of chlorophyll concentration in the Kara Sea in September 2007 and 2011 were computed; comparative graphs, showing the changeability of chlorophyll concentration along the ship route, were drawn (from direct determination and calculated by the new and standard MODIS algorithms) as well as histograms of the mean monthly distribution of the areas with different chlorophyll concentration in June–October of both years. The results obtained indicate inapplicability of the MODIS standard algorithm for the Kara Sea, influenced strongly by river run-off. The reasonable agreement between the concentrations derived by the new regional algorithm and the measured ones is observed.

**Keywords:** satellite ocean color, chlorophyll concentration, ship measurements, regional algorithm, spatial distribution, seasonal changes, Kara Sea



**Рис. 5.** Среднемесячные пространственные распределения концентрации хлорофилла-*a* в Карском море в сентябре: *a* – 2007 г. и *b* – 2011 г., – рассчитанные по данным сканера MODIS-Aqua посредством нового регионального алгоритма.