

## Алгоритмы оценки концентрации хлорофилла *a* в море Лаптевых по данным спутниковых сканеров цвета

С. В. Вазюля<sup>1</sup>, Е. А. Аглова<sup>1,2</sup>, И. В. Салинг<sup>1</sup>, А. Б. Демидов<sup>1</sup>, Д. И. Глуховец<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*  
E-mail: vazyulya.sv@ocean.ru

<sup>2</sup> *Московский физико-технический институт (НИУ)*  
*Долгопрудный, Московская обл., 141700, Россия*

В морях, подверженных влиянию речного стока, применение региональных алгоритмов позволяет существенно улучшить точность оценок концентрации хлорофилла *a* по данным дистанционного зондирования. В работе представлены региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла *a* в море Лаптевых по данным спутниковых сканеров цвета MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). Алгоритмы созданы на базе натурных измерений в 2015, 2017 и 2018 гг. Анализ параметров точности расчётной формулы позволил выбрать спектральные каналы для вычисления индекса цвета и критерии отбора спутниковых данных для определения коэффициентов формулы. Показано, что отсутствие отрицательных значений коэффициента яркости моря для любого спектрального канала в видимом диапазоне является маркером хорошего качества спутниковых данных. Точность представленных алгоритмов составила 30 % для вод с концентрацией хлорофилла *a* в диапазоне 0,1–1,5 мг·м<sup>-3</sup>. Для дополнительной валидации полученных алгоритмов использовались данные измерений проточного флуориметра, выполненные как вблизи дельты Лены, так и в малопродуктивных водах. При калибровке данных флуориметрических измерений применялись уравнения множественной линейной регрессии. Это позволило учесть вклад флуоресценции окрашенного растворённого органического вещества в водах, подверженных сильному влиянию речного стока. Средняя относительная ошибка оценок концентрации хлорофилла *a* по спутниковым данным для районов проведения измерений проточным комплексом была менее 25 %.

**Ключевые слова:** региональный алгоритм, концентрация хлорофилла *a*, индекс цвета, MODIS, VIIRS, море Лаптевых, речной сток

Одобрена к печати: 02.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-87-97

### Введение

Концентрация хлорофилла *a* (Chl) — важнейший параметр, характеризующий биомассу фитопланктона, позволяющий проводить мониторинг состояния морских экосистем (Kostianou et al., 2022), рассчитывать первичную продукцию морей и океанов (Демидов и др., 2019а; Li et al., 2024), оценивать количество углерода, содержащегося в морской воде (Siegel et al., 2023). В результате многолетней экспедиционной деятельности мировым научным сообществом накоплен массив данных натурных измерений Chl в различных регионах моря Лаптевых (Ветров и др., 2008; Демидов и др., 2019б; Bienhold et al., 2022; Gonçalves-Araújo et al., 2018; Heim et al., 2014). Эти данные использовались для валидации существующих глобальных и региональных арктических алгоритмов оценки Chl по данным дистанционного зондирования. Согласно публикациям (Ветров и др., 2008; Heim et al., 2014), существующие алгоритмы дают оценки Chl, завышенные как минимум в несколько раз, что объясняется влиянием речного стока. В таких морях использование региональных алгоритмов позволяет значительно улучшить точность оценок Chl (Глуховец, Артемьев, 2017; Vazyulya et al., 2024). Нами найдена только одна статья, относящаяся к морю Лаптевых, где была проверена возможность настройки спутниковых алгоритмов под региональные условия моря Лаптевых (Gonçalves-Araújo et al., 2018).

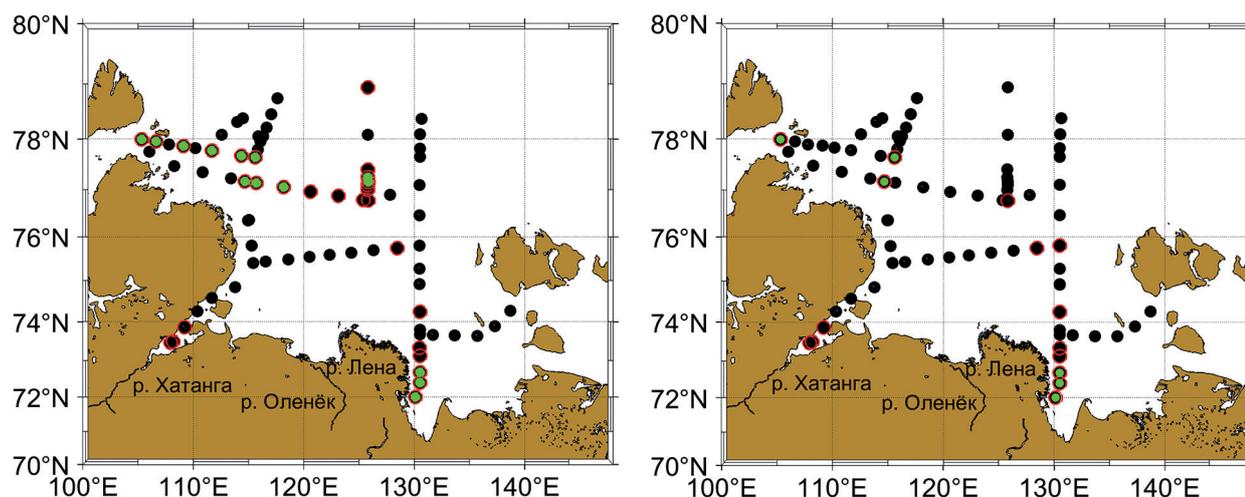
Наша первая попытка разработать региональный алгоритм оценки Chl по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) в море Лаптевых была выпол-

нена в 2024 г. (Вазюля и др., 2024). Основываясь на данных натурных измерений, были разработаны два варианта алгоритма: через индекс цвета  $L\_CI$  и показатель рассеяния назад взвешенным веществом  $L\_BVP$ . Для этого был использован массив данных *in situ*/MODIS с максимальной разницей во времени измерения  $\Delta T_{\max} = 5$  ч. Для валидации применялся массив данных с  $\Delta T_{\max} = 48$  ч. Показано, что стандартный продукт NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) *chl<sub>a</sub>* (<https://www.earthdata.nasa.gov/apt/documents/chlor-a/v1.0>) завышает оценки Chl в 8–10 раз. Был также протестирован региональный алгоритм K13 (Кузнецова и др., 2013), разработанный для Карского моря и использованный при расчёте первичной продукции в море Лаптевых (Демидов и др., 2019а) из-за отсутствия регионального алгоритма для данной акватории. Величины ошибок K13 (средняя относительная ошибка равна 280 %) заметно ниже полученных для стандартного продукта *chl<sub>a</sub>*, но довольно высоки, особенно в малопродуктивных водах.

В настоящей работе получены региональные алгоритмы для оценки Chl по данным спутниковых сканеров цвета MODIS и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) с применением индекса цвета CI (*англ.* Color Index). Проведён детальный анализ зависимости расчётной формулы и её точности от выбора спектральных каналов для CI и критериев отбора используемого массива данных. На базе результатов измерений проточного комплекса выполнена валидация региональных алгоритмов.

## Материалы и методы

Для разработки региональных алгоритмов использовались данные о концентрации хлорофилла *a* Chl (Демидов и др., 2019б, 2020), полученные в трёх рейсах, выполненных Институтом океанологии (ИО РАН) в сентябре 2015, 2017 гг. и августе–сентябре 2018 г. (Флинт и др., 2016, 2018, 2019). Определение концентрации хлорофилла *a* в морской воде проводилось стандартным флуорометрическим методом (Holm-Hansen et al., 1965). Пробы воды отбирались с выбранных горизонтов, фильтровались через стекловолоконные фильтры под вакуумом. Расчёт концентрации хлорофилла *a* проводился по формулам работы (Holm-Hansen, Riemann, 1978). В исследовании использовались данные измерений для поверхностного слоя 0–5 м, выполненные на 90 станциях в различных регионах моря Лаптевых (*рис. 1*). По данным судовых измерений величина Chl в поверхностном слое моря Лаптевых варьировала в диапазоне  $0,04\text{--}2,7\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , среднее значение Chl равно  $0,48$ , медианное —  $0,32\text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ .



*Рис. 1.* Расположение станций, на которых выполнялись судовые измерения Chl. Цветом выделены станции, для которых удалось подобрать данные спутниковых сканеров MODIS (*слева*) и VIIRS (*справа*). Красным цветом отмечены станции, данные для которых использованы для анализа связи между значениями Chl и CI, зелёным — для получения итоговых формул

В настоящей работе использовались данные второго уровня спутниковых сканеров цвета океана MODIS-Aqua, MODIS-Terra и VIIRS-Suomi NPP, полученные на сайте NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Сканер VIIRS-NOAA-20 был запущен в ноябре 2017 г. и имеет спектральные каналы, отличные от VIIRS-Suomi NPP. Данные VIIRS-NOAA-20 не рассматривались в настоящем исследовании, так как они не покрывают весь период получения использованных нами данных натуральных измерений. Обработка спутниковых данных проводилась с помощью программного обеспечения SMCS (*англ.* Satellite Monitoring of Caspian Sea), разработанного в Лаборатории оптики океана ИО РАН (Шеберстов, 2015). Подбор спутниковых данных осуществлялся для ближайшего пикселя к точке *in situ* измерений Chl с интервалом между судовыми и спутниковыми измерениями  $\Delta T$  менее 48 ч. При этом отбраковывались данные, отмеченные флагами CLDICE и STRAYLIGHT. Флаг HISOLZEN позволяет легко отбраковать пиксели с зенитным углом Солнца  $\theta > 70^\circ$ , что снижает вероятность ошибок атмосферной коррекции для отобранных данных. Чтобы набор данных спутниковых измерений для августа – сентября в условиях частой облачности был достаточно представительным, было решено расширить границы допустимых значений  $\theta$  вплоть до  $\theta_{\max} = 75^\circ$ .

Таким образом, удалось подобрать 224 пары данных *in situ*/MODIS и 57 пар *in situ*/VIIRS для 29 и 14 станций соответственно (см. *рис. 1*). Диапазон вариации Chl по данным судовых измерений в этих массивах сократился до  $0,04\text{--}1,7 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , но всё же остался достаточно большим. Медианные значения Chl ( $0,28$  и  $0,64 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ) тоже заметно отличаются от медианы исходного массива ( $0,32 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ), особенно для VIIRS.

Анализ качества спутниковых данных (см. разд. «Результаты») привёл к тому, что для получения формул региональных алгоритмов использовались меньшие по размеру массивы данных. Итоговые массивы состоят из 40 пар данных *in situ*/MODIS (14 станций) и 14 пар *in situ*/VIIRS для 6 станций (см. *рис. 1*). Интервалы вариации Chl для этих массивов сократились до  $0,12\text{--}1,2$  и  $0,15\text{--}1,2 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , а медианные значения Chl увеличились до  $0,31$  и  $1,1 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Для валидации полученных алгоритмов использованы результаты измерений флуориметром ПФД-2, входящим в состав судового проточного измерительного комплекса (Гольдин и др., 2020). Непрерывно на ходу судна прибор регистрирует интенсивность флуоресценции хлорофилла и окрашенного растворённого органического вещества (ОРОВ), индуцированной излучением сверхъярких светодиодов с длинами волн 373 и 522 нм. Пространственное разрешение данных — 50 м. Для пересчёта данных измерений флуориметра в значения Chl использовалась множественная линейная регрессия, связывающая величины Chl со значениями интенсивности флуоресценции хлорофилла и ОРОВ. Первые определялись экстракционным методом на станциях, вторые — по данным, полученным с помощью проточного измерительного комплекса с осреднением  $\pm 1$  км. При таком подходе учёт интенсивности флуоресценции ОРОВ используется для вычета подставки под полосой флуоресценции хлорофилла, возникающей из-за влияния высокого содержания ОРОВ в море Лаптевых.

Безоблачные погодные условия 7 сентября 2015 г. и 24–26 августа 2018 г. в районе проведения измерений проточным комплексом позволили использовать полученные данные для валидации спутниковых оценок Chl. Для исследуемых районов по данным MODIS и VIIRS было рассчитано пространственное распределение Chl с разрешением 2 км и использованием разных вариантов региональных алгоритмов. Для этого выполнено усреднение всех имеющихся данных второго уровня за 7–8 сентября 2015 г. и 24–26 августа 2018 г. Пиксели, отмеченные флагами CLDICE, STRAYLIGHT, HISOLZEN и имеющие отрицательные значения коэффициента яркости моря  $R_{rs}(\lambda_i)$  для любого спектрального канала  $\lambda_i$  в видимом диапазоне 400–700 нм, исключались из рассмотрения. Далее для каждого спутникового пикселя третьего уровня рассчитывалась средняя медианная оценка Chl по данным проточного комплекса. Для полученных таким образом массивов данных определялись величины среднеквадратичного отклонения RMSE (*англ.* Root Mean Square Error) и средней относительной ошибки RE (*англ.* Relative Error).

## Результаты

Для вычисления коэффициентов формулы оценки концентрации хлорофилла *a* через индекс цвета прежде всего надо определиться с массивом данных, на основе которого эти коэффициенты будут рассчитаны. Массив данных должен быть достаточно представительным, а диапазон изменения исследуемой характеристики в идеале должен соответствовать изменчивости этой характеристики в рассматриваемой акватории по данным натурных измерений. При этом надо обеспечить приемлемое качество используемых спутниковых данных. Качество и количество в массиве данных определяется критериями отбора.

На рис. 2 показано изменение коэффициента детерминации  $R^2$  для оценки концентрации хлорофилла *a* по индексам цвета ( $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$  и  $R_{rs}(488)/R_{rs}(547)$ ) в случае использования массивов данных *in situ*/MODIS с разными критериями отбора. Там же можно увидеть, как меняется размер массива данных. В данном случае использовалось три критерия отбора данных: 1) интервал между судовыми и спутниковыми измерениями ограничивался величиной  $\Delta T_{\max}$  в диапазоне от 2 до 48 ч; 2) максимальный допустимый зенитный угол Солнца  $\theta_{\max}$  равен 70 или 75°; 3) наличие или отсутствие отбраковки случаев с отрицательными значениями  $R_{rs}(\lambda_i)$  для любого спектрального канала  $\lambda_i$  в видимом диапазоне 400–700 нм.

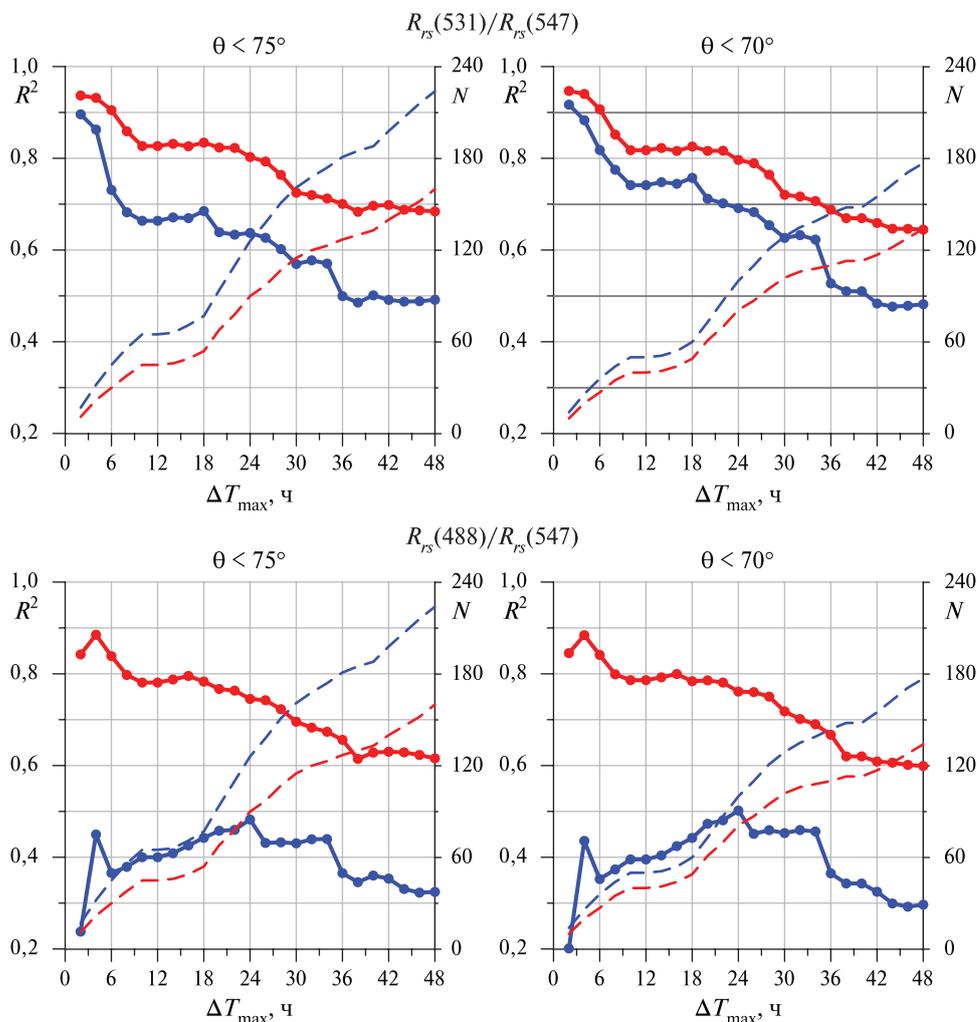
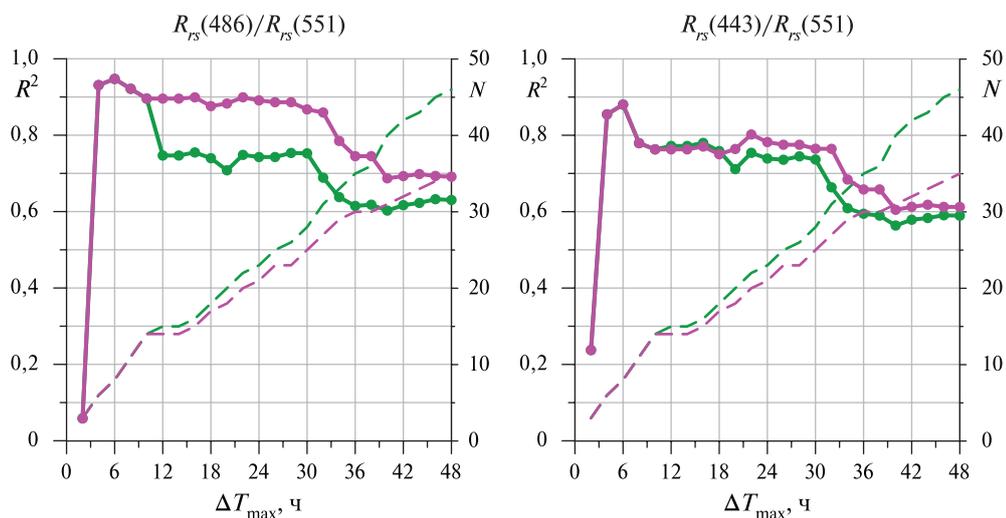


Рис. 2. Коэффициент детерминации  $R^2$  (сплошные линии с кружочками) и количество пар  $N$  (штриховые линии) в зависимости от величины  $\Delta T_{\max}$  для массивов данных *in situ*/MODIS с различными критериями отбора. Синим цветом показаны результаты для массивов данных, полученных без отбраковки отрицательных значений  $R_{rs}(\lambda_i)$ , красным — с отбраковкой. Представлены результаты для индекса цвета  $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$  (вверху) и для  $R_{rs}(488)/R_{rs}(547)$  (внизу)

Как видно из *рис. 2*, для всех способов отбора данных использование индекса цвета  $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$  приводит к более высоким значениям коэффициента детерминации. Это, скорее всего, связано с увеличением вероятности ошибок атмосферной коррекции с уменьшением длины волны (Mograne et al., 2019). Также использование отбраковки случаев с отрицательными  $R_{rs}(\lambda_i)$  всегда приводит к росту  $R^2$ . Особенно это наглядно проявляется для индекса цвета  $R_{rs}(488)/R_{rs}(547)$ , когда без такой фильтрации данных  $R^2$  не превышал 0,5, а после её применения не опускался ниже 0,6. Постепенное повышение порогового значения  $\Delta T_{\max}$  приводит к увеличению размера получаемого массива данных. Величина  $R^2$  при этом может как возрастать, так и уменьшаться для разных диапазонов  $\Delta T_{\max}$  и условий отбраковки данных. Если сосредоточиться на вариантах с  $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$  и отбраковкой отрицательных  $R_{rs}(\lambda_i)$ , то можно заметить, что для данных MODIS независимо от критерия отбора по углу  $\theta$  величина  $R^2$  превышала 0,8 для всех  $\Delta T_{\max} < 24$  ч. Увеличение  $\theta_{\max}$  с  $70$  до  $75^\circ$  практически не влияет на величину  $R^2$ .

Таким образом, в случае применения данных спутникового сканера MODIS для разработки регионального алгоритма в море Лаптевых лучше всего использовать индекс цвета  $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$  и массив данных, полученный после отбраковки отрицательных  $R_{rs}(\lambda_i)$  с  $\Delta T_{\max}$  в диапазоне 6–24 ч. Массивы  $\Delta T_{\max} < 6$  ч содержат слишком мало данных, что уменьшает надёжность получаемых формул. Интервал допустимых величин  $\theta$  можно расширить до  $75^\circ$ .



*Рис. 3.* Коэффициент детерминации  $R^2$  (сплошные линии с кружочками) и количество пар  $N$  (штриховые линии) в зависимости от величины  $\Delta T_{\max}$  для массивов данных *in situ*/VIIRS с различными критериями отбора. Для всех используемых массивов исключены случаи с отрицательными  $R_{rs}(\lambda_i)$ . Зелёным цветом показаны зависимости для массивов данных с  $\theta < 75^\circ$ , розовым — с  $\theta < 70^\circ$ . Представлены результаты для индекса цвета  $R_{rs}(486)/R_{rs}(551)$  (слева) и для  $R_{rs}(443)/R_{rs}(551)$  (справа)

Подобный анализ зависимости величины Chl от индексов цвета  $R_{rs}(443)/R_{rs}(551)$  и  $R_{rs}(486)/R_{rs}(551)$  по данным спутникового сканера VIIRS показал аналогичные результаты. На *рис. 3* изображено изменение величин  $R^2$  для этих двух индексов цвета в зависимости от  $\Delta T_{\max}$  при применении массивов данных *in situ*/VIIRS после отбраковки отрицательных  $R_{rs}(\lambda_i)$ . Как видно из *рис. 3*, использование  $R_{rs}(486)/R_{rs}(551)$  позволяет получить  $R^2$  больше 0,8 для  $\Delta T_{\max}$  в диапазоне 4–32 ч с  $\theta_{\max} = 70^\circ$ . Если не брать во внимание массивы с  $\Delta T_{\max}$  равной 4 и 6 ч, то в случае всех других вариантов подбора спутниковых данных величина  $R^2$  меньше 0,8. Стоит отметить, что даже для  $\theta_{\max} = 75^\circ$  количество пар в массивах достигает 15 только для  $\Delta T_{\max} = 12$  ч. Заметно меньшие массивы данных *in situ*/VIIRS объясняются тем, что в настоящей работе используются данные только радиометра VIIRS-Suomi NPP, работающего на одном спутнике в отличие от MODIS.

На основании вышеизложенного для получения региональных алгоритмов оценки Chl было решено использовать индексы цвета  $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$  для MODIS,  $R_{rs}(486)/R_{rs}(551)$  для VIIRS и массивы, полученные для  $\theta < 70^\circ$  и после отбраковки отрицательных  $R_{rs}(\lambda_i)$  (рис. 4). Из рисунка видно, что при увеличении  $\Delta T_{\max}$  до 48 ч появляются точки, за счёт которых происходит уменьшение коэффициента детерминации линейной регрессии. Но стоит отметить, что линии регрессии, полученные для массивов с разными  $\Delta T_{\max}$ , довольно близки друг к другу. Оценки Chl, сделанные на основе этих регрессий, будут иметь незначительные отличия лишь для случаев с  $\text{Chl} > 1 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Более подробно анализ различий определённых оценок Chl представлен и в разд. «Обсуждение».

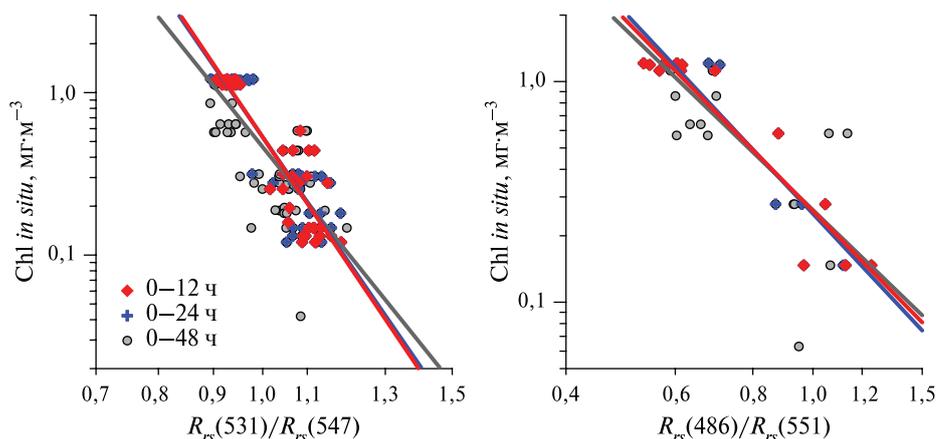


Рис. 4. Сопоставление величин концентрации хлорофилла *a*, измеренных *in situ*, со значениями индекса цвета по данным MODIS (слева) и VIIRS (справа). Красными прямыми линиями показаны линейные регрессии для данных с  $\Delta T_{\max} = 12$  ч, синими —  $\Delta T_{\max} = 24$  ч, серыми —  $\Delta T_{\max} = 48$  ч

Итоговые формулы для обоих сканеров получены на основе массивов данных с  $\Delta T_{\max} = 12$  ч. В случае MODIS алгоритм будем обозначать как L\_M25:

$$\ln(\text{Chl}) = -9,83 \ln \left[ R_{rs}(531) / R_{rs}(547) \right] - 0,632, \quad (1)$$

коэффициент детерминации  $R^2 = 0,83$ . Среднеквадратичная ошибка RMSE равна  $0,14 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , средняя RE составила 31 % на исходном массиве данных ( $\Delta T_{\max} = 12$  ч). При расширении массива до  $\Delta T_{\max} = 48$  ч величина RMSE увеличивается до  $0,25 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , а RE — до 49 %.

Для VIIRS формула алгоритма L\_V25 получена с  $R^2 = 0,90$ :

$$\ln(\text{Chl}) = -2,87 \ln \left[ R_{rs}(486) / R_{rs}(551) \right] - 1,35. \quad (2)$$

Ошибки на массиве данных  $\Delta T_{\max} = 12$  ч составили  $0,19 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$  и 23 %, а для  $\Delta T_{\max} = 48$  ч —  $0,24 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$  и 39 %. Таким образом, обе формулы позволяют делать оценки Chl по данным спутниковых сканеров цвета с приемлемой точностью для акваторий с величинами Chl в диапазоне  $0,1-1,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Результаты валидации формул (1), (2) и полученных ранее алгоритмов L\_CI, L\_VBP (Вазюля и др., 2024) по данным измерений проточного флуориметра в 2015 и 2018 гг. представлены в таблице. В 2015 г. измерения были выполнены вблизи дельты р. Лены. Концентрация Chl при этом была в диапазоне  $0,9-1,4 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Измерения 2018 г. проводились в северо-западной части моря Лаптевых, где концентрация Chl была заметно ниже  $0,2-0,4 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Поэтому оценки ошибок, полученные для этих двух лет, заметно отличаются. В области сильного влияния речного стока наблюдается заметное преимущество алгоритмов, использующих индекс цвета. Например, средняя относительная ошибка этих алгоритмов составляет 8–15 %, тогда как для L\_VBP RE = 47 %. Это, возможно, связано с наличием нефитопланктонной взвеси в этом районе. Стоит также отметить заметное уменьшение точ-

ности оценок Chl по данным VIIRS в этой акватории. Для малопродуктивных вод все рассмотренные алгоритмы имеют очень близкие величины RMSE и RE. В целом валидация по данным, полученным с помощью проточного флуориметра, показала приемлемую точность разработанных региональных алгоритмов, использующих индекс цвета, для двух районов моря Лаптевых с Chl 0,2–0,4 и 0,9–1,4 мг·м<sup>-3</sup>. Для уверенности в точности предлагаемых формул необходимы дальнейшие работы по их валидации с привлечением данных натуральных измерений в других районах моря.

Параметры точности оценок Chl для разных алгоритмов обработки спутниковых данных, полученные в результате валидации по данным измерений проточным флуориметром. Алгоритмы L\_BBP, L\_CI, L\_M25 применялись к данным MODIS, L\_V25 — к данным VIIRS

Дата проведения измерений	RMSE, мг·м <sup>-3</sup>				RE, %			
	L_BBP	L_CI	L_M25	L_V25	L_BBP	L_CI	L_M25	L_V25
7 сентября 2015 г.	0,60	0,13	0,11	0,22	47	9	8	15
24–26 августа 2018 г.	0,09	0,08	0,06	0,07	23	23	19	21

### Обсуждение

При использовании полученных алгоритмов необходимо знать их точность и область применимости. Диапазон изменений Chl в море Лаптевых по данным судовых измерений заметно шире, чем в массиве данных, по которым создавались формулы (1) и (2), особенно это касается максимальных значений Chl. Как было показано ранее, формулы для оценки Chl и параметры их точности зависят от массивов, на базе которых эти формулы были созданы. В ходе анализа различных критериев отбора массивов данных выявлено, что лучше использовать массивы, полученные после отбраковки отрицательных значений  $R_{rs}(\lambda_i)$ , и обоснован выбор спектральных каналов для индекса цвета CI. При этом доступный для анализа массив данных не позволяет определиться с выбором  $\Delta T_{max}$  и  $\theta_{max}$ .

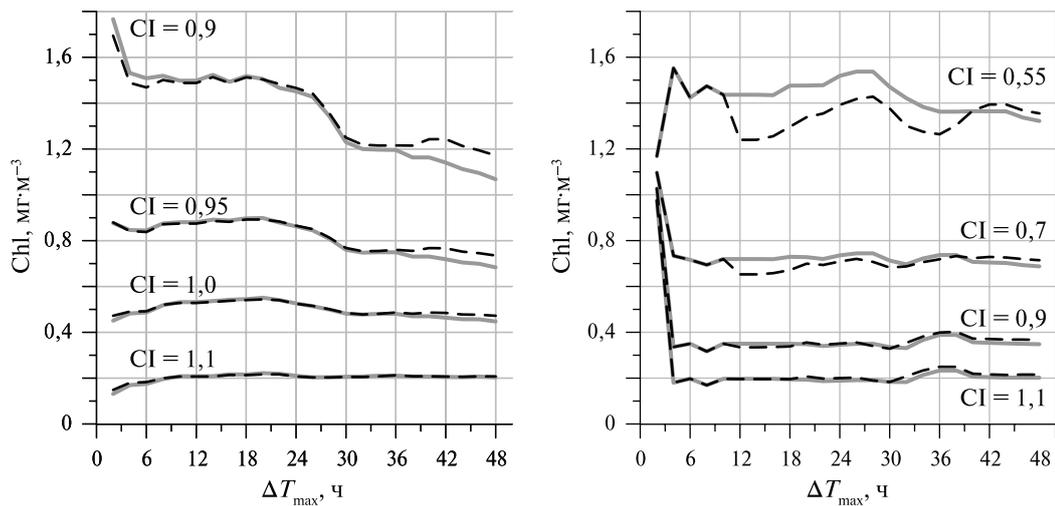


Рис. 5. Оценки Chl в зависимости от величины индекса цвета CI и критериев отбора массивов, по которым была получена формула для MODIS (слева) и VIIRS (справа). Сплошными серыми линиями показаны зависимости для массивов данных с  $\theta_{max} = 70^\circ$ , штриховыми —  $\theta_{max} = 75^\circ$ . Для всех используемых массивов были исключены случаи с отрицательными величинами  $R_{rs}(\lambda_i)$

Рисунок 5 позволяет увидеть, как влияют эти критерии отбора на итоговые оценки Chl. Влияние критериев отбора ( $\Delta T_{max}$  и  $\theta_{max}$ ) заметно только в продуктивных водах с величи-

нами Chl от  $0,8 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$  и более. Не стоит учитывать результаты для экстремальных значений  $\Delta T_{\max} < 6 \text{ ч}$ , когда использованные массивы данных слишком малочисленны. В остальных случаях заметим, что для MODIS наибольшую роль играет выбор  $\Delta T_{\max}$ , а для VIIRS —  $\theta_{\max}$ . Но даже для  $CI = 0,9$  и разных вариантов отбора данных MODIS получаемые оценки Chl будут в пределах  $1,1\text{--}1,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , т.е. максимальное различие составляет  $0,4 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$  или 30 % от средней оценки  $1,3 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Для VIIRS в случае  $CI = 0,9$  оценки Chl остаются в пределах  $1,2\text{--}1,55 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , следовательно, различия тоже составляют порядка 30 %. В более продуктивных водах ( $\text{Chl} > 1,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ ) неоднозначность спутниковых оценок Chl будет возрастать. Доля площади, занимаемая такими водами в море Лаптевых, невелика, например, в июле и августе 2024 г. она составляла 3–5 % от всей акватории моря, для которой удалось получить спутниковые оценки в эти месяцы. Следовательно, сделанный выбор  $\Delta T_{\max}$  и  $\theta_{\max}$  не так критичен для оценок средних величин для всего моря или существенных частей его акватории. Для регионов вблизи устьев больших рек, впадающих в море Лаптевых, важно принимать во внимание увеличение вероятности ошибок оценок Chl, получаемых по спутниковым данным с помощью предложенных алгоритмов.

Стоит отметить, что *рис. 5* позволяет легко сравнить оценки Chl, сделанные с помощью  $L_{CI}$  и  $L_{M25}$ , для которых коэффициенты расчётных формул отличаются. Так как первый получен по массиву данных *in situ*/MODIS с  $\Delta T_{\max} = 5 \text{ ч}$ , а второй с  $\Delta T_{\max} = 12 \text{ ч}$ , то различия оценок Chl по этим алгоритмам будут незначительны. Этот вывод подтверждает и валидация на основе данных измерений проточным флуориметром (см. *таблицу*).

## Выводы

На базе данных судовых измерений концентрации хлорофилла созданы региональные алгоритмы для оценки Chl по данным MODIS и VIIRS в море Лаптевых. Выполнен подробный анализ точности расчётной формулы в зависимости от выбора спектральных каналов и критериев отбора используемого массива спутниковых данных. В результате были выбраны оптимальные индексы цвета:  $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$  для MODIS и  $R_{rs}(486)/R_{rs}(551)$  для VIIRS. Показано, что отрицательные значения  $R_{rs}(\lambda_i)$  для любого спектрального канала  $\lambda_i$  в видимом диапазоне являются простым и удобным маркером низкого качества спутниковых данных. Продемонстрировано, что расширение допустимых зенитных углов Солнца до  $\theta_{\max} = 75^\circ$  не приводит к снижению качества используемых корреляционных связей. Увеличение массива данных на 10–20 % важно для арктического региона, где в условиях низкого Солнца и частой облачности каждое подходящее спутниковое измерение значимо. Точность итоговых формул (1) и (2) оценивается как 30 % для вод с величинами Chl в диапазоне  $0,1\text{--}1,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Валидация на базе данных измерений, полученных с помощью проточного комплекса, подтвердила эту оценку: средняя относительная ошибка менее 25 %. Кроме того, показана ненадёжность алгоритма  $L_{BBP}$  в районе вблизи дельты р. Лены. В данном алгоритме величина Chl рассчитывается через показатель рассеяния назад взвесью (Вазюля и др., 2024), и выявленные ошибки, вероятно, объясняются наличием нефитопланктонной взвеси.

Как показано в разд. «Обсуждение», неоднозначность спутниковых оценок Chl для предложенных формул будет возрастать в более продуктивных водах. Эту особенность региональных алгоритмов следует учитывать для продуктивных регионов с  $\text{Chl} > 1,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ , особенно вблизи устьев рек, впадающих в море Лаптевых.

Исследование выполнено в рамках проекта, финансируемого грантом Российского научного фонда № 25-27-00346 «Создание региональных алгоритмов для мониторинга биооптических характеристик моря Лаптевых по данным спутниковых сканеров цвета», <https://rscf.ru/project/25-27-00346/>.

## Литература

1. Вазюля С. В., Салинг И. В., Демидов А. Б., Глуховец Д. И. Региональный алгоритм оценки концентрации хлорофилла в море Лаптевых по данным MODIS // Международ. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: сб. ст. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2024. С. С1–С4.
2. Ветров А. А., Романкевич Е. А., Беляев Н. А. Хлорофилл, первичная продукция, потоки и баланс органического углерода в море Лаптевых // Геохимия. 2008. № 10. С. 1122–1130.
3. Глуховец Д. И., Артемьев В. А. Спутниковые наблюдения распространения речного стока в море Лаптевых // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 175–184. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-175-184.
4. Гольдин Ю. А., Глуховец Д. И., Гуреев Б. А. и др. Судовой проточный комплекс для измерения биооптических и гидрологических характеристик морской воды // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 814–822. DOI: 10.31857/S0030157420040103.
5. Демидов А. Б., Шеберстов С. В., Гагарин В. И. (2019а) Сезонная изменчивость и оценка годовой величины первичной продукции фитопланктона в море Лаптевых по данным сканера MODIS-AQUA // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 48–65.
6. Демидов А. Б., Гагарин В. И., Арашкевич Е. Г. и др. (2019б) Пространственная изменчивость первичной продукции и хлорофилла в море Лаптевых в августе–сентябре // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 755–770. DOI: 10.31857/S0030-1574595755-770.
7. Демидов А. Б., Гагарин В. И., Артемьев В. А. и др. Вертикальная изменчивость первичной продукции и характеристики подповерхностного хлорофильного максимума в море Лаптевых в августе–сентябре 2015, 2017 и 2018 гг. // Океанология. 2020. Т. 60. № 2. С. 216–232. DOI: 10.31857/S0030157420010062.
8. Кузнецова О. А., Копелевич О. В., Шеберстов С. В. и др. Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-Aqua // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 5. С. 21–31. DOI: 10.7868/S0205961413050023.
9. Флинт М. В., Поярков С. Г., Римский-Корсаков Н. А. Экосистемы Российской Арктики-2015 (63-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 499–501. DOI: 10.7868/S0030157416030060.
10. Флинт М. В., Поярков С. Г., Римский-Корсаков Н. А. Экосистемы морей сибирской Арктики — 2017 (69-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // Океанология. 2018. Т. 58. № 2. С. 331–333. DOI: 10.7868/S0030157418020168.
11. Флинт М. В., Поярков С. Г., Римский-Корсаков Н. А., Мирошников А. Ю. Экосистемы морей сибирской Арктики — 2018 (72-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 506–509. DOI: 10.31857/S0030-1574593506-509.
12. Шеберстов С. В. Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 154–161.
13. Bienhold C., Schourup-Kristensen V., Krumpen T. et al. Effects of sea ice retreat and ocean warming on the Laptev Sea continental slope ecosystem (1993 vs 2012) // *Frontiers in Marine Science*. 2022. V. 9. Article 1004959. DOI: 10.3389/fmars.2022.1004959.
14. Gonçalves-Araujo R., Rabe B., Peeken I., Bracher A. High colored dissolved organic matter (CDOM) absorption in surface waters of the central-eastern Arctic Ocean: Implications for biogeochemistry and ocean color algorithms // *PLoS ONE*. 2018. V. 13. Iss. 1. Article e0190838. DOI: 10.1371/journal.pone.0190838.
15. Heim B., Abramova E., Doerffer R. et al. Ocean colour remote sensing in the Southern Laptev Sea: evaluation and applications // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. Iss. 15. P. 4191–4210. DOI: 10.5194/bg-11-4191-2014.
16. Holm-Hansen O., Riemann B. Chlorophyll *a* determination: improvements in methodology // *Oikos*. 1978. V. 30. No. 3. P. 438–447. DOI: 10.2307/3543338.
17. Holm-Hansen O., Lorenzen C. J., Holmes R. W., Strickland J. D. H. Fluorometric determination of chlorophyll // *J. du Conseil*. 1965. V. 30. Iss. 1. P. 3–15. DOI: 10.1093/icesjms/30.1.3.
18. Kostianoy A. G., Lavrova O. Y., Storchkov A. Y. Satellite instrumentation and technique for monitoring of seawater quality // *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management*. Berlin: Springer, 2022. P. 79–109. DOI: 10.1007/978-3-031-08262-7\_5.
19. Li J., Matsuoka A., Pang X. et al. Performance of algorithms for retrieving chlorophyll *a* concentrations in the Arctic Ocean: Impact on primary production estimates // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. Iss. 5. Article 892. DOI: 10.3390/rs16050892.
20. Mognane M. A., Jamet C., Loisel H. et al. Evaluation of five atmospheric correction algorithms over French optically-complex waters for the Sentinel-3A OLCI ocean color sensor // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Iss. 6. Article 668. DOI: 10.3390/rs11060668.

21. Siegel D. A., DeVries T., Cetinic I., Bisson K. M. Quantifying the ocean's biological pump and its carbon cycle impacts on global scales // *Annual Review of Marine Science*. 2023. V. 15. P. 329–356. DOI: 10.1146/annurev-marine-040722-115226.
22. Vazyulya S. V., Sahling I. V., Glukhovets D. I., Demidov A. B. Regional algorithms for chlorophyll concentration estimation in the Kara Sea from MODIS ocean color data // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2024. V. 37. P. S135–S143. DOI: 10.1134/S1024856024701641.

## Algorithms for chlorophyll *a* concentration estimation in the Laptev Sea using satellite ocean color data

S. V. Vazyulya<sup>1</sup>, E. A. Aglova<sup>1,2</sup>, I. V. Sahling<sup>1</sup>, A. B. Demidov<sup>1</sup>, D. I. Glukhovets<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: vazyulya.sv@ocean.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny  
Moscow Region 141700, Russia

In seas affected by river runoff, the use of regional algorithms can significantly improve the accuracy of remotely sensed chlorophyll *a* concentration estimates. The paper presents regional algorithms for assessing the concentration of chlorophyll *a* in the Laptev Sea using data from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) satellite ocean color scanners. The algorithms are created on the basis of shipboard measurements taken during cruises in 2015, 2017 and 2018. Analysis of the accuracy parameters of the computation formula made it possible to select spectral channels for calculating the color index and criteria for selecting satellite data to determine the formula coefficients. It is shown that the absence of negative values of remote sensing reflectance for any spectral channel in the visible range is a good quality marker for satellite data. The accuracy of the presented algorithms is 30 % for waters with chlorophyll *a* concentration in the range of 0.1–1.5 mg·m<sup>-3</sup>. For additional validation of the obtained algorithms, flow-through fluorimeter measurement data were used. Measurements were made both near the Lena River delta and in low-productivity waters. Multiple linear regression equations were used to calibrate the fluorimetric measurement data. This made it possible to take into account the contribution of fluorescence of colored dissolved organic matter in waters strongly influenced by river runoff. The average relative error of chlorophyll *a* concentration satellite estimates for the regions of fluorimetric measurements is less than 25 %.

**Keywords:** regional algorithm, chlorophyll *a* concentration, color index, MODIS, VIIRS, Laptev Sea, river runoff

Accepted: 02.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-87-97

## References

1. Vazyulya S. V., Sahling I. V., Demidov A. B., Glukhovets D. I., Regional algorithm for assessing chlorophyll concentration in the Laptev Sea from MODIS data, *Mezhdunarodnyi simpozium "Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery": sbornik statei* (Intern. Symp. "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics": Book of articles), Tomsk: Izd. IOA SO RAN, 2024, pp. C1–C4 (in Russian).
2. Vetrov A. A., Romankevich E. A., Belyaev N. A., Chlorophyll, primary production, fluxes and balance of organic carbon in the Laptev Sea, *Geochemistry International*, 2008, V. 46, No. 10, pp. 1055–1063, DOI: 10.1134/S0016702908100091.
3. Glukhovets D. I., Artemiev V. A., Satellite observations of the river runoff distribution in the Laptev Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 1, pp. 175–184 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-175-184.

4. Goldin Y. A., Glukhovets D. I., Gureev B. A. et al., Shipboard flow-through complex for measuring bio-optical and hydrological seawater characteristics, *Oceanology*, 2020, V. 60, No. 5, pp. 713–720, DOI: 10.1134/S0001437020040104.
5. Demidov A. B., Sheberstov S. V., Gagarin V. I. (2019a), Seasonal variability and annual Laptev Sea phytoplankton primary production using MODIS-Aqua data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 6, pp. 48–65 (in Russian).
6. Demidov A. B., Gagarin V. I., Arashkevich E. G. et al. (2019b), Spatial variability of primary production and chlorophyll in the Laptev Sea in August–September, *Oceanology*, 2019, V. 59, No. 5, pp. 678–691, DOI: 10.1134/S0001437019050047.
7. Demidov A. B., Gagarin V. I., Artemiev V. A. et al., Vertical variability of primary production and features of the subsurface chlorophyll maximum in the Laptev Sea in August–September, 2015, 2017, and 2018, *Oceanology*, 2020, V. 60, No. 2, pp. 189–204, DOI: 10.1134/S0001437020010063.
8. Kuznetsova O. A., Kopelevich O. V., Sheberstov S. V. et al., Estimation of chlorophyll concentration in the Kara Sea from data of MODIS Aqua satellite scanner, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 5, pp. 21–31 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961413050023.
9. Flint M. V., Poyarkov S. G., Rymisky-Korsakov N. A., Ecosystems of the Russian Arctic-2015 (63<sup>rd</sup> Cruise of the research vessel Akademik Mstislav Keldysh), *Oceanology*, 2016, V. 56, No. 3, pp. 459–461, DOI: 10.1134/S0001437016030061.
10. Flint M. V., Poyarkov S. G., Rymisky-Korsakov N. A., Ecosystems of the Siberian Arctic Seas-2017 (Cruise 69 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh), *Oceanology*, 2018, V. 58, No. 2, pp. 315–318, DOI: 10.1134/S0001437018020042.
11. Flint M. V., Poyarkov S. G., Rymisky-Korsakov N. A., Miroshnikov A. Yu., Ecosystems of the Siberian Arctic Seas 2018 (Cruise 72 of the R/V Akademik Mstislav Keldysh), *Oceanology*, 2019, V. 59, No. 3, pp. 460–463, DOI: 10.1134/S0001437019030056.
12. Sheberstov S. V., A system for batch processing of oceanographic satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 6, pp. 154–161 (in Russian).
13. Bienhold C., Schourup-Kristensen V., Krumpen T. et al., Effects of sea ice retreat and ocean warming on the Laptev Sea continental slope ecosystem (1993 vs 2012), *Frontiers in Marine Science*, 2022, V. 9, Article 1004959, DOI: 10.3389/fmars.2022.1004959.
14. Gonçalves-Araujo R., Rabe B., Peeken I., Bracher A., High colored dissolved organic matter (CDOM) absorption in surface waters of the central-eastern Arctic Ocean: Implications for biogeochemistry and ocean color algorithms, *PLoS ONE*, 2018, V. 13, Iss. 1, Article e0190838, DOI: 10.1371/journal.pone.0190838.
15. Heim B., Abramova E., Doerffer R. et al., Ocean colour remote sensing in the Southern Laptev Sea: evaluation and applications, *Biogeosciences*, 2014, V. 11, Iss. 15, pp. 4191–4210, DOI: 10.5194/bg-11-4191-2014.
16. Holm-Hansen O., Riemann B., Chlorophyll *a* determination: improvements in methodology, *Oikos*, 1978, V. 30, No. 3, pp. 438–447, DOI: 10.2307/3543338.
17. Holm-Hansen O., Lorenzen C. J., Holmes R. W., Strickland J. D. H., Fluorometric determination of chlorophyll, *J. du Conseil*, 1965, V. 30, Iss. 1, pp. 3–15, DOI: 10.1093/icesjms/30.1.3.
18. Kostianoy A. G., Lavrova O. Y., Stochkov A. Y., Satellite instrumentation and technique for monitoring of seawater quality, In: *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management*, Berlin: Springer, 2022, pp. 79–109, DOI: 10.1007/978-3-031-08262-7\_5.
19. Li J., Matsuoka A., Pang X. et al., Performance of algorithms for retrieving chlorophyll *a* concentrations in the Arctic Ocean: Impact on primary production estimates, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, Iss. 5, Article 892, DOI: 10.3390/rs16050892.
20. Mognane M. A., Jamet C., Loisel H. et al., Evaluation of five atmospheric correction algorithms over French optically-complex waters for the Sentinel-3A OLCI ocean color sensor, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, Iss. 6, Article 668, DOI: 10.3390/rs11060668.
21. Siegel D. A., DeVries T., Cetinic I., Bisson K. M., Quantifying the ocean’s biological pump and its carbon cycle impacts on global scales, *Annual Review of Marine Science*, 2023, V. 15, pp. 329–356, DOI: 10.1146/annurev-marine-040722-115226.
22. Vazyulya S. V., Sahling I. V., Glukhovets D. I., Demidov A. B., Regional algorithms for chlorophyll concentration estimation in the Kara Sea from MODIS ocean color data, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2024, V. 37, pp. S135–S143, DOI: 10.1134/S1024856024701641.