Алгоритмы оценки концентрации взвеси в море Лаптевых по данным спутниковых сканеров цвета

С. В. Вазюля, Д. Н. Дерягин, М. Д. Кравчишина, З. Ю. Реджепова

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: vasyulya.sv@ocean.ru

Глобальное потепление способствует увеличению поступления взвешенного вещества в воды арктических морей. Спутниковый мониторинг с использованием калиброванных по данным натурных измерений алгоритмов обеспечивает достоверное отслеживание происходящих изменений. В работе представлены региональные алгоритмы оценки концентрации взвешенного вещества в верхнем слое моря Лаптевых по данным дистанционного зондирования. Качество и надёжность алгоритмов обеспечены использованием результатов судовых измерений концентрации взвеси и коэффициентов яркости моря, выполненных в 2015, 2017 и 2018 гг. Моделирование на основе гидрооптических измерений в районах моря с разным содержанием жёлтого вещества и взвеси позволило выбрать лучший алгоритм для определения показателя рассеяния назад взвесью. Этим алгоритмом является QAA (*англ.* Quasi-Analytical Algorithm), который обеспечивает относительную точность восстановления 18–22 %. Итоговые формулы для расчёта концентрации взвешенного вещества получены по данным измерений спектров коэффициента яркости моря *in situ*, что позволило исключить влияние ошибок атмосферной коррекции. Валидация по данным второго и третьего уровня спутниковых сканеров MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) показала, что предложенные формулы обеспечивают оценку концентрации взвеси с относительной погрешностью 30–45 % при временном интервале между спутниковыми и натурными измерениями не более одних суток. Выполнен анализ абсолютных ошибок алгоритмов для оценки концентрации взвеси по спутниковым данным. В приустьевых районах среднеквадратичная ошибка составляет около 5 мг/л. В более прозрачных водах, где по данным прямых измерений концентрация взвеси не превышает 0,35 мг/л, среднеквадратичная ошибка снижается до 0,1 мг/л.

Ключевые слова: региональный алгоритм, концентрация взвеси, показатель рассеяния назад взвесью, QAA, HydroLight, MODIS, VIIRS, море Лаптевых

Одобрена к печати: 30.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-22-34

Введение

Взвешенное вещество в толще моря участвует в глобальном переносе вещества, поэтому для понимания хода современного осадконакопления необходимо знать закономерности распределения взвешенного вещества в море. В составе водной взвеси выделяются две основные группы веществ: литогенное аллохтонного генезиса (терригенное) и биогенное преимущественно автохтонного происхождения, которое представлено остатками живых организмов и детритом (Лисицын, 2014). Поступление терригенного взвешенного вещества обеспечивается двумя основными процессами: разрушением побережья, сложенного многолетнемёрзлыми породами, и выносом материала речным стоком. Интенсификация таяния многолетней мерзлоты на суше и термоабразии берегов вследствие потепления приводит к увеличению поступления взвешенного вещества в воды арктических морей (Chalov, Ivanov, 2023; Günther et al., 2013; Rusakov et al., 2025).

Благодаря активной экспедиционной деятельности мировое научное сообщество располагает достаточно разнообразным, но не очень многочисленным массивом натурных измерений концентрации взвешенного вещества TSM (*англ.* Total Suspended Matter) в море Лаптевых (Буренков и др., 1997; Колтовская, Немировская, 2023; Чаркин и др., 2015; Heim et al., 2014; Wegner et al., 2013). Оценки весовой концентрации взвеси получены двумя способами: прямым (фильтрация проб морской воды) и косвенным (оптические методы измерений). При

этом оптические измерения (Буренков и др., 1997; Wegner et al., 2013) были откалиброваны по данным прямых измерений. Основные задачи проведённых исследований — изучение влияния стока р. Лены на пространственное распределение взвеси в море Лаптевых и выявление гидрометеорологических условий, влияющих на распространение речного стока. Также определялись вертикальные потоки взвеси и её состав. Хотя только в отдельных работах привлекались данные дистанционного зондирования (Heim et al., 2014; Wegner et al., 2013), именно совместное использование спутниковых и натурных данных открывает возможности для мониторинга исследуемой акватории на протяжении длительного времени с высоким временным и пространственным разрешением (Копелевич и др., 2018; Лисицин и др., 2000). Лишь в одной работе, посвящённой морю Лаптевых, был предложен региональный алгоритм оценки концентрации взвеси по данным спутникового сканера MERIS (*англ.* MEdium Resolution Imaging Spectrometer) (Heim et al., 2014). При этом использовался специальный алгоритм атмосферной коррекции, разработанный для прибрежных вод.

В 2025 г. были предприняты первые попытки разработать региональные алгоритмы оценки TSM по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) в море Лаптевых (Вазюля и др., 2025а, б). При этом использовались прямые определения TSM и величины показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}, рассчитанные по соответствующим спутниковым данным. Применялись два способа получения b_{bp} по спутниковым данным: $b_{bp–SIO}$ вычислялся алгоритмом, разработанным в Институте океанологии (ИО РАН) для Баренцева моря (Burenkov, Sheberstov, 2013), $b_{bp–QAA}$ — полуаналитическим алгоритмом QAA (*англ.* Quasi-Analytical Algorithm) (Lee et al., 2002). Оба варианта расчёта b_{bp} дали возможность получить формулы для оценки TSM с близкими метриками точности. Имеющиеся данные не позволили уверенно выбрать формулу и способ вычисления b_{bp}. Было замечено существенное ухудшение в точности оценки TSM при использовании данных MODIS, но причины этого не были выяснены.

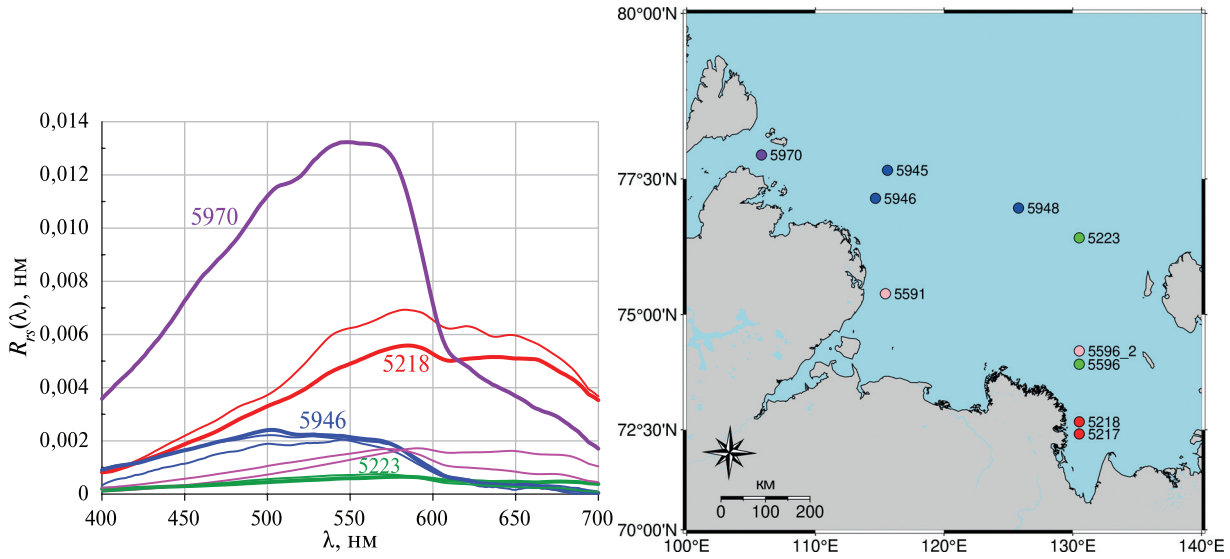
При разработке алгоритма в настоящей работе вместо спутниковых данных применялись величины коэффициента яркости моря, измеренные *in situ*, а также результаты моделирования. Это позволило определить способ расчёта b_{bp} и получить алгоритм оценки TSM, не зависящий от ошибок атмосферной коррекции. Выполнен анализ точности предложенного алгоритма в случае использования данных дистанционного зондирования.

Материалы и методы

Данные натурных измерений в море Лаптевых получены в трёх рейсах, выполненных Институтом океанологии в сентябре 2015 и 2017 гг., а также в августе – сентябре 2018 г. (Флинт и др., 2016, 2018, 2019). Отбор проб морской воды для определения концентрации взвешенного в водной толще вещества проводился с помощью судовых зондирующих систем, оснащённых батометрами Нискина. Каждую пробу пропускали под вакуумом через предварительно взвешенные ядерные фильтры с порами размером 0,45 мкм. В лаборатории после взвешивания ядерных фильтров с отфильтрованным веществом определяли суммарное количество материала в каждой пробе для расчёта концентрации взвеси в мг/л. В работе использованы данные измерений TSM для поверхностного слоя 0 м, выполненные на 37 станциях в различных регионах моря Лаптевых. По данным судовых измерений величины TSM в поверхностном слое моря Лаптевых находятся в диапазоне 0,07–16,2 мг/л, среднее значение равно 1,48 мг/л, медиана — 0,28 мг/л.

Натурные измерения спектров яркости моря $R_{rs}(\lambda)$ были выполнены с помощью плавающего спектрорадиометра (Артемьев и др., 2000). Спектральный диапазон измерений — от 400 до 700 нм, разрешение — 2 нм, относительная погрешность измерений — 5 %. В настоящем исследовании использованы спектры $R_{rs}(\lambda)$, полученные *in situ* на 10 станциях в различных регионах моря, на которых, в дополнение к оптическим измерениям, проводились прямые определения концентрации взвеси (*рис. 1*). Значения TSM для этих станций находятся

в достаточно большом диапазоне 0,14–7,8 мг/л, среднее значение составило 1,53 мг/л, медиана — 0,27 мг/л. Это свидетельствует о репрезентативности данной выборки по сравнению с общим массивом данных прямых определений концентрации взвешенного вещества.



а *б*

Рис. 1. Спектры коэффициента яркости моря R_{rs}, измеренные *in situ* в море Лаптевых (*а*). Расположение станций, на которых проводились оптические измерения (*б*). Номера станций указаны для спектров, использованных в модельных расчётах (пояснения в тексте)

Стоит отметить, что спектры $R_{rs}(\lambda)$ для отобранных станций демонстрируют значительную изменчивость как по форме, так и по амплитуде. Причиной наблюдаемых различий оказывается неодинаковое содержание двух ключевых оптически активных компонентов: окрашенного растворённого органического вещества (ОРОВ) и взвеси минерального происхождения. На *рис. 1* цветом выделены различные группы спектров. Для спектров, на основе которых выполнялись модельные расчёты, подписаны номера станций; соответствующие пояснения приведены ниже.

Алгоритмы для оценки концентрации взвеси по данным дистанционного зондирования базируются на корреляции этой характеристики с показателем рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} (Копелевич и др., 2018). Для валидации алгоритмов определения b_{bp} были привлечены результаты моделирования спектров R_{rs} с помощью программы HydroLight (Mobley, 1994). Для этого сначала выполнена настройка гидрооптической модели HydroLight на базе данных натурных измерений. Процедура подбора оптимальных параметров модели подробно описана в статье (Дерягин и др., 2024). Первичные гидрооптические характеристики для четырёх компонент определялись таким образом, чтобы модельный спектр коэффициента яркости моря наилучшим образом соответствовал измеренному. Кроме чистой воды задавались оптические характеристики фитопланктона (через концентрацию хлорофилла *a*), показателя поглощения ОРОВ (через $a_g^* = a_g(440)$) и минеральной взвеси (через $b_{bp}^* = b_{bp}(555)$). Для упрощения модели изменчивость параметров с глубиной не учитывалась. Параметры модели a_g^* и b_{bp}^* указаны в *табл. 1*. Концентрация хлорофилла *a* для модельных расчётов соответствовала результатам измерений в поверхностном слое воды.

Настройка гидрооптической модели была выполнена для четырёх станций (5218, 5223, 5946, 5970), для которых измеренные *in situ* спектры R_{rs} существенно различаются по форме и амплитуде (см. *рис. 1*). Наблюдаемые отличия объясняются разным содержанием двух главных оптически активных компонентов — ОРОВ и минеральной взвеси. Для измерений на станциях 5218, 5223, выполненных в водах, подверженных сильному влиянию речного стока

р. Лены, величина $a_g^* \geqslant 1\,\text{м}^{-1}$. При этом они существенно различаются по содержанию минеральной взвеси. На станции 5218 величина b_{bp}^* в 15 раз выше, чем на станции 5223, а концентрация взвеси в поверхностном слое — в 28 раз больше. Для станции 5970 характерно высокое содержание взвеси, но величина a_g^* заметно меньше. В случае станции 5946 наблюдалось наименьшее содержание ОРОВ и взвеси.

Таблица 1. Параметры для расчётов программой HydroLight

Станция	b_{bp}^*, м$^{-1}$	Диапазон b_{bp}, м$^{-1}$	a_g^*, м$^{-1}$	Диапазон a_{g}, м$^{-1}$
5218	0,060	0,0050–0,1000	2,50	0,50–5,00
5223	0,004	0,0010–0,0086	1,00	0,20–2,50
5946	0,004	0,0020–0,0100	0,15	0,05–0,50
5970	0,030	0,0100–0,0800	0,22	0,10–0,60

Вклад фитопланктонной взвеси в поглощение и рассеяние для всех рассмотренных случаев был несущественным: изменение концентрации хлорофилла *a* в несколько раз, по сравнению с измеренной, практически не влияло на результирующий спектр R_{rs}. Для получения наборов модельных спектров R_{rs} были проведены расчёты попеременным варьированием параметров модели, определяющих содержание ОРОВ и минеральной взвеси. Диапазон вариаций a_{g} и b_{bp} указан в *табл. 1.* Нижняя граница модельных значений параметров обычно задавалась в 2–3 раза меньше, чем величина оптимальных значений, а верхняя — в 2–3 раза больше. Всего таким образом было получено четыре кластера модельных спектров.

В работе использовалось несколько способов определения b_{bp} по спутниковым данным. Как и в предыдущих исследованиях (Вазюля и др., 2025а, б) использовался полуаналитический алгоритм QAA (Lee et al., 2002). Принцип определения b_{bp} основывается на том, что существуют полуаналитические формулы, связывающие коэффициент яркости моря R_{rs} с показателями поглощения *a* и рассеяния назад b_{b}, если для некоторой длины волны известна величина *a*, то можно рассчитать b_{b}. После вычитания вклада рассеяния чистой водой определяется величина $b_{\text{bp.}}$

В первой версии алгоритма (Lee et al., 2002) для определения b_{bp} было предложено два варианта расчёта (QAA-555 и QAA-640). В случае QAA-555 показатель b_{bp} вычислялся через $a(555)$ и $R_{\text{rs}}(555)$, в QAA-640 — через $a(640)$ и $R_{\text{rs}}(640)$. При этом на полном массиве данных оценки ошибок для b_{bp} были заметно меньше для QAA-640. В дальнейшем алгоритм QAA несколько раз модифицировался. Так, в версии v6 (https://www.ioccg.org/groups/Software_OCA/QAA_v6_2014209.pdf) в случае $R_{\text{rs}}(670) \geqslant 0{,}0015$ величина b_{bp} рассчитывается через значение $a(670)$. Если $R_{\text{rs}}(670) < 0{,}0015$ следует использовать формулы из версии v5 (https://www.ioccg.org/groups/Software_OCA/QAA_v5.pdf) и определять b_{bp} через величину $a(555)$. В нашей работе применялись обе версии QAA (v5 и v6).

Полуаналитический алгоритм SA (*англ.* Semi-Analytical Algorithm) (Burenkov, Sheberstov, 2013) использует ту же идеологию, что и QAA-555, но другую формулу для расчёта $a(555)$ через $R_{\text{rs}}(443)$ и $R_{\text{rs}}(555)$. Из-за ошибок атмосферной коррекции для спектрального канала 443 нм по данным натурных измерений для морей, представленных в электронном Атласе (https://optics.ocean.ru), были получены формулы определения отношения $R_{\text{rs}}(443)/R_{\text{rs}}(555)$ через отношение для других спектральных каналов. В зависимости от моря и спутникового сканера цвета вместо 443 нм предлагается использовать каналы 488, 510 или 531 нм. В нашей работе мы применяли как исходный алгоритм SA, так и вариант алгоритма SA_{bar}, разработанный для Баренцева моря. В SA_{bar} в качестве входных параметров используются значения $R_{\text{rs}}(531)$ и $R_{\text{rs}}(555)$.

В настоящей работе применялись данные второго (L2) и третьего (L3) уровня спутниковых сканеров цвета океана MODIS Aqua, MODIS Terra и VIIRS Suomi NPP (*англ.* National

Polar-orbiting Partnership), полученные на сайте NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) (https://oceancolor.gsfc.nasa.gov). Данные VIIRS NOAA-20 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration) не рассматривались, так как они не охватывают весь период натурных измерений, использованных в работе. Обработка спутниковых данных проводилась с помощью программного обеспечения SMCS (*англ.* Satellite Monitoring of Caspian Sea), разработанного в Лаборатории оптики океана ИО РАН (Шеберстов, 2015).

Для оценки точности предложенных формул при использовании спутниковых данных MODIS и VIIRS уровня L2 был выполнен подбор спутниковых данных для ближайшего пикселя к точке отбора пробы для измерения TSM. Максимально допустимый интервал времени между судовыми и спутниковыми измерениями $\Delta T_{\max}$ равен 48 ч. Данные, отмеченные флагами STRAYLIGHT, CLDICE, ATMWARN и MAXAERITER, исключались. Как и в предыдущих работах (Вазюля и др., 2025а, б), использовались спутниковые данные с зенитными углами солнца $\theta \leqslant 75°$. В этих работах было показано, что расширение границы допустимых значений θ с 70 до 75° позволяет заметно увеличить количество спутниковых данных без ухудшения их качества. Таким образом удалось подобрать 96 пар данных *in situ*/MODIS (для 19 станций) и 74 пары *in situ*/VIIRS (для 16 станций).

Также использовались данные уровня L3 для MODIS Aqua и VIIRS Suomi NPP с суточным усреднением и пространственным разрешением 4 км. При оценке точности формул применялись спутниковые данные для ближайшего пикселя с $\Delta T_{\max} = 1$ день. В случае L3 удалось подобрать данные для 12 станций: 18 пар для MODIS и 19 для VIIRS.

Так как величина TSM в поверхностном слое моря Лаптевых изменяется более чем на два порядка согласно данным прямых измерений, использование метрик для оценки точности на основе разности абсолютных значений бессодержательно. Так при расчёте среднеквадратичной ошибки RMSE (*англ.* Root Mean Square Error) определяющий вклад в итоговую метрику вносят расхождения на больших значениях TSM. Поскольку для большей части моря характерны низкие величины TSM, для них полученные оценки RMSE будут нерепрезентативными. В нашей работе мы использовали две метрики: среднюю относительную ошибку RE (*англ.* Relative Error) и симметричную среднюю логарифмическую ошибку $\mathrm{RE}_{\ln}$. Значение RE определяется по формуле

$$\mathrm{RE} = \frac{100\%}{N} \sum \frac{\left| y_{\text{мод}} - y_{\text{изм}} \right|}{y_{\text{изм}}},$$

где $y_{\text{изм}}$ — оценки, полученные в результате измерения, а $y_{\text{мод}}$ — рассчитанные по оптическим данным с помощью предложенного алгоритма. Величина $\mathrm{RE}_{\ln}$ вычисляется с помощью формул

$$\mathrm{RE}_{\ln} = (e^{\varepsilon} - 1) \times 100\,\%, \quad \varepsilon = \sum \left| \ln\left(\frac{y_{\text{мод}}}{y_{\text{изм}}} \right) \right| \Big/ N.$$

Таким образом, обе метрики позволяют оценить ошибку в процентах. Но в отличие от RE, метрика $\mathrm{RE}_{\ln}$ является симметричной. То есть при завышении или занижении модельной оценки в k раз величина $\mathrm{RE}_{\ln}$ будет одной и той же. В то же время, когда значение k значительно отличается от 1, величина RE оказывается заметно меньше для заниженных оценок. Например, при занижении в 2 раза RE равна 50 %, а при завышении — 100 %.

Результаты

На *рис. 2* представлены результаты оценок величины b_{bp} с помощью различных алгоритмов в сравнении с входными значениями b_{bp}, использованными для моделирования спектров коэффициента яркости моря. Цветом выделены оценки, полученные в результате вариации параметров модели вблизи оптимальных для четырёх станций с разным соотношением содержания ОРОВ и минеральной взвеси (*табл. 1*).

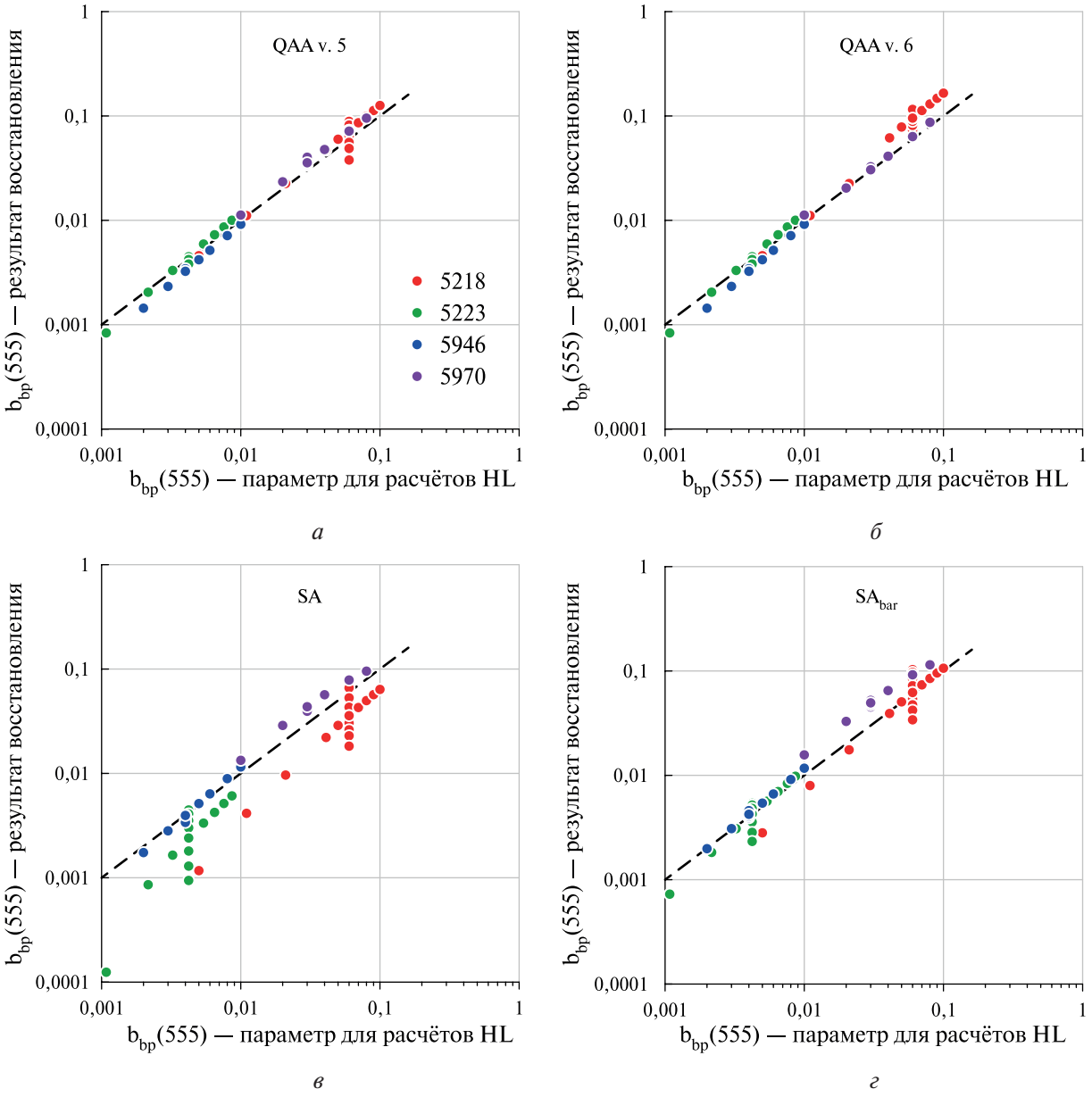


Рис. 2. Сопоставление величин показателя b_{bp} (в м$^{-1}$), использованных для модельных расчётов HydroLight (HL) и восстановленных с помощью разных алгоритмов: *а* — QAA v.5, *б* — QAA v.6, *в* — SA, *г* — SA_{bar}. Пунктиром показана линия идеального соответствия 1:1

В случае использования QAA v.5 и v.6 заметные различия наблюдаются только для кластера модельных расчётов, полученных на базе измерений для станции 5218. Эти различия связаны с тем, что для v.6, когда $R_{rs}(670) \geqslant 0{,}0015$, расчёт b_{bp} происходит через $a(670)$. Данное условие выполняется для кластеров станций 5218 и 5970 в случае $b_{bp} \geqslant 0{,}02$ м$^{-1}$. Но заметные различия наблюдаются только для кластера станции 5218, где большие значения концентрации взвеси моделировались на фоне высокого содержания ОРОВ. Возможно, массив данных, на котором создавался алгоритм QAA, не включал случаев с такими экстремальными величинами a_g. Средние ошибки для всего массива модельных спектров при использовании двух версий алгоритма QAA близки. Средние относительные ошибки RE составили 18 и 22 % для v.5 и v.6 соответственно, логарифмические ошибки RE_{ln} — 18 и 21 %. Наихудшая способность восстановления b_{bp} наблюдается для алгоритма SA для кластеров станций 5218 и 5223 с большим содержанием ОРОВ. В результате средняя относительная ошибка SA равна 34 %, а логарифмическая — 56 %. Если использовать SA_{bar}, то оценки точности RE и RE_{ln} получаются

сравнимыми с полученными для QAA — 27 и 28 %. Это объясняет устойчивые корреляционные связи TSM с величинами b_{bp}, рассчитанными по алгоритму SA_{bar} (Вазюля и др., 2025а, б). Таким образом, при помощи моделирования показано, что для расчёта b_{bp} в море Лаптевых лучше всего использовать алгоритм QAA.

На *рис. 3* представлено сопоставление измеренных величин TSM и значений b_{bp}, рассчитанных с помощью алгоритмов QAA v.6 и v.5 по натурным спектрам коэффициента яркости моря R_{rs}. Линейные корреляции в логарифмическом масштабе для двух версий алгоритма QAA достаточно близки, хотя значения множителя в формулах расчёта TSM через b_{bp} отличаются более чем на 25 %. При использовании QAA v.5 формула имеет вид

$$TSM = 62{,}3(b_{bp_QAA_v5})^{1{,}02}, \quad (1)$$

а для QAA v.6 —

$$TSM = 45{,}1(b_{bp_QAA_v6})^{0{,}97}, \quad (2)$$

где b_{bp} (в $м^{-1}$), а TSM (в мг/л). Коэффициенты детерминации R^2 для этих формул близки между собой и равны 0,89 и 0,93. При использовании натурных спектров R_{rs} средние относительные ошибки по этим формулам составили 46 и 38 %, а логарифмические ошибки — 46 и 39 % для v.5 и 6 соответственно.

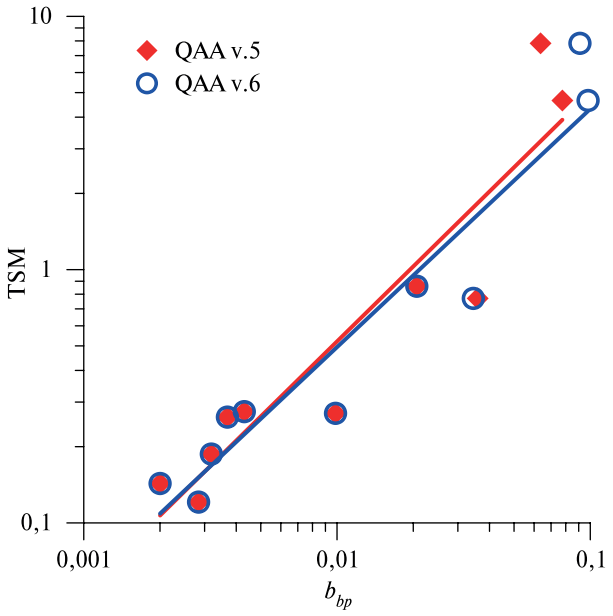
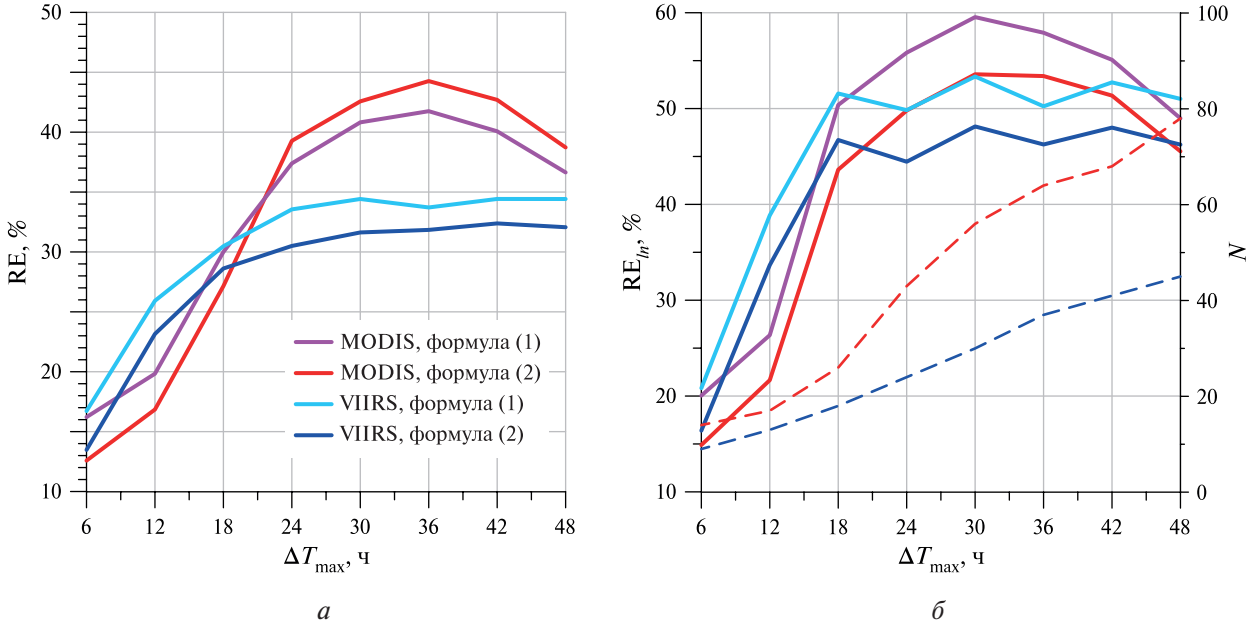


Рис. 3. Сопоставление величин TSM (в мг/л), измеренных *in situ*, со значениями b_{bp} (в $м^{-1}$), рассчитанными по натурным спектрам R_{rs} алгоритмами QAA v.6 и v.5. Синяя прямая — линейная регрессия в логарифмическом масштабе для QAA v.6, красная — для QAA v.5

При применении данных дистанционного зондирования для оценок TSM точность предложенных формул может существенно снизиться. Это связано с ошибками алгоритмов атмосферной коррекции, а также с несовпадением спутниковых и натурных измерений во времени и пространстве. Последний фактор особенно значим в районах с высокой пространственно-временной изменчивостью. При использовании данных спутниковых сканеров цвета уровня L2 параметры точности предложенных формул существенно зависят от параметров отбора пар «*in situ*/спутник». Значения относительных ошибок RE и RE_{ln} для оценки TSM по данным MODIS и VIIRS изменяются в несколько раз при ΔT_{max} в интервале 6–24 ч (*рис. 4*). Дальнейшее увеличение ΔT_{max} мало влияет на точность спутниковых оценок TSM. В целом параметры точности предложенных формул мало зависят от того, какие спутниковые данные были использованы. Хотя при применении измерений VIIRS величина RE заметно

меньше для $\Delta T_{max} \geqslant 18$ ч, для RE_{ln} различия в точности двух сканеров можно считать незначительными. Ещё более затруднительно выбрать наиболее точную формулу по имеющимся данным.



а *б*

Рис. 4. Величины относительных ошибок RE (*а*) и RE_{ln} (*б*) оценки TSM по спутниковым данным в зависимости от величины ΔT_{max}. Пунктиром показано количество пар *N* для MODIS (красный цвет) и VIIRS (синий)

Следует отметить, что при первой попытке создать формулу оценки TSM по данным MODIS (Вазюля и др., 2025б) полученные RE были в несколько раз выше, хотя сама формула отличалась незначительно. Анализ спутниковых данных выявил, что большие средние значения RE для MODIS обусловлены аномально высокими величинами ошибки для некоторых пар *in situ*/спутник. Причём большая часть таких спутниковых данных была отмечена флагами ATMWARN и MAXAERITER, которые свидетельствуют о сбоях работы алгоритма атмосферной коррекции. В настоящей работе спутниковые данные, отмеченные этими флагами, были исключены. Это привело к сокращению на 10–15 % массива данных MODIS и почти не повлияло на массив данных VIIRS. Большее количество пар *in situ*/спутник в случае MODIS (см. *рис. 4*) обусловлено тем, что использовались данные для двух спутников Aqua и Terra, а для VIIRS — только одного спутника Suomi NPP.

Показанные в настоящей работе параметры точности относятся к массиву спутниковых данных, полученных с условием $\theta_{max} = 75°$. Сравнение оценок точности с θ_{max}, равным 70 и 75°, показало, что они отличаются незначительно. Это согласуется с результатами, полученными ранее (Вазюля и др., 2025а, б). Кроме того, был выполнен анализ точности отдельно для двух носителей сканера MODIS. Существенных различий в метриках точности для Aqua и Terra не обнаружено.

Для создания электронного Атласа используются среднемесячные данные дистанционного зондирования, в связи с этим целесообразно выяснить точность предложенных формул при применении данных уровня L3. В *табл. 2* сравниваются параметры точности при использовании суточных L3 ($\Delta T_{max} = 1$ день) и L2 для двух значений ΔT_{max}, равных 6 и 24 ч. Величины средней относительной ошибки RE для L3 практически равны полученным по данным L2 с $\Delta T_{max} = 24$ ч, в то же время значения RE_{ln} заметно выше, особенно для MODIS (на 22–40 %). Это указывает на тенденцию к большему занижению оценок TSM при использовании данных L3 по сравнению с L2. Различия в метриках точности не позволяют

однозначно определиться с выбором лучшей формулы, однако указывают на небольшое превосходство данных VIIRS.

Таблица 2. Относительные ошибки RE и RE_{ln} оценки TSM в зависимости от величины ΔT_{max} и уровня осреднения спутниковых данных (L2 и L3)

Параметр точности	RE, %		RE_{ln}, %	
Формула	(1)	(2)	(1)	(2)
MODIS				
L2, ΔT_{max} = 6 ч	16	13	20	15
L2, ΔT_{max} = 24 ч	37	39	56	50
L3, ΔT_{max} = 1 день	42	46	78	90
VIIRS				
L2, ΔT_{max} = 6 ч	17	13	21	16
L2, ΔT_{max} = 24 ч	34	31	50	44
L3, ΔT_{max} = 1 день	39	41	65	69

Таким образом, можно считать, что обе предложенные формулы позволяют оценивать величину TSM по данным спутниковых сканеров цвета MODIS и VIIRS уровня L2 или L3 с относительной погрешностью порядка 30–45 %, если временной интервал между спутниковыми и натурными измерениями не превышает суток.

Обсуждение

Как уже было сказано выше, для общего массива спутниковых данных не имеет смысла определять среднеквадратичные ошибки RMSE предложенных формул. Но исходный массив данных естественным образом распадается на два кластера, характеризующихся значительным различием в содержании взвеси. В первом кластере данные относятся к станциям, расположенным в приустьевых районах, для которых по данным прямых определений TSM > 1,5 мг/л. Во втором кластере — оставшиеся данные, для них TSM < 0,35 мг/л. Обозначим их как «мутный» и «прозрачный». Оценки RMSE для этих двух кластеров при использовании данных L2 отличаются больше чем на порядок (*рис. 5*).

В случае использования L2 для мутных вод независимо от сканера и формулы происходит существенное возрастание RMSE (почти в 4 раза) при увеличении ΔT_{max} в интервале 6–18 ч, далее RMSE меняется мало и остаётся на уровне 5–6 мг/л. Это может свидетельствовать о том, что для приустьевых районов характерна высокая временная изменчивость. Следует отметить, что для данного кластера свойственно занижение спутниковых оценок TSM по сравнению с прямыми определениями на 15–40 % в зависимости от ΔT_{max}.

В случае прозрачных вод увеличение ΔT_{max} сопровождается более плавным изменением величины RMSE. Существенное возрастание RMSE для MODIS при ΔT_{max} = 24 ч связано с чувствительностью RMSE к выбросам. Наличие одной пары с аномально высокими спутниковыми оценками TSM среди 18, по которым происходит анализ точности, приводит к увеличению RMSE в 2–3 раза. При этом средние спутниковые оценки TSM для всего кластера отличаются не более чем на 25 % от значений TSM, полученных *in situ*. Для VIIRS величина RMSE во всех рассмотренных случаях не превышает 0,1 мг/л.

При использовании суточных L3 данных оценки RMSE для двух кластеров имеют тот же порядок, но есть некоторые отличия. В случае мутных вод сохраняется тенденция к занижению спутниковых оценок TSM. При этом значение RMSE заметно отличается для двух сканеров, её величина составляет примерно 5 и 3 мг/л для MODIS и VIIRS соответственно. Для прозрачных вод независимо от сканера и формулы величина RMSE равна 0,1 мг/л.

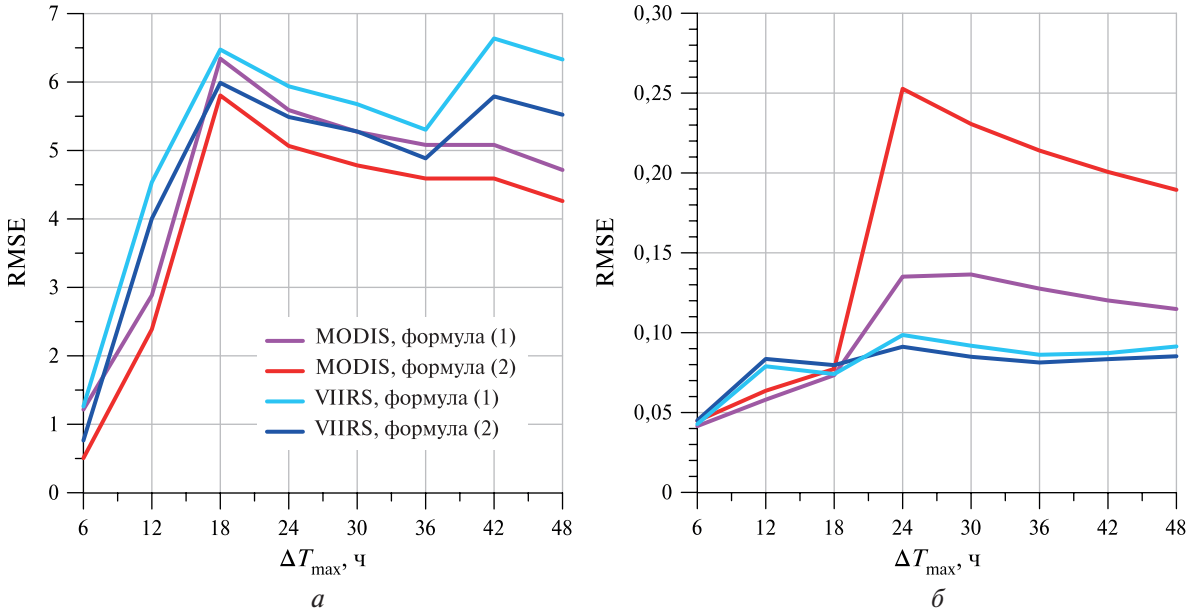


Рис. 5. Среднеквадратичные ошибки RMSE (в мг/л) оценки TSM по спутниковым данным в зависимости от величины ΔT_{max} для двух массивов данных $TSM_{in\ situ} > 1{,}5$ мг/л (*а*) и $TSM_{in\ situ} < 0{,}35$ мг/л (*б*)

Выводы

Результаты моделирования с помощью программы HydroLight позволили выбрать оптимальный алгоритм определения показателя рассеяния назад взвесью в море Лаптевых. Настройка модели проводилась по данным гидрооптических измерений, выполненных на четырёх станциях, которые характеризуются существенными различиями в содержании двух основных оптически активных компонентов — жёлтого вещества и терригенной взвеси. Показано, что квазианалитический алгоритм QAA позволяет рассчитывать величину b_{bp} с точностью 18–22 %.

Итоговые формулы (1) и (2) для расчёта TSM через величину показателя рассеяния назад взвесью получены на базе данных натурных измерений спектров коэффициента яркости моря, что позволило исключить влияние ошибок алгоритма атмосферной коррекции. Валидация по данным спутниковых сканеров цвета MODIS и VIIRS уровня L2 или L3 показала, что обе предложенные формулы обеспечивают оценку концентрации TSM с относительной погрешностью порядка 30–45 % при условии, что временной интервал между спутниковыми и натурными измерениями не превышает одних суток. Анализ спутниковых данных выявил, что при подборе данных L2 MODIS играет существенную роль отбраковка пикселей, отмеченных флагами ATMWARN и MAXAERITER. Если это условие не соблюдается, то метрики ошибок увеличиваются более чем в два раза.

Выполнен анализ абсолютных ошибок полученных алгоритмов для оценки концентрации взвеси в море Лаптевых. Для приустьевых районов величина среднеквадратичной ошибки около 5 мг/л, для более прозрачных вод, где по данным прямых определений TSM < 0,35 мг/л, среднеквадратичная ошибка равна 0,1 мг/л.

Исследование выполнено в рамках проекта, финансируемого грантом Российского научного фонда № 25-27-00346.

Литература

1. *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.

2. *Буренков В. И.*, *Купцов В. М.*, *Сивков В. В.*, *Шевченко В. П.* Пространственное распределение и дисперсный состав взвеси в море Лаптевых в августе–сентябре 1991 г. // Океанология. 1997. Т. 37. № 6. С. 920–927.
3. *Вазюля С. В.*, *Дерягин Д. Н.*, *Павлова М. А. и др.* (2025а) Алгоритм оценки концентрации взвеси в море Лаптевых по данным спутникового сканера VIIRS // 31-й Международ. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: сб. ст. Томск, 2025. 4 с. DOI: 10.56820/conferencearticle_685be465a4bfe6.80742597.
4. *Вазюля С. В.*, *Дерягин Д. Н.*, *Павлова М. А. и др.* (2025б) Алгоритм оценки концентрации взвеси в море Лаптевых по данным спутникового сканера MODIS // 26-я Международ. науч. конф. (Школа) по морской геологии «Геология морей и океанов»: сб. ст. М.: ИО РАН, 2025. Т. 1. С. 52–56. DOI: 10.29006/978-5-6051054-7-3.
5. *Дерягин Д. Н.*, *Вазюля С. В.*, *Глуховец Д. И.* Влияние параметров поверхностного слоя в Карском море на точность оценки концентрации хлорофилла-а биооптическими алгоритмами // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2024. Т. 17. № 3. С. 91–101. DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(3)-8.
6. *Колтовская Е. В.*, *Немировская И. А.* Распределение взвешенного вещества и углеводородов в морях Карском и Лаптевых в августе – сентябре 2018 года // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2023. № 1. С. 81–94. DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2023-1-81-94.
7. *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.
8. *Лисицын А. П.* Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. 2. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
9. *Лисицын А. П.*, *Шевченко В. П.*, *Буренков В. И.* Гидрооптика и взвесь арктических морей // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 70–79.
10. *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.
11. *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.
12. *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.
13. *Чаркин А. Н.*, *Дударев О. В.*, *Шахова Н. Е. и др.* Особенности формирования полей взвеси в морях Восточной Арктики // Докл. Акад. наук. 2015. Т. 462. № 5. С. 595–600. DOI: 10.7868/S086956521517017X.
14. *Шеберстов С. В.* Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 154–161.
15. *Burenkov V. I.*, *Sheberstov S. V.* Modified algorithm for assessment of the particle backscattering coefficient from satellite data // Proc. 7th Intern. Conf. “Current Problems in Optics of Natural Waters” (ONW’2013). Saint Petersburg: “Nauka”, 2013. P. 151–153.
16. *Chalov S.*, *Ivanov V.* Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob’, Yenisey and Lena rivers sediment budget // CATENA. 2023. V. 230. Article 107212. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107212.
17. *Günther F.*, *Overduin P. P.*, *Sandakov A. V. et al.* Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region // Biogeosciences. 2013. V. 10. No. 6. P. 4297–4318. DOI: 10.5194/bg-10-4297-2013.
18. *Heim B.*, *Abramova E.*, *Doerffer R. et al.* Ocean colour remote sensing in the Southern Laptev Sea: evaluation and applications // Biogeosciences. 2014. V. 11. No. 15. P. 4191–4210. DOI: 10.5194/bg-11-4191-2014.
19. *Lee Z.*, *Carder K. L.*, *Arnone R. A.* Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters // Applied Optics. 2002. V. 41. P. 5755–5772. DOI: 10.1364/AO.41.005755.
20. *Mobley C. D.* Light and water: radiative transfer in natural waters. San Diego: Academic Press, 1994. 592 p.
21. *Rusakov V. Y.*, *Kuz’mina T. G.*, *Lukmanov R. A.* Assessment of the sediment budget of the Kara and Laptev seas // Continental Shelf Research. 2025. V. 292. Article 105506. DOI: 10.1016/j.csr.2025.105506.

22. *Wegner C.*, *Bauch D.*, *Hölemann J. A. et al.* Interannual variability of surface and bottom sediment transport on the Laptev Sea shelf during summer // Biogeosciences. 2013. V. 10. No. 2. P. 1117–1129. DOI: 10.5194/bg-10-1117-2013.

Algorithms for suspended matter concentration retrieval in the Laptev Sea using satellite ocean color data

S. V. Vazyulya, D. N. Deryagin, M. D. Kravchishina, Z. Yu. Redzhepova

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: vasyulya.sv@ocean.ru

Global warming leads to an increased supply of suspended particulate matter to the Arctic seas. Satellite monitoring based on algorithms validated by *in situ* data enables reliable observation of these changes. The paper presents regional algorithms for estimating suspended particulate matter concentration in the upper layer of the Laptev Sea using remote sensing data. The quality and reliability of the algorithms are ensured by using the results of shipborne measurements of suspended matter concentration and remote sensing reflectance carried out in 2015, 2017, and 2018. Modeling based on hydrooptical measurements in areas of the sea with different contents of colored dissolved organic matter and suspended particulate matter allowed us to select the best algorithm for determining the backscattering coefficient of suspended matter. The QAA (Quasi-Analytical Algorithm) provides a relative retrieval accuracy of 18–22 %. The resulting algorithms for estimating suspended matter concentration are based on *in situ* measurements of seawater reflectance spectra, thereby avoiding errors associated with atmospheric correction. Validation using Level-2 and Level-3 data from the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) satellite ocean color scanners showed that the proposed formulas provide estimates of suspended matter concentration with a relative error of 30–45 % when the time interval between satellite and *in situ* measurements does not exceed one day. The absolute errors of the algorithms for retrieving suspended matter concentration from satellite data were evaluated. For the areas adjacent to river mouths, the root mean square error amounts to about 5 mg/L. In more transparent waters, with suspended matter concentrations below 0.35 mg/L according to direct measurements, the root mean square error drops to 0.1 mg/L.

Keywords: regional algorithm, suspended matter concentration, backscattering coefficient of suspended matter, QAA, HydroLight, MODIS, VIIRS, Laptev Sea

Accepted: 30.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-22-34

References

1. Artemiev V. A., Burenkov V. I., Vortman M. I., Grigoriev A. V., Kopelevich O. V., Khrapko A. N., Sea-truth measurements of ocean color: a new floating spectroradiometer and its metrology, *Oceanology*, 2000, V. 40, No. 1, pp. 139–145.
2. Burenkov V. I., Kuptzov V. M., Sivkov V. V., Shevchenko V. P., Spatial distribution and size composition of suspended matter in the Laptev Sea in August–September 1991, *Oceanology*, 1997, V. 37, pp. 831–837.
3. Vazyulya S. V., Deryagin D. N., Pavlova M. A. et al. (2025a), Algorithm for estimating suspended matter concentration in the Laptev Sea using VIIRS data, *31-i Mezhdunarodnyi simpozium "Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery"* (31st Intern. Symp. "Atmosphere and Ocean Optics. Atmospheric Physics"), Tomsk, 2025, 4 p. (in Russian), DOI: 10.56820/conferencearticle_685be465a4bfe6.80742597.
4. Vazyulya S. V., Deryagin D. N., Pavlova M. A. et al. (2025b), Algorithm for estimating suspended matter concentration in the Laptev Sea using MODIS data, *26-ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya* (*Shkola*) *po morskoi geologii "Geologiya morei i okeanov"* (26th Intern. Conf. on Marine

Geology “Geology of Seas and Oceans”), Moscow: IO RAS, 2025, V. 1, pp. 52–56 (in Russian), DOI: 10.29006/978-5-6051054-7-3.
5. Deryagin D. N., Vazyulya S. V., Glukhovets D. I., Influence of the Kara Sea surface layer parameters on the accuracy of chlorophyll-a concentration estimation by the bio-optical algorithms, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2024, V. 17, No. 3, pp. 91–101 (in Russian), DOI: 10.59887/2073-6673.2024.17(3)-8.
6. Koltovskaya E. V., Nemirovskaya I. A., Distribution of suspended matter and hydrocarbons in the Kara and the Laptev seas in August–September 2018, *Moscow University Bull. Ser. 5. Geography*, 2023, No. 1, pp. 81–94 (in Russian), DOI: 10.55959/MSU0579-9414-5-2023-1-81-94.
7. Kopelevich O. V., Sahling I. V., Vazyulya S. V., Glukhovets D. I., Sheberstov S. V., Burenkov V. I., Karalli P. G., Yushmanova A. V., *Bioopticheskie kharakteristiki morei*, *omyvayushchikh berega zapadnoi poloviny Rossii*, *po dannym sputnikovykh skanerov cveta 1998–2017 gg*. (Biooptical characteristics of the seas washing the shores of the western half of Russia, according to satellite color scanners 1998–2017), Moscow: OOO “Vash Format”, 2018, 140 p. (in Russian).
8. Lisitsyn A. P., Modern concepts of sediment generation in oceans and seas. Ocean as a natural recorder of interactions between the Earth’s geospheres, In: *Mirovoi ocean. T. 2. Fizika*, *khimiya i biologiya okeana. Osadkoobrazovanie v okeane i vzaimodeistvie geosfer Zemli* (World Ocean. V. 2. Ocean physics, chemistry, and biology. Sedimentation in the ocean and the interaction of Earth’s geospheres), Moscow: Nauchnyi Mir, 2014, pp. 331–571 (in Russian).
9. Lisitsin A. P., Shevchenko V. P., Burenkov V. I., Hydrooptics and suspended matter of Arctic seas, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2000, V. 13, No. 1, pp. 61–71.
10. Flint M. V., Poyarkov S. G., Rymsky-Korsakov N. A., Ecosystems of the Russian Arctic-2015 (63rd Cruise of the Research Vessel Akademik Mstislav Keldysh), *Oceanology*, 2016, V. 56, No. 3, pp. 459–461, DOI: 10.1134/S0001437016030061.
11. Flint M. V., Poyarkov S. G., Rymsky-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.
12. Flint M. V., Poyarkov S. G., Rymskii-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.
13. Charkin A. N., Dudarev O. V., Shakhova N. E. et al., Peculiarities of the formation of suspended particulate matter fields in the Eastern Arctic seas, *Doklady Earth Sciences*, 2015, V. 462, No. 2, pp. 626–630, DOI: 10.1134/S1028334X15060100.
14. Sheberstov S. V., 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).
15. Burenkov V. I., Sheberstov S. V., Modified algorithm for assessment of the particle backscattering coefficient from satellite data, *Proc. 7th Intern. Conf. “Current Problems in Optics of Natural Waters”* (*ONW’2013*), Saint Petersburg: “Nauka”, 2013, pp. 151–153.
16. Chalov S., Ivanov V., Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob’, Yenisey and Lena rivers sediment budget, *CATENA*, 2023, V. 230, Article 107212, DOI: 10.1016/j.catena.2023.107212.
17. Günther F., Overduin P. P., Sandakov A. V. et al., Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region, *Biogeosciences*, 2013, V. 10, No. 6, pp. 4297–4318, DOI: 10.5194/bg-10-4297-2013.
18. Heim B., Abramova E., Doerffer R. et al., Ocean colour remote sensing in the Southern Laptev Sea: evaluation and applications, *Biogeosciences*, 2014, V. 11, No. 15, pp. 4191–4210, DOI: 10.5194/bg-11-4191-2014.
19. Lee Z., Carder K. L., Arnone R. A., Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters, *Applied Optics*, 2002, V. 41, pp. 5755–5772, DOI: 10.1364/AO.41.005755.
20. Mobley C. D., *Light and water: radiative transfer in natural waters*, San Diego: Academic Press, 1994, 592 p.
21. Rusakov V. Y., Kuz’mina T. G., Lukmanov R. A., Assessment of the sediment budget of the Kara and Laptev seas, *Continental Shelf Research*, 2025, V. 292, Article 105506, DOI: 10.1016/j.csr.2025.105506.
22. Wegner C., Bauch D., Hölemann J. A. et al., Interannual variability of surface and bottom sediment transport on the Laptev Sea shelf during summer, *Biogeosciences*, 2013, V. 10, No. 2, pp. 1117–1129, DOI: 10.5194/bg-10-1117-2013.