

Валидация спутниковых продуктов Sentinel-3/OLCI L2 вдоль юго-западного и юго-восточного побережья Камчатского полуострова

Е. Ю. Скороход^{1,3}, Т. Я. Чурилова^{1,3}, Н. А. Моисеева¹,
П. А. Салюк², Т. В. Ефимова^{1,3}

¹ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН
Севастополь, 299011, Россия
E-mail: elenaskorokhod@ibss-ras.ru

² Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия

³ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690922, Россия

Настоящее исследование направлено на оценку точности восстановления значений спутниковых продуктов для возможности дальнейшей реализации комплексного мониторинга прибрежных морских экосистем Камчатки. Выполнена валидация восстановленных значений спутниковых продуктов Sentinel-3A/3B OLCI L2 на основе результатов измерений соответствующих показателей в рамках научно-исследовательского рейса 23/4 вдоль юго-западного и юго-восточного побережья Камчатского полуострова и на подспутниковом разрезе из Охотского в Японское море через пролив Лаперуза на пассажирском судне «Профессор Мультановский» в августе – сентябре 2023 г. Выявлена систематическая недооценка по спутниковым данным показателя поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 443 нм, показателя поглощения света окрашенным неживым веществом на длине волны 443 нм и показателя диффузного ослабления света на длине волны 490 нм и завышение концентрации хлорофилла *a* в сумме с феопигментами. При этом существует проблема высокого разброса спутниковых данных в узком диапазоне значений *in situ*. Показано, что на точность восстановления параметров по спутниковым данным влияет содержание неживого взвешенного и растворённого органического вещества в верхнем слое вод. Статистически обоснованная низкая точность восстановления значений доступных спутниковых продуктов Sentinel-3A/3B OLCI L2 (концентрация хлорофилла *a* в сумме с феопигментами, показатель поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 443 нм, показатель поглощения света окрашенным неживым веществом на длине волны 443 нм и показатель диффузного ослабления света на длине волны 490 нм) ограничивает их использование для мониторинга морских экосистем Камчатки. Необходимо развитие регионального подхода, который учитывает закономерности изменчивости спектральных показателей поглощения света основными оптически активными компонентами в конкретной акватории.

Ключевые слова: хлорофилл, поглощение света, фитопланктон, NAP, CDOM, дистанционное зондирование, OLCI, Камчатка, Охотское море

Одобрена к печати: 16.01.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-9-27

Введение

Вредоносное цветение водорослей (ВЦВ) уже многие годы является серьёзной проблемой. За последние 100 лет вблизи Камчатского полуострова были зафиксированы многочисленные случаи массовой гибели гидробионтов, морских птиц и отравления человека, в том числе с летальным исходом, вызванные ВЦВ (Куренков, 1974; Орлова, 2005; Hallegraeff, 2004). Вредоносное цветение водорослей фиксировали на западном побережье Камчатского полуострова со стороны Охотского моря и на восточном, омываемом водами Тихого океана (Bondur et al., 2021; Orlova et al., 2002, 2022).

Для акваторий, подверженных ВЦВ, необходим комплексный экологический мониторинг, позволяющий исследовать процессы, предшествующие ВЦВ, и осуществлять быстрое реагирование: оповещение населения, спасение животных в садках и др. Оперативное (в режиме реального времени) наблюдение за состоянием водных экосистем обеспечивает

дистанционное зондирование Земли из космоса. Важнейшим продуктом, который можно получить при помощи инструментов цвета океана и использовать для оценки состояния водной среды, является концентрация хлорофилла *a* — основного фотосинтетически активного пигмента, содержащегося во всех микроводорослях.

Используемые алгоритмы трансформации спутниковых данных инструментов цвета океана в спутниковые продукты показывают хорошие результаты для открытых океанических вод (Case-1), тогда как в прибрежных водах точность сильно снижается (Скороход и др., 2021; Churilova et al., 2024; Darecki, Stramski, 2004). Для реализации экологического мониторинга при помощи доступных продуктов Sentinel-3A/3B OLCI L2 в прибрежных высокопродуктивных водах вокруг Камчатского полуострова необходимо убедиться, что значения продуктов, восстановленных по спутниковым данным при помощи стандартных алгоритмов, отражают действительное состояние поверхностных вод исследуемых акваторий.

Цель исследования заключается в оценке точности продуктов Sentinel-3A/3B OLCI L2 (NASA's OceanColor Web) на основе *in situ* данных: концентрации хлорофилла *a* в сумме с феопигментами (TChl-*a*, мг·м⁻³), показателя поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$, м⁻¹), показателя поглощения света окрашенным неживым веществом ($a_{CDM}(\lambda)$, м⁻¹) и показателя диффузного ослабления света ($K_d(\lambda)$, м⁻¹) в августе—сентябре 2023 г. вблизи Камчатского полуострова и пролива Лаперуза.

Материалы и методы исследования

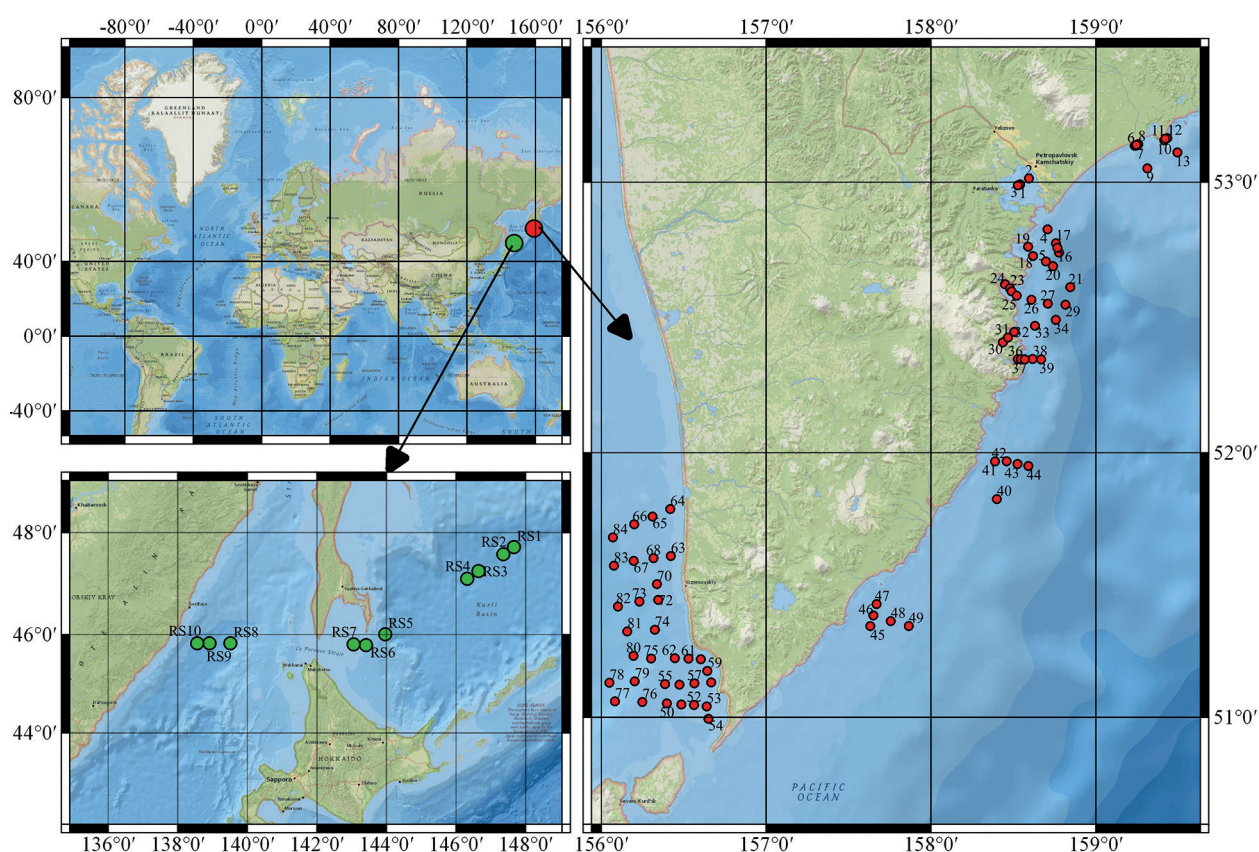


Рис. 1. Район исследования в научно-исследовательском рейсе № 23/4 на пассажирском судне «Профессор Мультановский»: красные точки — станции вдоль юго-западного и юго-восточного побережья Камчатского полуострова; зелёные точки — подспутниковый разрез

Отбор проб проводился с 17 августа по 17 сентября 2023 г. в научно-исследовательском рейсе № 23/4 на пассажирском судне «Профессор Мультановский». Пробы отобраны с 91 станции: с 81 станции вокруг Камчатского полуострова (PM23/4, с 17 августа по 11 сен-

тября 2023 г.) и с 10 станций по ходу движения судна (подспутниковый разрез RS, в период 15–17 сентября 2023 г.). Карта станций представлена на *рис. 1* (см. с. 10).

In situ данные

Пробы воды в поверхностном слое отбирали кассетой батометров Нискина объёмом 5 л. Отбор и обработку проб для определения TChl-*a* проводили в соответствии с работами (Jeffrey, Humphrey, 1975; Lorenzen, 1967), для $a_{ph}(\lambda)$ и показателя поглощения света неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(\lambda)$, м⁻¹) — в соответствии с публикацией (Inherent..., 2018) и для показателя поглощения света окрашенным растворённым органическим веществом ($a_{CDOM}(\lambda)$, м⁻¹) (*англ.* Chromophoric Dissolved Organic Matter) — в соответствии с работой (Mannino et al., 2019). Показатель $a_{CDM}(\lambda)$ определяли как сумму $a_{CDOM}(\lambda)$ и $a_{NAP}(\lambda)$. Спектрофотометрические измерения проводили на двухлучевых спектрофотометрах Lambda-35 (PerkinElmer) и UV-2600 (Shimadzu), оснащённых интегрирующей сферой. Показатель поглощения света всеми оптически активными компонентами, за исключением воды ($a_{tot-w}(\lambda)$, м⁻¹), определяли как сумму $a_{ph}(\lambda)$ и $a_{CDM}(\lambda)$.

Проникающую в водную толщу спектральную квантовую облучённость ($E_d(\lambda)$, Вт·м⁻²) измеряли в пределах эвфотического слоя (Z_{eu} , м) с шагом в 1 м в диапазоне 400–700 нм с высоким спектральным разрешением (1 нм) с помощью погружного спектрального радиометра RAMSES (TriOS). Оптические глубины (ζ) рассчитывали, следуя работе (Kirk, 2011): $\zeta(1)$ и $\zeta(4,6)$ соответствуют глубинам, на которые проникает 37 и 1 % от излучения под поверхностью соответственно. Оптическая глубина $\zeta(4,6)$ совпадает с нижней границей эвфотического слоя (Z_{eu} , м) (Kirk, 2011).

Для валидации спутниковых данных $K_d(490)$ определяли в пределах первой оптической глубины (т.е. при $z = \zeta(1)$) (Werdell, Bailey, 2005):

$$K_d(490) = -\frac{1}{E_d(490, z)} \cdot \frac{E_d(490, 0-) - E_d(490, z)}{dz},$$

где $E_d(490, z)$ и $E_d(490, 0-)$ — проникающее излучение на длине волны 490 нм на глубину z и сразу под поверхностью (Вт·м⁻²·нм⁻¹).

Глубину видимости белого диска Секки (Z_S , м) вычисляли по методике, описанной в публикации (Определение..., 2016).

Спутниковые данные

Для валидации были взяты спутниковые данные OLCI Sentinel-3A и Sentinel-3B Level-2 Full-Resolution из архива OBPG/OB.DAAC, совпадающие по координатам с натурными станциями и с отклонением по времени между отбором проб и дистанционным зондированием ± 3 ч. Для анализа влияния выбора временного диапазона на результаты валидации временной промежуток был расширен до ± 48 ч, а анализ проводили для диапазонов ± 3 , ± 6 , ± 24 и ± 48 ч. В промежутке от 6 до 12 ч данных для OLCI не было обнаружено из-за особенностей движения спутников Sentinel-3A и Sentinel-3B. Пространственное разрешение для OLCI составляет около 300 м.

Из набора данных ОС (*англ.* Ocean Color) были взяты спутниковые продукты chlor_а (OLCI TChl-*a*, мг·м⁻³, алгоритм OCI (Hu et al., 2019)) и Kd_490 (OLCI $K_d(490)$, м⁻¹, алгоритм KD2 (https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/ocsw/get__Kd_8c_source.html)). Из набора данных IOP's (*англ.* Inherent Optical Properties) были взяты спутниковые продукты aph_443 (OLCI $a_{ph}(443)$, м⁻¹) и adg_443 (OLCI $a_{CDM}(443)$, м⁻¹). Спутниковые продукты Level-2 набора IOP's по умолчанию рассчитываются с помощью модели GIOP (*англ.* Generalized Inherent Optical Property, <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/resources/atbd/giop/>). Дополнительно рассчитали $a_{tot-w}(443)$ для OLCI: $OLCI a_{tot-w}(443) = OLCI a_{ph}(443) + OLCI a_{CDM}(443)$ м⁻¹.

Статистический анализ

Для проведения валидации спутниковых данных были использованы статистические показатели, такие как смещение выборки (Bias) и среднее абсолютное отклонение (MAE), предложенные Б. Н. Сигерсом и соавторами (Seegers et al., 2018), а также медианное абсолютное отклонение (MdAD) и среднеквадратическая ошибка регрессии (RMSE):

$$\text{MdAD} = 10^{\text{Median}|\lg(\text{sat}_i) - \lg(\text{in situ}_i)|}, \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{sat}_i - \text{in situ}_i)^2}{n}},$$

где sat_i — продукт по спутниковым данным; in situ_i — продукт по натурным данным; n — количество пар данных. В мультипликативном пространстве статистические показатели являются безразмерными величинами: Bias, MAE и MdAD стремятся к 1, а RMSE — к 0.

Для спутниковых данных в диапазоне ± 3 ч был рассчитан коэффициент вариации $\text{CV} = \sigma/\mu \times 10\%$ (Recommendations..., 2019, р. 6), где μ — среднее значение в области; σ — стандартное отклонение. Для станций PM23/4 была выбрана область 3×3 пикселя вокруг *in situ*, для станций RS — 5×5 . Для станций, наиболее близких к берегу, CV не рассчитывали.

Результаты исследования и их обсуждение

Концентрация хлорофилла *a*, основного фотосинтетически активного пигмента, является ключевым показателем, используемым в качестве основного индикатора продуктивности вод (Holm-Hansen, Riemann, 1978; Iwamura et al., 1970), и чаще всего встречается среди восстановленных продуктов по данным инструментов цвета океана. Сравнение спутникового продукта TChl-*a* с результатами натурных измерений выполнено для разных временных промежутков (рис. 2а).

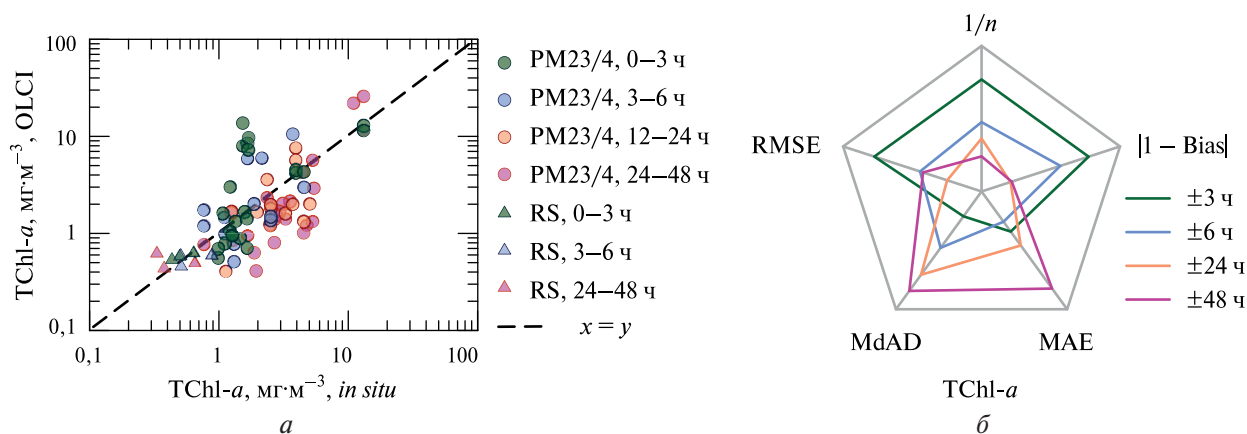


Рис. 2. Сравнение TChl-*a* по спутниковым данным с результатами натурных измерений (а) и паутиная диаграмма статистических показателей для TChl-*a* (б). Наименьшая область соответствует лучшему результату

Вариабельность TChl-*a* в пределах выбранных пар была в диапазоне от 0,33 до 13 мг·м⁻³ со средним значением 2,8 мг·м⁻³ для натурных данных и от 0,41 до 26 мг·м⁻³ со средним значением 3,3 мг·м⁻³ для спутниковых данных для временного промежутка ± 48 ч (см. рис. 2а). Соответственно, мы имеем практически одинаковые диапазоны изменчивости TChl-*a* (диапазоны и средние значения близки, исключение составили два максимальных значения по OLCI: 22 и 26 мг·м⁻³). Несмотря на близкие диапазоны изменчивости TChl-*a* по натурным и спутниковым данным, наблюдается незначительное систематическое занижение спутниковых значений (Bias = 0,91) во временном промежутке ± 48 ч.

Для рекомендованного временного отклонения (± 3 ч) (Recommendations..., 2019) вариабельность TChl-*a* была в диапазоне от 0,43 до 13 мг·м⁻³ (2,5 мг·м⁻³) для *in situ* и от 0,56 до 14 мг·м⁻³ (3,9 мг·м⁻³) для OLCI. Аналогично отмеченным для периода ± 48 ч, диапазоны изменчивости TChl-*a* не имели существенных различий (см. *рис. 2а*). При одинаковых диапазонах изменчивости TChl-*a* значения OLCI TChl-*a* оказались в среднем завышены (Bias = 1,3). Расширение временного диапазона (± 48 ч) привело к занижению спутниковых значений (Bias = 0,91), т.е. качественно сказалось на характере ошибки. Следует отметить, что для TChl-*a in situ* от 1,0 до 1,7 мг·м⁻³ получен максимальный разброс спутниковых значений (от 0,56 до 14 мг·м⁻³).

Результаты валидации согласуются с другими исследованиями: систематическое завышение TChl-*a* было отмечено в период август–сентябрь 2001 г. в различных частях Охотского моря по данным SeaWiFS (Букин и др., 2003; Пермяков и др., 2004) и в течение года вблизи острова Хоккайдо по данным OLCI (Isada et al., 2022). В работе (Цхай, Хен, 2016) показано, что у западного побережья Камчатки в Охотском море в летний и осенний периоды также наблюдается завышение спутниковых оценок TChl-*a*. При этом в открытых частях Берингова моря стандартные спутниковые эмпирические биооптические алгоритмы могут давать приемлемые оценки TChl-*a* без значимых завышений или занижений значений, как было показано по данным августа 2013 г. (Salyuk et al., 2022). На *рис. 2б* представлена статистическая паутинная диаграмма для продукта TChl-*a*. На ней видно, что при увеличении временного отклонения смещение выборки становится менее значимым, тогда как ошибки MdAD и MAE растут (см. *рис. 2б* и *табл. 1*).

Таблица 1. Статистические данные по валидации OLCI Sentinel-3A/3B

Продукт	Время, ч	<i>n</i>	Bias	MAE	MdAD	RMSE
TChl- <i>a</i> , мг·м ⁻³	±3	26	1,30	1,7	1,3	3,60
	±6	42	1,20		1,4	3,20
	±24	55	1,10		1,5	2,90
	±48	83	0,91	1,8	1,6	3,10
<i>a</i> _{ph} (443), м ⁻¹	±3	21	0,69	2,6	1,7	0,38
	±6	34	0,66	2,3	1,6	0,30
	±24	44	0,63	2,2	1,7	0,26
	±48	66	0,60	2,1		0,22
<i>a</i> _{CDM} (443), м ⁻¹	±3	23	0,75	3,1	2,8	0,31
	±6	38	0,60	3,4		0,26
	±24	53	0,69	3,0	2,6	0,27
	±48	76	0,67	2,9		0,26
<i>a</i> _{tot-w} (443), м ⁻¹	±3	16	0,68	2,8	2,7	0,65
	±6	26	0,53	2,9	2,6	0,52
	±24	41	0,60	2,2	2,3	0,42
	±48	59	0,55	2,0		0,36
<i>K</i> _{<i>d</i>} (490), м ⁻¹	±3	21	0,44	2,3	2,4	0,61
	±6	31			2,3	0,54
	±24	43	0,45		2,6	0,47
	±48	63			2,4	0,44

Примечание: Статистические параметры Bias, MAE и MdAD получены для логарифмически-трансформированных данных.

Продукт $a_{ph}(443)$ является важной характеристикой способности фитопланктона поглощать свет для использования в процессе фотосинтеза. Сравнение OLCI $a_{ph}(443)$ с *in situ* (рис. 3а) показало существенную разницу в диапазонах изменчивости $a_{ph}(443)$: диапазон по спутниковым данным (от 0,001 до 1,7 м⁻¹) оказался в шесть раз шире *in situ* (от 0,014 до 0,31 м⁻¹), при этом средние значения различались почти на порядок и составили 0,93 и 0,10 м⁻¹ соответственно.

В пределах рекомендованного отклонения по времени (± 3 ч), аналогично TChl-*a*, для $a_{ph}(443)$ отмечен широкий разброс спутниковых значений (0,0009–1,7 м⁻¹) в узком диапазоне *in situ* данных (0,07–0,26 м⁻¹) (см. рис. 3а). Наличие существенного как завышения, так и занижения значений OLCI $a_{ph}(443)$ привело к снижению смещения выборки, но отразилось на увеличении ошибок MAE и MdAD (см. рис. 3б). Несмотря на наличие существенных завышений и занижений, OLCI $a_{ph}(443)$ оказался занижен практически в два раза для всех временных диапазонов: Bias варьировалось от 0,63 до 0,69 (табл. 1).

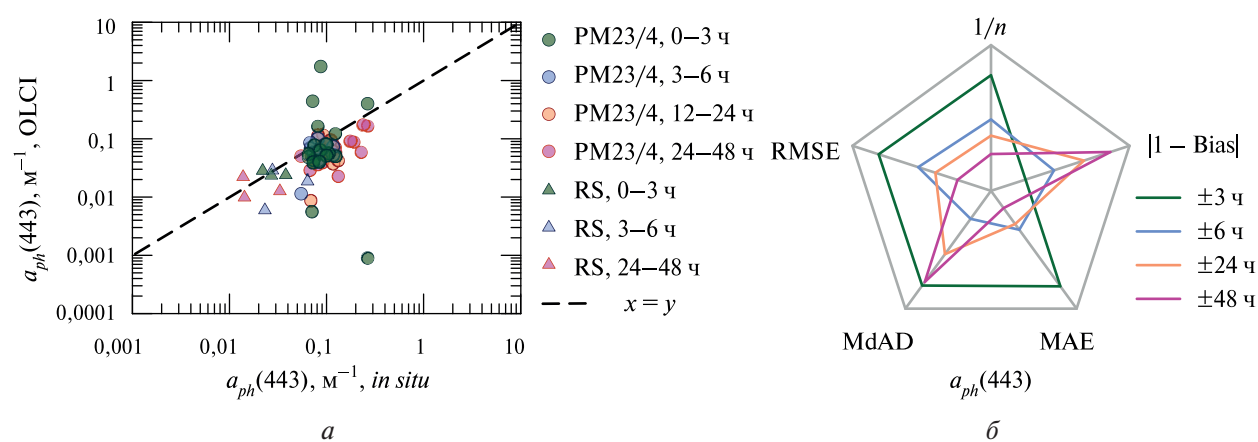


Рис. 3. Сравнение $a_{ph}(443)$ по спутниковым данным с результатами натурных измерений (а) и паутинная диаграмма статистических показателей для $a_{ph}(443)$ (б)

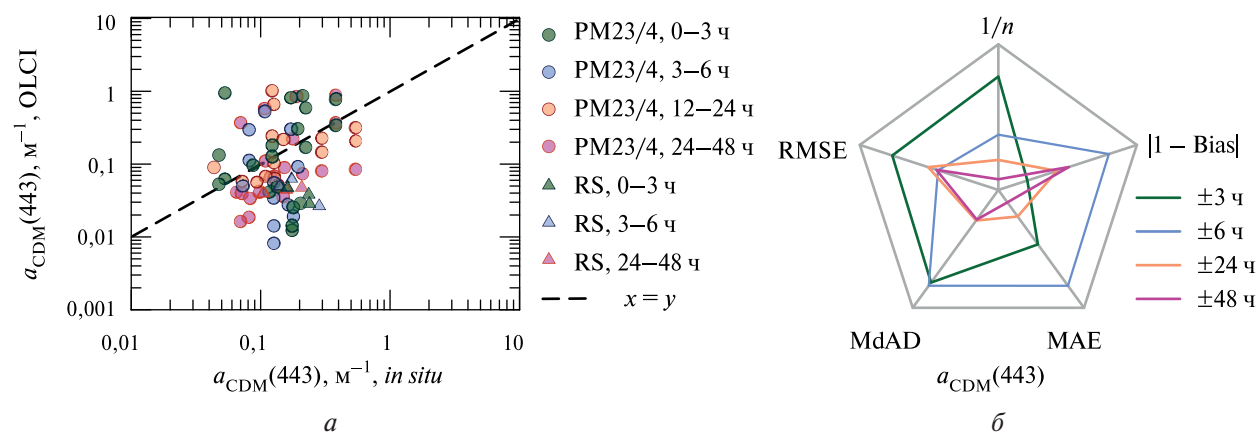


Рис. 4. Сравнение $a_{CDM}(443)$ по спутниковым данным с результатами натурных измерений (а) и паутинная диаграмма статистических показателей для $a_{CDM}(443)$ (б)

Спутниковый продукт $a_{CDM}(443)$ важен для экологических исследований как индикатор качества воды, особенно для прибрежных акваторий, подверженных влиянию берегового стока (Efimova et al., 2018; Kirk, 2011). Для вод вокруг Камчатского полуострова это особенно критично ввиду обилия речного стока (Чалов и др., 2022). Результаты валидации показали, что в пределах ± 48 ч диапазон вариальности OLCI $a_{CDM}(443)$ (от 0,008 до 1,0 м⁻¹) в два раза превышал *in situ* (от 0,044 до 0,54 м⁻¹) (рис. 4а), однако средние значения не имели существен-

ных различий ($0,19$ и $0,17 \text{ м}^{-1}$). Для рекомендованного временного интервала (± 3 ч) диапазон изменчивости OLCI $a_{\text{CDM}}(443)$ (от $0,009$ до $0,95 \text{ м}^{-1}$) почти в три раза превышал *in situ* (от $0,048$ до $0,38 \text{ м}^{-1}$), при этом средние значения различались чуть в большей степени, чем для ± 48 ч, но всё же были близки ($0,23$ и $0,17 \text{ м}^{-1}$) (см. рис. 4а). Существенное отклонение OLCI $a_{\text{CDM}}(443)$ от натурных значений в обе стороны (см. рис. 4а) привело к тому, что при близких средних значениях MAE было наибольшим среди всех рассматриваемых продуктов и составило $3,4$ для диапазона ± 6 ч и $3,1$ — для ± 3 ч (табл. 1).

Для выявления причин отклонения спутниковых данных от *in situ* необходимо выполнить сравнение результатов измерений $a_{\text{tot-w}}(443)$ по натурным и спутниковым данным (рис. 5а).

Сопоставление спутниковых данных с результатами *in situ* измерений в пределах ± 48 ч показало, что диапазон изменчивости $a_{\text{tot-w}}(443)$ по спутниковым данным ($0,042$ – $2,6 \text{ м}^{-1}$) был в пять раз шире чем *in situ* ($0,12$ – $0,64 \text{ м}^{-1}$), но, как и в случае с $a_{\text{CDM}}(443)$, средние значения различались в меньшей степени ($0,21$ и $0,27 \text{ м}^{-1}$) (см. рис. 5а). Для рекомендованного временного интервала (± 3 ч) соотношение диапазонов осталось таким же, но средние значения отличались существенно: $0,37$ и $0,27$ по спутниковым и натурным данным соответственно. При этом для практически одинаковых *in situ* данных $a_{\text{tot-w}}(443)$ (от $0,22$ до $0,28 \text{ м}^{-1}$) спутниковые значения $a_{\text{tot-w}}(443)$ изменились в 20 раз (от $0,13$ до $2,6 \text{ м}^{-1}$) (см. рис. 5а). Значения $a_{\text{tot-w}}(443)$ по спутниковым данным оказались систематически занижены: Bias варьировалось в пределах $0,53$ – $0,68$ в зависимости от выбора временного диапазона (см. рис. 5а и табл. 1). Исключение составили существенно завышенные значения $a_{\text{tot-w}}(443)$ на станциях № 6–8 (см. рис. 5а).

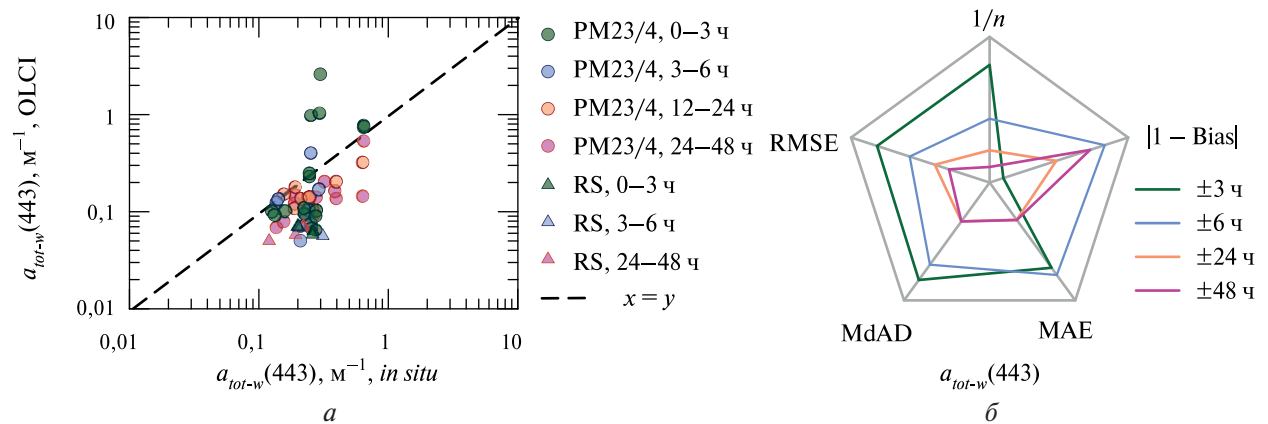


Рис. 5. Сравнение $a_{\text{tot-w}}(443)$ по спутниковым данным с результатами натурных измерений (а) и паутинная диаграмма статистических показателей для $a_{\text{tot-w}}(443)$ (б)

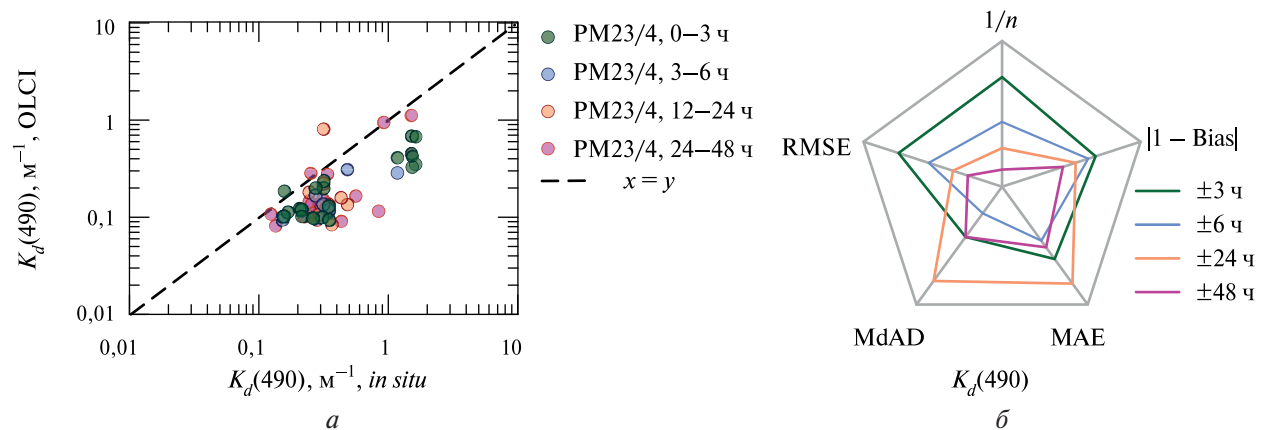


Рис. 6. Сравнение $K_d(490)$ по спутниковым данным с результатами натурных измерений (а) и паутинная диаграмма статистических показателей для $K_d(490)$ (б)

Продукт $K_d(490)$ выступает характеристикой прозрачности воды и может использоваться как индикатор её качества. Продукт $K_d(490)$ по спутниковым данным был недооценён более чем в два раза: Bias варьировалось от 0,44 до 0,45 в зависимости от выбранного временного диапазона (табл. 1 и рис. 6а, см. с. 15).

Значения $K_d(490)$ по спутниковым и натурным данным варьировали в диапазоне 0,070–1,1 и 0,12–1,6 м⁻¹ соответственно. Следует отметить, что диапазоны $K_d(490)$ в значительной степени перекрываются, но средние значения различались более чем в два раза (0,19 и 0,51 м⁻¹ соответственно). Для ± 3 ч диапазоны изменчивости $K_d(490)$ также пересекались в значительной мере: по спутниковым и натурным данным варьировали в интервале 0,07–1,10 и 0,16–1,60 м⁻¹ соответственно. Однако средние значения различались в большей степени (0,22 и 0,67 м⁻¹ соответственно), чем для периода ± 48 ч (см. рис. 6а). Увеличение временного диапазона привело к уменьшению смещения выборки $K_d(490)$ (см. рис. 6б).

Результаты сравнения значений спутниковых продуктов в рамках разных временных диапазонов показали, что при использовании спутниковых данных выбор временного интервала имеет огромную значимость. Увеличение временного диапазона неизбежно приводит к искажению результатов валидации и, в некоторых случаях, может сказаться на характере систематического смещения выборки (Bias для TChl-*a*, табл. 1). Близкие диапазоны изменчивости и средние значения продуктов по натурным и спутниковым данным не являются подтверждением высокой точности спутниковых оценок, так как не исключают широкий разброс значений в середине диапазона и существенное систематическое смещение выборки.

Представленные выше результаты валидации всех продуктов для рекомендованного временного диапазона в ± 3 ч показали, что TChl-*a* по спутниковым данным систематически завышен (Bias = 1,3), в отличие от остальных продуктов ($a_{ph}(443)$, $a_{CDM}(443)$, $a_{tot-w}(443)$ и $K_d(490)$), которые систематически недооцениваются (Bias от 0,44 до 0,75). При этом существует проблема высокого разброса спутниковых значений в узком диапазоне значений *in situ* (см. рис. 2а, 3а, 4а и 5а).

Для анализа причин отклонения спутниковых данных от *in situ* значений провели сравнительный анализ пространственной неоднородности спутниковых оценок в окружении конкретных станций (рис. 7, см. с. 17).

Для оценки пространственной изменчивости спутниковых продуктов вокруг *in situ* использовали данные с разницей ± 3 ч. В связи с временной разницей и исключением из выборки станций, расположенных вблизи берега (Recommendations..., 2019), в анализе применяли данные для 18 станций (см. рис. 7).

Сравнительная оценка значений TChl-*a* по спутниковым данным с результатами натурных измерений по станциям (см. рис. 7) показала неоднородность характера ошибки продукта: спутниковые значения оказались существенно завышены (в 4,0–9,9 раза) на станциях № 6–8 и занижены (в 1,2–3,0 раза) на станциях № 42 и 43. На остальных станциях значения TChl-*a in situ* находились или в пределах диапазонов изменчивости спутниковых значений, или были к ним близки. Пространственная неоднородность вокруг станций *in situ* по спутниковым данным варьировала от 4,3 до 52 % (в среднем CV = 18 %) (табл. 2), а ширина диапазона — от 0,11 до 6,6 мг·м⁻³ и в среднем составила 1,4 мг·м⁻³.

Сравнительная оценка точности OLCI $a_{ph}(443)$ по спутниковым данным (см. рис. 7), аналогично для TChl-*a*, показала неоднородность характера ошибки продукта: завышение значений (1,3–27 раз) для станций № 7 и 8 и систематическое занижение на большинстве станций (в 1,1–104 раза на станциях № 40–43, № 64–66 по OLCI Sentinel-3A и № 4, 17, 42, 43 и 63 по OLCI Sentinel-3B). Значения $a_{ph}(443)$ *in situ* находились в пределах изменчивости $a_{ph}(443)$ по спутниковым данным на станциях № 4, RS1 и RS2 по OLCI Sentinel-3A и № 3, 6, 16, 64 и RS6 по OLCI Sentinel-3B (см. рис. 7). Пространственная неоднородность $a_{ph}(443)$ вокруг станций *in situ* по спутниковым данным была значительной и варьировала в пределах 7,7–86 % (в среднем CV = 40 %) (табл. 2), а ширина диапазона составила 0,002–1,6 м⁻¹ (в среднем 0,14 м⁻¹). Наибольшая неоднородность отмечена для станций № 3 и 64 (CV составил 71 и 86 % соответственно, табл. 2).

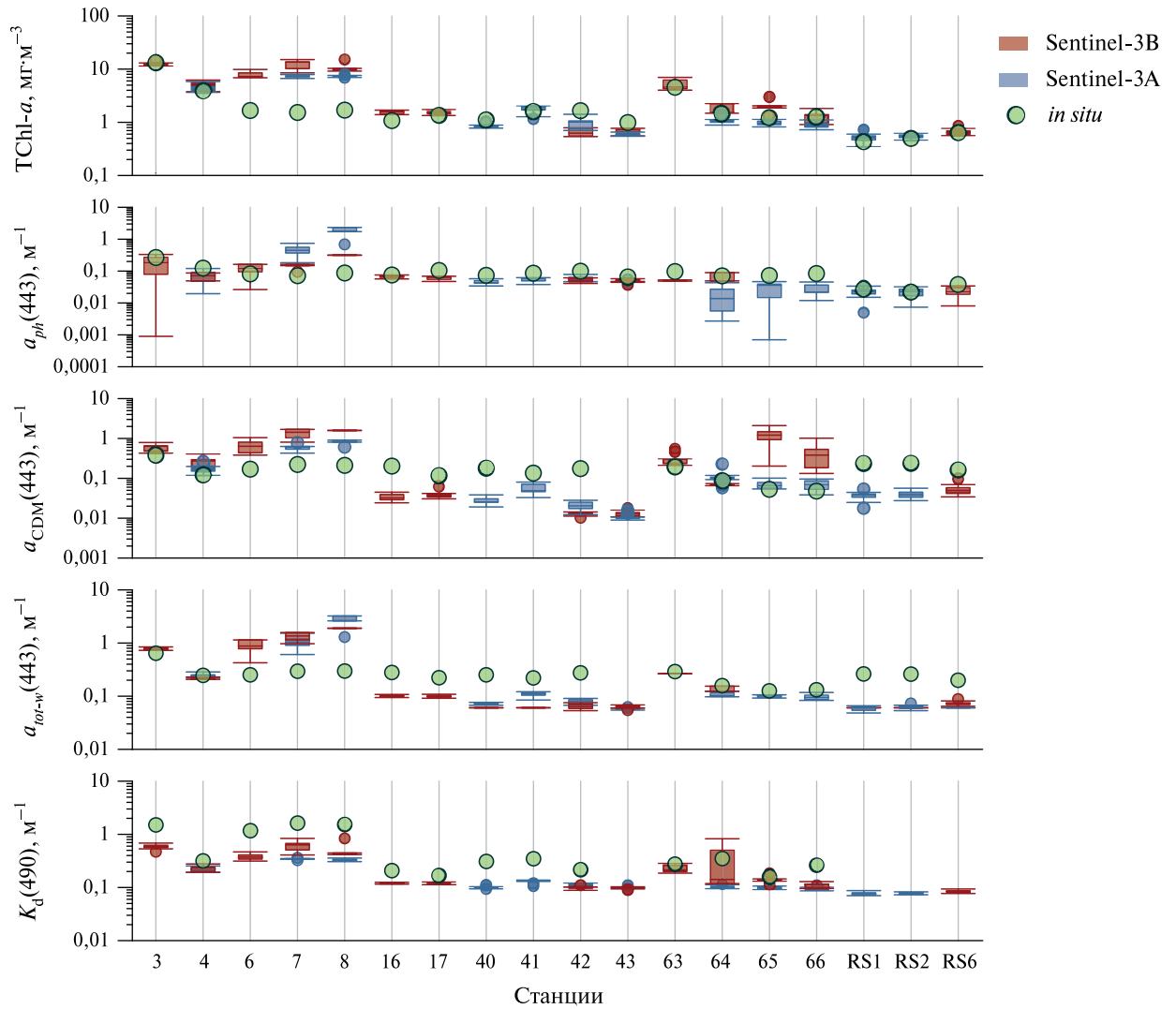


Рис. 7. Пространственная изменчивость спутниковых продуктов вокруг станции *in situ* в пределах ± 3 ч с момента отбора проб в области 3×3 пикселя для станций PM23/4 (3–66) и 5×5 пикселей для станций подспутникового разреза (RS1, RS2, RS6). IQR (англ. InterQuartile Range) фактор равен 1,5

Сравнительная оценка точности $a_{\text{CDM}}(443)$ показала наибольшую неоднородность в характере ошибки среди всех рассматриваемых продуктов. Завышение спутниковых значений для $a_{\text{CDM}}(443)$ (в 1,1–40 раз) наблюдалось не только на станциях № 6–8, но и на станциях № 3, 65 и 66 (см. рис. 7). Существенное занижение $a_{\text{CDM}}(443)$ (в 1,2–17 раз) отмечено для станций № 16, 17, 40–42, RS1, RS2 и RS6 (см. рис. 7). Пространственная неоднородность $a_{\text{CDM}}(443)$ по спутниковым данным вокруг станций *in situ* варьировала в пределах 17–74 % и в среднем составила 35 % (табл. 2). В значительной степени варьировала ширина диапазона изменчивости $a_{\text{CDM}}(443)$ по спутниковым данным: от 0,001 до 1,9 m^{-1} , со средним значением 0,26 m^{-1} .

Для $a_{\text{tot-w}}(443)$ наблюдалось значительное завышение спутниковых значений (в 1,7–11 раз) для станций № 6–8 и незначительное (в 1,1–1,3 раза) — для станции № 3 (см. рис. 7). Так как $a_{\text{tot-w}}(443)$ является суммой $a_{\text{ph}}(443)$ и $a_{\text{CDM}}(443)$, а у $a_{\text{ph}}(443)$ практически не менялся характер ошибки, то в результате для $a_{\text{tot-w}}(443)$ повторяется характер ошибок $a_{\text{CDM}}(443)$: существенное занижение (в 1,8–5,4 раза) для станций № 16, 17, № 40–42, RS1, RS2 и RS6 (см. рис. 7). Пространственная неоднородность для $a_{\text{tot-w}}(443)$ была незначительной: значения CV $a_{\text{tot-w}}(443)$ варьировали в пределах 0,06–33 % и в среднем составили 11 % (табл. 2). Ширина диапазона изменчивости $a_{\text{tot-w}}(443)$ повторяет диапазон $a_{\text{CDM}}(443)$: от 0,001 до 1,9 m^{-1} , и в среднем — 0,20 m^{-1} .

Таблица 2. Пространственная вариабельность (CV) спутниковых продуктов вокруг станции *in situ* в пределах ± 3 ч с момента отбора проб

Станция	Окрестность	Δt , мин	Sentinel-	CV, %				
				TChl- <i>a</i>	$a_{ph}(443)$	$a_{CDM}(443)$	$a_{tot-w}(443)$	$K_d(490)$
3	3×3	150	3B	8	71	21	5	11
4		180		19	56	41	6	14
4		140	3A	16	49	25	9	9
6		170	3B	15	57	38	33	15
7		80		21	54	49	23	25
7		120	3A	5	50	37	28	3
8		35		4	59	54	33	5
8		75	3B	47	44	44	0	52
16		25		7	9	21	5	3
17		150	3A	9	11	24	6	4
40		180		8	15	20	4	6
41		110	3B	19	17	30	12	8
42		60		26	20	28	11	7
42		0	3B	36	36	35	11	34
43		170	3A	6	8	21	4	7
43		110	3B	10	13	17	7	5
63		180		24	44	37	0	17
64		50	3A	52	53	50	13	84
64		85		15	86	46	9	6
65		70	3B	26	—	54	—	17
65		35	3A	11	58	25	5	5
66		170	3B	27	—	74	—	11
66		135	3A	14	41	29	12	7
RS1	5×5	110	3A	27	50	39	10	21
RS2		35		9	31	22	7	4
RS6		70	3B	11	39	25	7	5

В отличие от рассмотренных ранее продуктов, для $K_d(490)$ характерна недооценка спутниковых значений в 1,1–5 раз (см. *рис. 7*). Только в двух случаях $K_d(490)$ по натурным данным находился в пределах диапазонов изменчивости спутникового продукта: станции № 63 и 64 по OLCI Sentinel-3B (см. *рис. 7*). Пространственная вариабельность $K_d(490)$ в среднем была незначительной, всего 15 %, а весь диапазон CV составил 2,8–84 % (*табл. 2*).

На станциях № 6–8 TChl-*a*, $a_{ph}(443)$, $a_{CDM}(443)$ и $a_{tot-w}(443)$ по спутниковым данным оказываются преимущественно завышены, а $K_d(490)$ — занижен (см. *рис. 7*). Для TChl-*a*, за исключением станций № 6–8, прослеживается единая динамика изменчивости значений продукта: т.е. при увеличении натурных значений увеличиваются спутниковые и наоборот. Динамика изменчивости $a_{ph}(443)$ менее выражена (относительно TChl-*a*) и касается лишь верхних границ изменчивости продукта по спутниковым данным, за исключением станций № 6–8 (см. *рис. 7*). Спутниковый продукт $a_{CDM}(443)$ определяется с наибольшей ошибкой, что негативно сказывается на точности $a_{tot-w}(443)$ (так как $a_{tot-w}(443) = a_{ph}(443) + a_{CDM}(443)$). Наибольшее значение CV (в среднем 40 %) выявлено для $a_{ph}(443)$.

Для восьми станций (№ 4, 7, 8, 42, 43, 64–66) удалось получить два снимка: OLCI Sentinel-3A и OLCI Sentinel-3B (см. *табл. 2* и *рис. 7*). Время между зондированиями

Sentinel-3A и Sentinel-3B составило от 40 до 60 мин. Диапазоны пространственной изменчивости продуктов по данным OLCI Sentinel-3A и OLCI Sentinel-3B в большинстве случаев сильно различались (см. *рис. 7*). Исключение составляет $a_{tot-w}(443)$, для него диапазоны пространственной изменчивости перекрывались во всех случаях. Разница между данными в коротком временном промежутке (40–60 мин), вероятно, связана с высокой переменной облачностью в районе исследований и различиями в углах обзора OLCI Sentinel-3A и OLCI Sentinel-3B (Zibordi et al., 2022). В большинстве случаев значения TChl-*a* по OLCI Sentinel-3A были ниже, чем по OLCI Sentinel-3B (см. *рис. 7a* и *8a*), что согласуется с результатами Sentinel-3B OLCI Ocean Color Reprocessing 2022.0 (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/reprocessing/r2022/s3b/>). Эта тенденция сохраняется и для остальных продуктов: $a_{ph}(443)$, $a_{CDM}(443)$, $a_{tot-w}(443)$ и $K_d(490)$ (см. *рис. 7* и *8*).

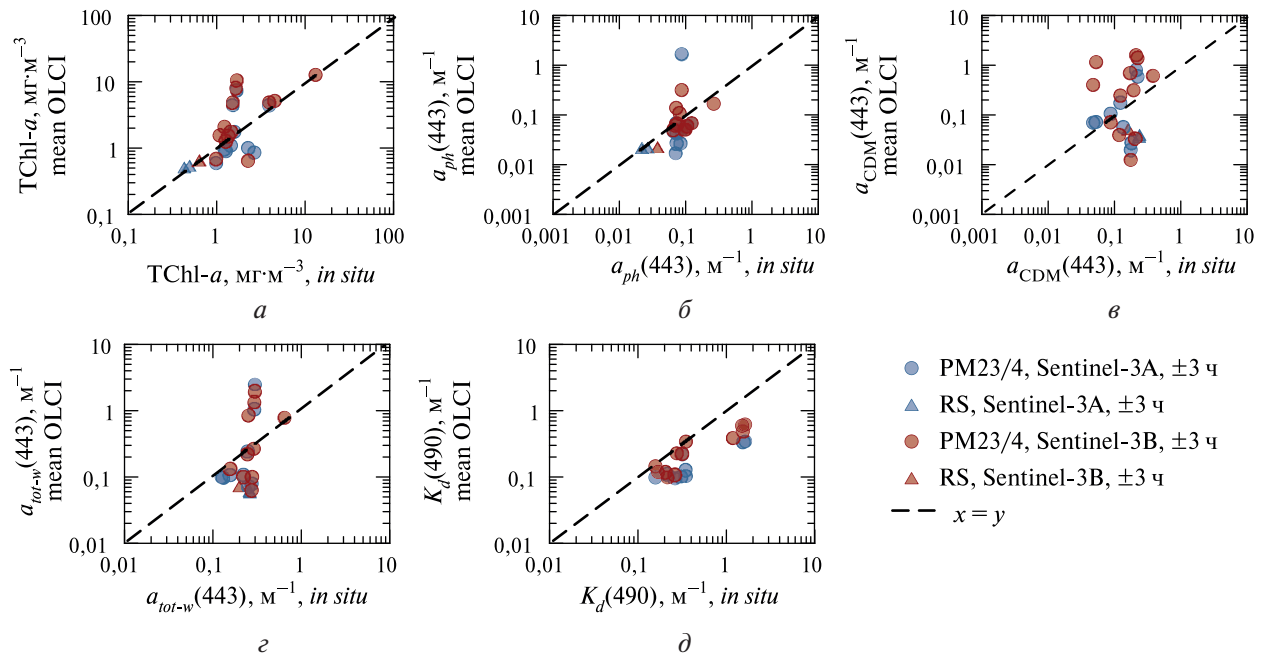


Рис. 8. Сравнение средних значений спутниковых продуктов вокруг станции *in situ* в пределах ± 3 ч с момента отбора проб с результатами натурных наблюдений

В рекомендациях по валидации спутниковых данных (Recommendations..., 2019) и в публикациях (Giannini et al., 2021; Gilerson et al., 2024) можно встретить усреднённые значения спутниковых продуктов вокруг станции *in situ* (см. *рис. 8*). Такой подход существенно уменьшает разброс данных и увеличивает количество пар сравнений (отсутствие данных в пределах станции нивелируется данными в окрестности). Однако такой подход снижает качество валидации для акваторий с высокой пространственной неоднородностью по биооптическим показателям вод.

Прибрежные воды характеризуются относительно высоким содержанием основных оптически активных компонент и доминированием CDOM (CDM) (Efimova et al., 2018; Kirk, 2011). Это приводит к изменению не только прозрачности воды, но и спектральных свойств восходящего излучения (Kirk, 2011). Для анализа причин отмеченной низкой точности восстановления значений спутниковых продуктов рассмотрим влияние неживых оптически активных компонент NAP и CDOM на точность оценки TChl-*a*, $a_{tot-w}(443)$ и $K_d(490)$ (*рис. 9*, см. с. 20).

Из *рис. 9* видно, что значения TChl-*a*, $a_{tot-w}(443)$ и $K_d(490)$, восстановленные с большой ошибкой, коррелируют с высоким (как относительным, так и абсолютным) содержанием NAP. Однако если для TChl-*a* и $a_{tot-w}(443)$ в случаях высокого содержания NAP характерно завышение значений (см. *рис. 9a, б, г, д*), то для $K_d(490)$, наоборот, характерна недооценка значений спутникового продукта (см. *рис. 9в, е*).

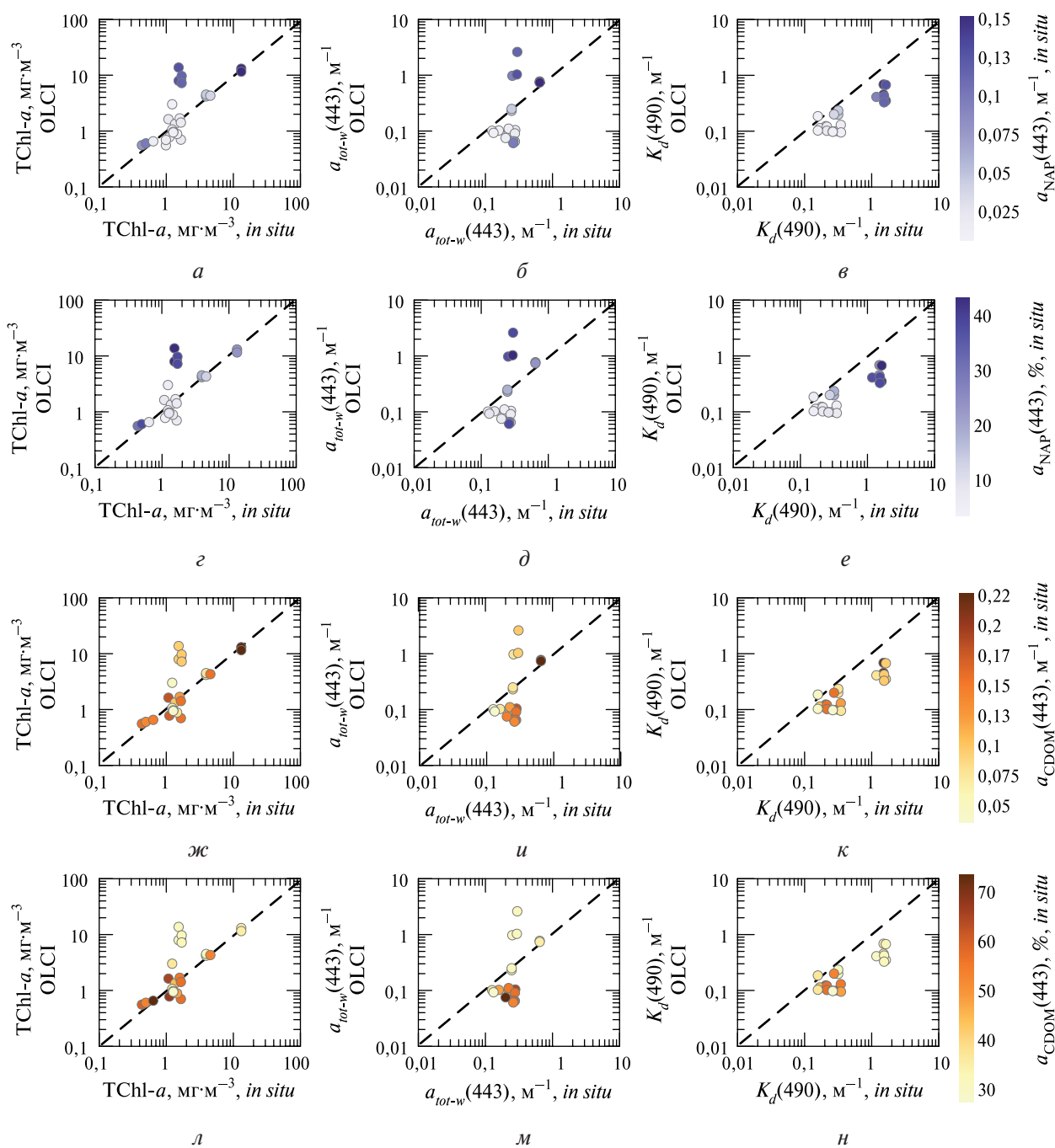


Рис. 9. Сравнение значений спутниковых продуктов с результатами натурных измерений в пределах ± 3 ч с момента отбора проб. Цветом отмечены изменения величин: a , b , $в$ — абсолютного вклада неживого взвешенного вещества ($a_{NAP}(443)$, m^{-1} , *in situ*) в $a_{tot-w}(443)$, *in situ*; $г$, $д$, $е$ — относительного вклада неживого взвешенного вещества ($a_{NAP}(443)$, %, *in situ*) в $a_{tot-w}(443)$, *in situ*; $ж$, $и$, $к$ — абсолютного вклада окрашенного растворённого органического вещества ($a_{CDOM}(443)$, m^{-1} , *in situ*) в $a_{tot-w}(443)$, *in situ*; $л$, $м$, $н$ — относительного вклада окрашенного растворённого органического вещества ($a_{CDOM}(443)$, %, *in situ*) в $a_{tot-w}(443)$, *in situ*

Наибольшая ошибка в определении TChl- a и $a_{tot-w}(443)$ (см. рис. 9а, б) была на станциях № 6–8. Для этих станций относительный вклад NAP в $a_{tot-w}(443)$ составил более 35 % (от 37 до 43 %), а значения $a_{NAP}(443)$ варьировали от 0,094 до 0,13 m^{-1} . Для станций № 6–8 наблюдалось завышение значений TChl- a , $a_{ph}(443)$, $a_{CDOM}(443)$ и $a_{tot-w}(443)$ (см. рис. 7). Высокое содержание NAP на этих станциях может быть связано с поступлением взвешенных веществ с водами реки Нальчева за счёт разрушения пород на склонах вулканов, преимущественно

Авачинского вулкана (Чалов и др., 2022). Для Авачинского залива в целом характерно существенное влияние материкового стока на гидрохимические характеристики вод (Lobanov et al., 2023). Для этих же станций наблюдалось завышение $a_{\text{CDOM}}(443)$, $a_{\text{ph}}(443)$ и существенное завышение $a_{\text{tot-w}}(443)$ и TChl- a по спутниковым данным (см. рис. 2 и 3).

Относительный вклад NAP в $a_{\text{tot-w}}(443)$ от 30 до 38 % и абсолютный от 0,079 до 0,10 м^{-1} отмечен для станций № RS1 и RS2, находящихся в открытых водах. Для этих станций наблюдалась существенная недооценка $a_{\text{CDOM}}(443)$ и $a_{\text{tot-w}}(443)$ по спутниковым данным (см. рис. 7). Для станции № RS6 наблюдался аналогичный характер ошибки, но вклад NAP в $a_{\text{tot-w}}(443)$ составил всего 7,4 %, а абсолютное значение — 0,015 м^{-1} .

Вклад NAP в $a_{\text{tot-w}}(443)$ в 24 % и 0,15 м^{-1} зафиксировали на станции № 3, расположенной в Авачинской бухте, куда впадают реки Авача и Кихчик. Однако в этом случае содержание NAP не повлияло на ошибку определения продуктов TChl- a и $a_{\text{ph}}(443)$, но для $a_{\text{CDOM}}(443)$ и $a_{\text{tot-w}}(443)$ на станции № 3 наблюдалось незначительное завышение спутниковых значений (см. рис. 7).

Завышение спутниковых оценок при высоком относительном и абсолютном содержании NAP происходит только на станциях, подверженных береговому стоку, что, вероятно, связано с высокими светорассеивающими свойствами минеральной взвеси (Stramski, Kiefer, 1991), которые влияют на спектральные характеристики восходящего из водной толщи излучения ($R_{\text{rs}}(\lambda)$, ср^{-1}) (Kirk, 2011; Mobley, 2022).

Была выполнена проверка согласованности результатов восстановления значений спутниковых продуктов, в частности TChl- a и $a_{\text{ph}}(443)$, которые изменяются согласованно (Bricaud et al., 1995). В нашем исследовании степенная зависимость между $a_{\text{ph}}(443)$ и TChl- a по спутниковым данным оказалась выражена с низким коэффициентом корреляции ($r^2 = 0,21$, рис. 10а), из чего можно сделать вывод о низкой согласованности спутниковых продуктов.

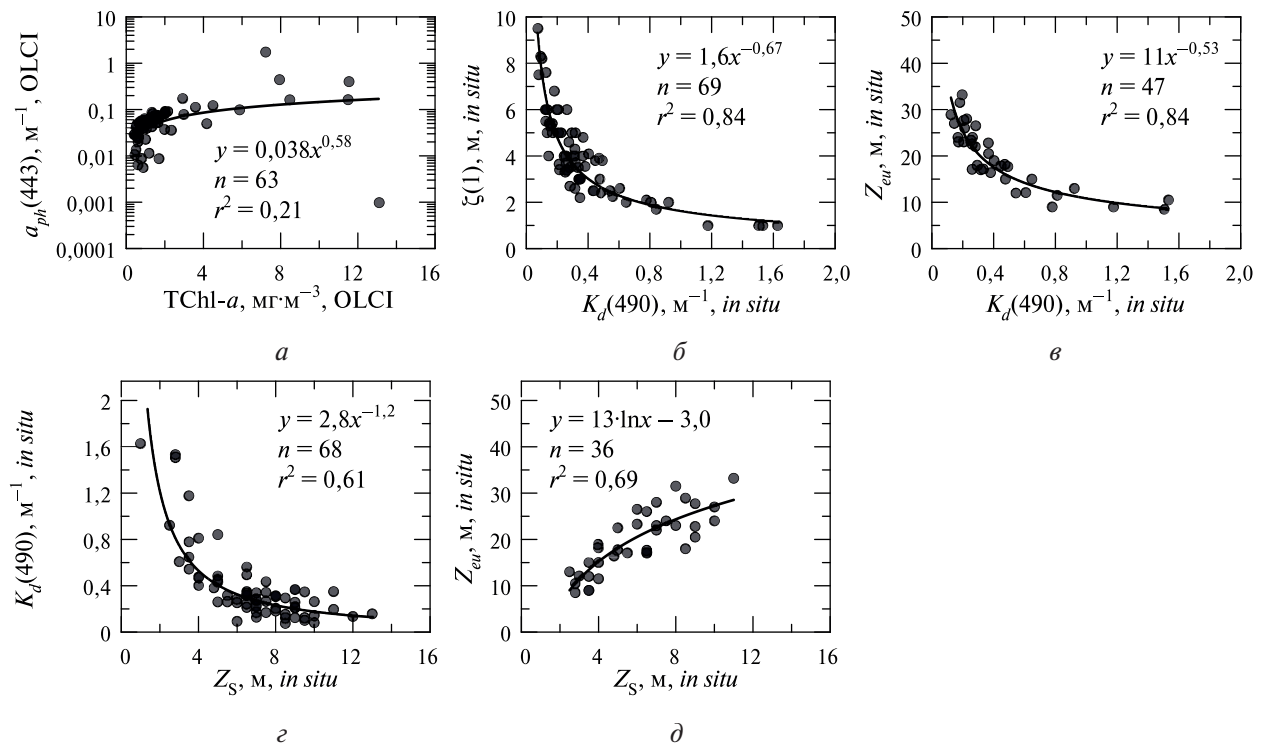


Рис. 10. Зависимость $a_{\text{ph}}(443)$ от TChl- a , по спутниковым данным (а); зависимость $\zeta(1)$ от $K_d(490)$ (б); зависимость Z_{eu} от $K_d(490)$ (в); связь между Z_s и $K_d(490)$ (г); связь между Z_{eu} и Z_s по натурным данным в прибрежных водах Камчатского полуострова в период с 17 августа по 11 сентября 2023 г. (д)

Для вод вблизи Камчатского полуострова в августе – сентябре 2023 г. по натурным данным установлена обратная зависимость $\zeta(1)$ от $K_d(490)$, описываемая степенным уравнением (см. рис. 10б), что позволит оценивать поверхностный слой моря толщиной в одну оптическую глубину, определяющий $R_{rs}(\lambda)$. Выявлена корреляция между Z_{eu} и $K_d(490)$ и Z_S (см. рис. 10в, д), что даст возможность вычислять глубину эвфотического слоя на основе результатов измерения Z_S и $K_d(490)$. Установлена обратная зависимость $K_d(490)$ от Z_S (см. рис. 10г).

Выводы

Результаты сравнения восстановленных значений спутниковых продуктов в рамках разных временных диапазонов показали, что при использовании спутниковых данных выбор временного интервала имеет огромную значимость. Увеличение временного диапазона неизбежно приводит к искажению результатов валидации и, в некоторых случаях, может сказаться на характере смещения выборки (систематическое завышение и занижение). Близкие диапазоны изменчивости и средние значения продуктов по натурным и спутниковым данным не являются подтверждением высокой точности спутниковых оценок, так как не исключают широкий разброс значений в середине диапазона и существенное систематическое смещение выборки (Bias).

Представленные выше результаты валидации восстановленных значений спутниковых продуктов для рекомендованного временного диапазона в ± 3 ч показали, что TChl-*a* по спутниковым данным систематически завышен (Bias = 1,3), в отличие от остальных продуктов ($a_{ph}(443)$, $a_{CDOM}(443)$, $a_{tot-w}(443)$ и $K_d(490)$), которые систематически недооцениваются (Bias от 0,44 до 0,75). При этом существует проблема высокого разброса спутниковых значений в узком диапазоне значений *in situ*.

Показано, что на точность восстановления значений спутниковых продуктов влияет содержание неживого взвешенного и растворённого органического вещества в верхнем слое вод.

Статистически обоснованная низкая точность восстановления значений доступных спутниковых продуктов Sentinel-3A/3B OLCI L2 (TChl-*a*, $a_{ph}(443)$, $a_{CDOM}(443)$, $a_{tot-w}(443)$ и $K_d(490)$) ограничивает их использование для мониторинга морских экосистем Камчатки.

Необходимо развитие регионального подхода, который учитывает закономерности изменчивости спектральных показателей поглощения света основными оптически активными компонентами в конкретной акватории.

Отбор и первичная обработка проб проведены в ходе научной экспедиции в рамках научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-01593-23-06). Измерения на спектрофотометре Lambda-35 (PerkinElmer) и анализ натурных данных выполнены в рамках государственного задания № 124030100106-2 (ФИЦ ИнБЮМ). Измерения на спектрофотометре Shimadzu UV-2600 UV-VIS Spectrophotometer проводились в рамках государственного задания № 124022100080-0 (ТОИ ДВО). Валидация спутниковых данных выполнена в рамках проекта № FZNS-2024-0037. Авторы выражают благодарность ОВРГ/ОВ.ДААС за доступ к спутниковым данным.

Литература

1. Букин О. А., Пермяков М. С., Зенкин О. Л., Хованец В. А., Пузанков К. А., Буров, Д. В., Салюк П. А. Сравнительный анализ результатов измерения концентраций хлорофилла-*a*, полученных с использованием данных сканера цвета морской поверхности SeaWiFS и методом лазерной индуцированной флуоресценции в Охотском море // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 4. С. 84–91.
2. Куренков И. И. Красный прилив в Авачинской бухте // Рыбное хоз-во. 1974. Вып. 4. С. 20–21.
3. Определение относительной прозрачности морской воды // Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Росгидромет, 2016. С. 339–340.

4. Орлова Т. Ю. Красные приливы и токсические микроводоросли в дальневосточных морях России // Вестн. Дальневосточного отд-ния Российской акад. наук. 2005. № 1. С. 27–31.
5. Пермяков М. С., Букин О. А., Акмайкин Д. А., Салюк П. А., Подопригора Е. Л. О региональных алгоритмах восстановления концентрации хлорофилла А по данным сканера SeaWiFS для Охотского моря // Исследовано в России. 2004. Т. 7. С. 972–981.
6. Скороход Е. Ю., Чурилова Т. Я., Ефимова Т. В. и др. Биооптические характеристики прибрежных вод Черного моря вблизи Севастополя: оценка точности спутниковых продуктов, восстановленных по данным MODIS и VIIRS // Морской гидрофиз. журн. 2021. Вып. 37. № 2 (218). С. 233–246. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-233-246>.
7. Цхай Ж. Р., Хен Г. В. Сравнение спутниковых и судовых данных о концентрации хлорофилла-а в Охотском море и прилегающей акватории // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 187–198. <https://doi.org/10.7868/S0205961415060093>.
8. Чалов С. Р., Цыпленков А. С., Школьный Д. И. и др. К оценке возможного влияния материкового стока на гибель гидробионтов в Авачинском заливе Тихого океана (Камчатка) // Изв. Русского геогр. об-ва. 2022. Вып. 154. № 4. С. 69–84. <https://doi.org/10.31857/S0869607122040048>.
9. Bondur V., Zamshin V., Chvertkova O. et al. Detection and analysis of the causes of intensive harmful Algal bloom in Kamchatka based on satellite data // J. Marine Science and Engineering. 2021. V. 9. No. 10. Article 1092. <https://doi.org/10.3390/jmse9101092>.
10. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // J. Geophysical Research: Oceans. 1995. V. 100. No. C7. P. 13321–13332. <https://doi.org/10.1029/95JC00463>.
11. Churilova T., Skorokhod E., Suslin V. et al. Assessment of the accuracy of Sentinel-3 OLCI L2 products retrieved by standard and regional algorithms for ecological monitoring of the Black Sea coastal and shelf waters // Regional Studies in Marine Science. 2024. V. 79. Article 103847. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103847>.
12. Darecki M., Stramski D. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 89. No. 3. P. 326–350. <https://doi.org/doi:10.1016/j.rse.2003.10.012>.
13. Efimova T., Churilova T., Moiseeva N. et al. Dynamics in pigment concentration and light absorption by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Black Sea coastal waters (near Sevastopol) // Proc. SPIE: 24th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2018. V. 10833. Article 108336C. <https://doi.org/10.1117/12.2504657>.
14. Giannini F., Hunt B. P., Jacoby D., Costa M. Performance of OLCI Sentinel-3A satellite in the Northeast Pacific coastal waters // Remote Sensing of Environment, 2021. V. 256. Article 112317. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112317>.
15. Gilerson A., Malinowski M., Agagliate J. et al. Development of VIIRS-OLCI chlorophyll-a product for the coastal estuaries // Frontiers in Marine Science. 2024. V. 11. Article 1476425. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1476425>.
16. Hallegraeff G. M. Harmful algal blooms: a global overview // Manual on Harmful Marine Microalgae / eds. G. M. Hallegraeff et al. V. 2. Paris, France: UNESCO, 2004. P. 25–49.
17. Holm-Hansen O., Riemann B. Chlorophyll a determination: Improvements in methodology // Oikos. 1978. V. 30. No. 3. P. 438–447. <https://doi.org/10.2307/3543338>.
18. Hu C., Feng L., Lee Z. et al. Improving satellite global chlorophyll a data products through algorithm refinement and data recovery // J. Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. No. 3. P. 1524–1543. <https://doi.org/10.1029/2019JC014941>.
19. Inherent optical property measurements and protocols: Absorption coefficient // IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation / eds. Neeley A. R., Mannino A. V. I.O. IOCCG, Dartmouth, NS, Canada, 2018. 78 p. <https://dx.doi.org/10.25607/OBP-119>.
20. Isada T., Hooker S. B., Taniuchi Y., Suzuki K. Evaluation of retrieving chlorophyll a concentration and colored dissolved organic matter absorption from satellite ocean color remote sensing in the coastal waters of Hokkaido, Japan // J. Oceanography. 2022. V. 78. No. 4. P. 263–276. <https://doi.org/10.1007/s10872-022-00633-w>.
21. Iwamura T., Nagai H., Ichimura S.-E. Improved methods for determining contents of chlorophyll, protein, ribonucleic acid, and deoxyribonucleic acid in planktonic populations // Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie. 1970. V. 55. No. 1. P. 131–147. <https://doi.org/10.1002/iroh.19700550106>.
22. Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemie und Physiologie der Pflanzen. 1975. V. 167. No. 2. P. 191–194. [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3).
23. Kirk J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 665 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139168212>.

24. Lobanov V. B., Sergeev A. F., Semkin P. Y. et al. Study of abiotic factors controlling marine ecosystem dynamics and formation of anomalous conditions in coastal waters of the Far East in the 80th cruise of the R/V Professor Gagarinskiy // *Oceanology*. 2023. V. 63. No. 6. P. 931–933. <https://doi.org/10.1134/S0001437023060085>.
25. Lorenzen C. J. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations // *Limnology and oceanography*. 1967. V. 12. P. 343–346. <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>.
26. Mannino A., Novak M. G., Nelson N. B., Belz M., Berthon J.-F., Blough N. V., Boss E., Bricaud A., Chaves J., Del Castillo C., Del Vecchio R., D'Sa E. J., Freeman S., Matsuoka A., Miller R. L., Neeley A. R., Röttgers R., Tzortziou M., Werdell P. J. Measurement protocol of absorption by Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) and other dissolved materials // *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation* / eds. Mannino A., Novak M. G. V. 5.0. IOCCG, Dartmouth, NS, Canada, 2019. 77 p.
27. Mobley C. D. The oceanic optics book. International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG), Dartmouth, NS, Canada, 2022. 924 p. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1710>.
28. Orlova T. Y., Konovalova G. V., Stonik I. V., Morozova T. V., Shevchenko O. G. Harmful algal blooms on the eastern coast of Russia // *PICES Scientific Report No. 23 2002. Harmful algal blooms in the PICES region of the North Pacific* / eds. F. J. R. “Max” Taylor, V. L. Trainer. Sidney, B. C., Canada: North Pacific Marine Science Organization (PICES), 2002. P. 47–73.
29. Orlova T. Y., Aleksanin A. I., Lepskaya E. V. et al. A massive bloom of *Karenia* species (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020 // *Harmful Algae*. 2022. V. 120. Article 102337. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102337>.
30. Recommendations for Sentinel-3 OLCI Ocean Colour product validations in comparison with in situ measurements — Matchup Protocols. EUM/Sen3/DOC/19/1092968. Iss. v5B. EUMETSAT, Darmstadt, Germany, 2019. 10 p.
31. Salyuk P. A., Stepanov I. E., Sokolova E. B. et al. Developing and using empirical bio-optical algorithms in the western part of the Bering Sea in the late summer season // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 22. Article 5797. <https://doi.org/10.3390/rs14225797>.
32. Seegers B. N., Stumpf R. P., Schaeffer B. A. et al. Performance metrics for the assessment of satellite data products: an ocean color case study // *Optic Express*. 2018. V. 26. No. 6. P. 7404–7422. <https://doi.org/10.1364/OE.26.007404>.
33. Stramski D., Kiefer D. A. Light scattering by microorganisms in the open ocean // *Progress in Oceanography*. 1991. V. 28. No. 4. P. 343–383. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90032-H](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90032-H).
34. Werdell P. J., Bailey S. W. An improved in-situ bio-optical data set for ocean color algorithm development and satellite data product validation // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 98. P. 122–140. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.001>.
35. Zibordi G., Kwiatkowska E., Mélin F. et al. Assessment of OLCI-A and OLCI-B radiometric data products across European seas // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 272. Article 112911. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112911>.

Validation of Sentinel-3/OLCI L2 products along the southwestern and southeastern coasts of the Kamchatka Peninsula

E. Yu. Skorokhod^{1,3}, T. Ya. Churilova^{1,3}, N. A. Moiseeva¹,
P. A. Salyuk², T. V. Efimova^{1,3}

¹ A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS
Sevastopol 299011, Russia
E-mail: elenaskorokhod@ibss-ras.ru

² V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia

³ Far Eastern Federal University, Vladivostok 690922, Russia

The present study aims at assessing the accuracy of satellite data products in view of further implementation of integrated monitoring of the coastal marine ecosystem of Kamchatka. Validation of Sentinel-3A/3B OLCI L2 satellite products has been carried out based on the results of *in situ*

measurements during the 23/4 research cruise along the southwestern and southeastern coast of Kamchatka and along the subsatellite track from the Sea of Okhotsk to the Sea of Japan through La Perouse Strait aboard Professor Multanovskiy passenger ship in August–September 2023. A systematic underestimation of light absorption coefficient by phytoplankton at 443 nm, light absorption coefficient by colored detrital matter at 443 nm and diffuse attenuation coefficient at 490 nm along with overestimation of chlorophyll *a* concentration derived from satellite data was revealed. At the same time, there is a problem of high dispersion of satellite values in a narrow range of *in situ* values. It is shown that the accuracy of satellite retrievals is affected by the content of non-algal particles and colored dissolved organic matter in the upper water layer. Low accuracy of available Sentinel-3A/3B OLCI L2 satellite products (chlorophyll *a* concentration, light absorption coefficient by phytoplankton at 443 nm, light absorption coefficient by colored detrital matter at 443 nm and diffuse attenuation coefficient at 490 nm) is statistically substantiated. Such low accuracy limits their use for monitoring marine ecosystems of Kamchatka. It is necessary to develop a regional approach that takes into account the patterns of variability of light absorption spectral coefficient by the main optically active components in a specific water area.

Keywords: chlorophyll, light absorption, phytoplankton, NAP, CDOM, remote sensing, OLCI, Kamchatka, Sea of Okhotsk

Accepted: 16.01.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-9-27

References

1. Bukin O.A., Permyakov M.S., Zenkin O.L., Khovanets V.A., Puzankov K.A., Burov D.V., Salyuk P.A., Comparative analyses of the chlorophyll-*a* concentrations measured by SeaWiFS and by the laser induced fluorescence in the Sea of Okhotsk, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2003, No. 4, pp. 84–91 (in Russian).
2. Kurenkov I. I., Red tide in Avacha Bay, *Rybnoe khozyaistvo*, 1974, Iss. 4, pp. 20–21 (in Russian).
3. Determination of the relative transparency of sea water, In: *Rukovodstvo po gidrologicheskim rabotam v okeanakh i moryakh* (Guide to hydrological work in the oceans and seas), 3rd ed., Moscow: Rosgidromet, 2016, pp. 339–340 (in Russian).
4. Orlova T. Yu., Red tides and toxic microalgae in the far eastern seas of Russia, *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*, 2005, No. 1, pp. 27–31 (in Russian).
5. Permyakov M.S., Bukin O.A., Akmaykin D.A., Salyuk P.A., Podoprigora E. L., On regional algorithms for calculating chlorophyll A concentrations from the SeaWiFS satellite radiometer for the Sea of Okhotsk, *Issledovano v Rossii*, 2004, V. 7, pp. 972–981 (in Russian).
6. Skorokhod E. Yu., Churilova T. Ya., Efimova T. V. et al., Bio-optical characteristics of the Black Sea coastal waters near Sevastopol: Assessment of the MODIS and VIIRS products accuracy, *Physical Oceanography*, 2021, V. 28, Iss. 2, pp. 215–227, <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-2-215-227>.
7. Tshay Zh., Khen G., The comparison of satellite and in situ chlorophyll-*a* concentration of the Okhotsk Sea and adjacent waters, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 1–2, pp. 187–198 (in Russian), <https://doi.org/10.7868/S0205961415060093>.
8. Chalov S. R., Tsyplenkov A. S., Shkolny D. I. et al., Overland runoff and its impact on hydrobiont mortality in Avachinsky Gulf (Pacific Ocean, Kamchatka), *Proc. Russian Geographical Soc.*, 2022, Iss. 154, No. 4, pp. 69–84 (in Russian), <https://doi.org/10.31857/S0869607122040048>.
9. Bondur V., Zamshin V., Chvertkova O. et al., Detection and analysis of the causes of intensive harmful Algal bloom in Kamchatka based on satellite data, *J. Marine Science and Engineering*, 2021, V. 9, No. 10, Article 1092, <https://doi.org/10.3390/jmse9101092>.
10. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H., Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1995, V. 100, No. C7, pp. 13321–13332, <https://doi.org/10.1029/95JC00463>.
11. Churilova T., Skorokhod E., Suslin V. et al., Assessment of the accuracy of Sentinel-3 OLCI L2 products retrieved by standard and regional algorithms for ecological monitoring of the Black Sea coastal and shelf waters, *Regional Studies in Marine Science*, 2024, V. 79, Article 103847, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103847>.
12. Darecki M., Stramski D., An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea, *Remote Sensing of Environment*, 2004, V. 89, No. 3, pp. 326–350, <https://doi.org/doi:10.1016/j.rse.2003.10.012>.
13. Efimova T., Churilova T., Moiseeva N. et al., Dynamics in pigment concentration and light absorption by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Black Sea coastal waters

- (near Sevastopol), *Proc. SPIE: 24th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2018, V. 10833, Article 108336C, 10 p., <https://doi.org/10.1117/12.2504657>.
14. Giannini F., Hunt B. P., Jacoby D., Costa M., Performance of OLCI Sentinel-3A satellite in the Northeast Pacific coastal waters, *Remote Sensing of Environment*, 2021, V. 256, Article 112317, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112317>.
15. Gilerson A., Malinowski M., Agagliate J. et al., Development of VIIRS-OLCI chlorophyll-a product for the coastal estuaries, *Frontiers in Marine Science*, 2024, V. 11, Article 1476425, <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1476425>.
16. Hallegraeff G. M., Harmful algal blooms: a global overview, In: *Manual on Harmful Marine Microalgae*, G. M. Hallegraeff et al. (eds.), V. 2, Paris, France: UNESCO, 2004, pp. 25–49.
17. Holm-Hansen O., Riemann B., Chlorophyll a determination: Improvements in methodology, *Oikos*, 1978, V. 30, No. 3, pp. 438–447, <https://doi.org/10.2307/3543338>.
18. Hu C., Feng L., Lee Z. et al., Improving satellite global chlorophyll a data products through algorithm refinement and data recovery, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, V. 124, No. 3, pp. 1524–1543, <https://doi.org/10.1029/2019JC014941>.
19. Inherent optical property measurements and protocols: Absorption coefficient, In: *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*, Neeley A. R., Mannino A. (eds.), V. 1.0, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada, 2018, 78 p., <https://dx.doi.org/10.25607/OBP-119>.
20. Isada T., Hooker S. B., Taniuchi Y., Suzuki K., Evaluation of retrieving chlorophyll a concentration and colored dissolved organic matter absorption from satellite ocean color remote sensing in the coastal waters of Hokkaido, Japan, *J. Oceanography*, 2022, V. 78, No. 4, pp. 263–276, <https://doi.org/10.1007/s10872-022-00633-w>.
21. Iwamura T., Nagai H., Ichimura S.-E., Improved methods for determining contents of chlorophyll, protein, ribonucleic acid, and deoxyribonucleic acid in planktonic populations, *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 1970, V. 55, No. 1, pp. 131–147, <https://doi.org/10.1002/iroh.19700550106>.
22. Jeffrey S. W., Humphrey G. F., New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*1 and *c*2 in higher plants, algae and natural phytoplankton, *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 1975, V. 167, No. 2, pp. 191–194, [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3).
23. Kirk J. T. O., *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*, 3rd ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 665 p., <https://doi.org/10.1017/CBO9781139168212>.
24. Lobanov V. B., Sergeev A. F., Semkin P. Y. et al., Study of abiotic factors controlling marine ecosystem dynamics and formation of anomalous conditions in coastal waters of the Far East in the 80th cruise of the R/V Professor Gagarinskiy, *Oceanology*, 2023, V. 63, No. 6, pp. 931–933, <https://doi.org/10.1134/S0001437023060085>.
25. Lorenzen C. J., Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations, *Limnology and oceanography*, 1967, V. 12, pp. 343–346, <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>.
26. Mannino A., Novak M. G., Nelson N. B., Belz M., Berthon J.-F., Blough N. V., Boss E., Bricaud A., Chaves J., Del Castillo C., Del Vecchio R., D'Sa E. J., Freeman S., Matsuoka A., Miller R. L., Neeley A. R., Röttgers R., Tzortziou M., Werdell P. J., Measurement protocol of absorption by Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) and other dissolved materials, In: *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*, Mannino A., Novak M. G. (eds.), V. 5.0, IOCCG, Dartmouth, NS, Canada, 2019, 77 p.
27. Mobley C. D., *The oceanic optics book*, International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG), Dartmouth, NS, Canada, 2022, 924 p., <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1710>.
28. Orlova T. Y., Konovalova G. V., Stonik I. V., Morozova T. V., Shevchenko O. G., Harmful algal blooms on the eastern coast of Russia, In: *PICES Scientific Report No. 23 2002. Harmful algal blooms in the PICES region of the North Pacific*, F. J. R. “Max” Taylor, V. L. Trainer (eds.), Sidney, B. C., Canada: North Pacific Marine Science Organization (PICES), 2002, pp. 47–73.
29. Orlova T. Y., Aleksanin A. I., Lepskaya E. V. et al., A massive bloom of *Karenia* species (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020, *Harmful Algae*, 2022, V. 120, Article 102337, <https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102337>.
30. *Recommendations for Sentinel-3 OLCI Ocean Colour product validations in comparison with in situ measurements-Matchup Protocols*, EUM/SEN3/DOC/19/1092968, Iss. v5B, EUMETSAT, Darmstadt, Germany, 2019, 10 p.
31. Salyuk P. A., Stepochkin I. E., Sokolova E. B. et al., Developing and using empirical bio-optical algorithms in the western part of the Bering Sea in the late summer season, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 22, Article 5797, <https://doi.org/10.3390/rs14225797>.
32. Seegers B. N., Stumpf R. P., Schaeffer B. A. et al., Performance metrics for the assessment of satellite data products: an ocean color case study, *Optic Express*, 2018, V. 26, No. 6, pp. 7404–7422, <https://doi.org/10.1364/OE.26.007404>.

33. Stramski D., Kiefer D. A., Light scattering by microorganisms in the open ocean, *Progress in Oceanography*, 1991, V. 28, No. 4, pp. 343–383, [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90032-H](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90032-H).
34. Werdell P. J., Bailey S. W., An improved in-situ bio-optical data set for ocean color algorithm development and satellite data product validation, *Remote Sensing of Environment*, 2005, V. 98, pp. 122–140, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.001>.
35. Zibordi G., Kwiatkowska E., Mélin F. et al., Assessment of OLCI-A and OLCI-B radiometric data products across European seas, *Remote Sensing of Environment*, 2022, V. 272, Article 112911, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112911>.