

УДК 551.465.62

ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРОВ MODIS/AQUA И MODIS/TERRA

А. А. Коник^{1,2*}, А. В. Исаев¹, А. В. Зимин¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Нахимовский пр., 36, Москва, Россия, 117997), *konikrshu@gmail.com

² Московский физико-технический институт (Институтский пер., 9, Долгопрудный, Россия, 141701)

В настоящем исследовании выполнена оценка точности восстановления температуры поверхности Ладожского озера по данным радиометров MODIS, установленных на спутниках Aqua и Terra, в теплый период (май–октябрь) 2003–2013 гг. Для валидации привлекались 245 контактных измерений в поверхностном слое, полученных сотрудниками Института озероведения РАН, и 62 мгновенных спутниковых поля температуры поверхности обработки L2, полученных с использованием алгоритма NASA, с пространственным разрешением 1 км. Сопоставление спутниковых и *in situ* данных показало выраженную линейную зависимость с высокими коэффициентами детерминации ($R^2 > 0,9$), что подтверждает надежность MODIS для оценки пространственно-временной изменчивости поверхностной температуры воды. Вместе с тем выявлено систематическое положительное смещение спутниковых значений относительно судовых измерений, достигающее 0,5 °C. Детальный анализ ошибок показал, что данные MODIS/Aqua в среднем точнее данных MODIS/Terra (средняя абсолютная ошибка 0,73 °C против 0,85 °C). Однако для ошибки данных MODIS/Aqua характерна выраженная сезонная изменчивость: в мае–июне наблюдается значительное положительное смещение при низком разбросе, тогда как в июле–октябре систематическая ошибка снижается, но возрастает дисперсия. Ошибка данных MODIS/Terra демонстрирует временную стабильность на протяжении всего рассматриваемого периода (май–октябрь). Полученные результаты подтверждают принципиальную применимость обоих радиометров для мониторинга состояния Ладожского озера, однако различия в величине и сезонной динамике ошибок указывают на необходимость учета специфики каждого прибора при анализе сезонной изменчивости температуры поверхности воды и формировании рядов для оценки климатических характеристик.

Ключевые слова: температура поверхности воды; MODIS; *in situ*; валидация; Ладожское озеро

Для цитирования: Коник А. А., Исаев А. В., Зимин А. В. Оценки точности температуры поверхности воды Ладожского озера по данным радиометров MODIS/Aqua И MODIS/Terra // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 5–13. doi: 10.17076/lim2216

Финансирование. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект № 23-17-20010) и Санкт-Петербургского научного фонда (проект № 23-17-20010).

A. A. Konik^{1,2*}, A. V. Isaev¹, A. V. Zimin¹. ESTIMATION OF THE ACCURACY OF THE MODIS/AQUA AND MODIS/TERRA SATELLITE TEMPERATURES FOR LAKE LADOGA DURING THE WARM SEASON

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (3 Nakhimovskiy Ave., Moscow, Russia, 117997), *konikrshu@gmail.com

² Moscow Institute of Physics and Technology (9 Institutskij lane, 141701 Dolgoprudny, Russia)

This study assesses the accuracy of lake surface temperature (LST) retrievals for Lake Ladoga based on MODIS radiometers aboard the Aqua and Terra satellites during the warm season (May–October) from 2003 to 2013. The validation employed 245 *in situ* surface layer measurements collected by the Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, together with 62 instantaneous satellite L2 fields generated using the NASA algorithm with a spatial resolution of 1 km. A comparison between satellite and *in situ* observations revealed a pronounced linear relationship with high coefficients of determination ($R^2 > 0.9$), confirming the reliability of MODIS products for evaluating the spatio-temporal variability of lake surface temperature. At the same time, a systematic positive bias of satellite-derived values relative to ship-based measurements was identified, reaching up to 0.5 °C. A detailed error analysis demonstrated that MODIS/Aqua generally outperformed MODIS/Terra in terms of mean absolute error (0.73 °C vs. 0.85 °C), although it was characterized by pronounced seasonal variability: in May–June, Aqua exhibited substantial positive bias with low error dispersion, whereas in July–October the systematic bias decreased while variance increased markedly. By contrast, MODIS/Terra showed temporal stability, maintaining consistent bias and standard deviation values throughout the entire observation period, making its records more predictable and reliable for constructing long-term climate series. These findings confirm the fundamental applicability of both radiometers for monitoring the thermal state of Lake Ladoga, while highlighting the need to account for instrument-specific error characteristics when analyzing seasonal thermal dynamics and developing climate-quality datasets.

Keywords: satellite lake surface temperature; MODIS; *in situ*; validation; Lake Ladoga

For citation: Konik A. A., Isaev A. V., Zimin A. V. Estimation of the accuracy of the MODIS/Aqua and MODIS/Terra satellite temperatures for Lake Ladoga during the warm season. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 5–13. doi: 10.17076/lim2216

Funding. The research was supported by grants from the Russian Science Foundation (project No. 23-17-20010) and the St. Petersburg Science Foundation (project No. 23-17-20010).

Введение

В последние десятилетия накопленные архивы спутниковых наблюдений температуры поверхности Мирового океана и крупных озер позволяют исследовать изменчивость термического режима на временных масштабах от суточных до климатических. Вместе с тем большинство исследований, посвященных температурному режиму поверхностных вод крупных и замкнутых пресноводных водоемов, основаны преимущественно на данных *in situ* [Melnik et al., 2006; Boehrer et al., 2009; Современное..., 2021; Carmack, Vagle, 2021; Науменко, Гузиватый, 2022а, б, 2024; Carmack et al., 2024]. Это обусловлено рядом ограничений спутниковых методов: отсутствием эффективной атмосферной коррекции и специализированных региональных алгоритмов для конкретных водоемов. В документации, описывающей алгоритм получения температуры поверхности воды по

данным радиометров MODIS со спутников Aqua и Terra, указывается, что погрешность измерений температуры на озерах может достигать 1 °C (<https://seabass.gsfc.nasa.gov>, дата обращения: 10.09.2025).

В последние годы все большее внимание уделяется вопросам оценки качества восстановления температуры поверхности воды по данным спутниковых радиометров для крупных озер. Это открывает возможность получения одномоментной информации о температуре озера на всей его акватории, а при создании длительных рядов сведений – о термическом режиме акватории озера. Так, на основе данных радиометров AVHRR и MODIS и многолетних наблюдений с буйковых станций продемонстрирована применимость спутниковых измерений для оценки температурного режима Женевского и Боденского озер [Oesch et al., 2005]. При этом основным источником ошибок при восстановлении поверхностной температуры озер остается

облачность. Для Большого Соленого озера был разработан метод получения ежедневных валидированных карт температуры поверхности с повышенным пространственным разрешением, что позволило уменьшить среднеквадратичную ошибку на 60 % по сравнению со стандартным оперативным анализом [Grim et al., 2013]. В работе [Moukomla, Blanken, 2016] на примере акватории Великих Американских озер показано, что объединение спектральных каналов радиометра MODIS обеспечивает восстановление температурных полей при любых условиях облачности. Сравнение с данными *in situ* выявило высокую корреляцию (0,91) и небольшое стандартное отклонение (1,39 °C). Накопленный опыт исследований показывает, что валидация данными *in situ* является обязательным условием при использовании спутниковых измерений для достоверной оценки сезонной и межгодовой динамики температуры поверхности крупных озер. В этом контексте особый интерес представляет Ладожское озеро, крупнейший пресноводный водоем Европы, имеющий важное хозяйственное и экономическое значение. Температурный режим Ладожского озера является одним из основных факторов, оказывающих прямое влияние на функционирование его экосистемы [Malm et al., 1994; Гузиватый и др., 2020; Современное..., 2021]. Многолетние наблюдения *in situ* [Современное..., 2021] позволили установить общий внутригодовой ход температуры, выявить особенности динамики таких явлений, как термобар [Блохина, 2015], а также оценить их влияние на экосистему озера [Современное..., 2021]. Показано, что температурные поля отражают особенности динамики и переноса вод, включая апвеллинги, фронтальные зоны и вихревые структуры. При этом существенное влияние на термический режим оказывают атмосферные процессы, как непосредственно над акваторией озера, так и над его водосбором [Науменко, 2021]. Анализ спутниковых данных для оценки температуры озера выполнялся в ряде исследований. Например, в работе [Коросов и др., 2006] с использованием спутниковых данных SeaWiFS и AVHRR (1998–2004 гг.) восстановлены и проанализированы поля температуры поверхности воды, концентраций хлорофилла, минеральной взвеси и растворенного органического вещества в водах Ладожского озера. В работе [Тронин, 2016] выполнен детальный анализ многолетних спутниковых данных температуры поверхности за 1991–2015 гг., где был выявлен положительный тренд роста поверхностной температуры для всей акватории озера.

Имеющиеся работы по сопоставлению данных контактных и дистанционных наблюдений

температуры Ладожского озера выполнялись только для данных со спутников серии NOAA [Тихомиров, 1982, 1987]. Спутниковые данные продемонстрировали систематическое завышение температуры поверхности воды в мае–июне и занижение в середине июля по сравнению с измерениями *in situ*. Первый период соответствует фазе интенсивного прогрева водоема, второй – фазе умеренного прогрева и начала охлаждения. Наибольшие расхождения между контактными и дистанционными измерениями наблюдались в термоактивной зоне вблизи термобара [Тихомиров и др., 1987].

В настоящее время для изучения температуры поверхности воды Ладожского озера активно используются данные MODIS, в частности, для анализа положения термобара [Zimin et al., 2023]. Однако достоверность таких исследований остается под вопросом, поскольку специализированная валидация этих спутниковых данных до сих пор не проводилась.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка качества воспроизведения температуры поверхности Ладожского озера по спутниковым данным радиометров MODIS в теплый период 2003–2013 гг.

Материалы и методы

Сопоставление спутниковых и контактных измерений температуры поверхности озера проводилось для теплого периода (май–октябрь), что объясняется особенностями выполнения наблюдений. Для анализа использовались 245 *in situ* измерений в поверхностном слое, полученных сотрудниками Института озераведения РАН [Современное..., 2021] за май–октябрь 2003–2013 гг. Расположение точек *in situ* измерений, выполнявшихся на гидрологических станциях на акватории озера, представлено на рис. 1.

В качестве исходных спутниковых данных для проведения их валидации натурными наблюдениями привлекались 62 мгновенных поля радиометров MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)/Aqua и MODIS/Terra уровня обработки L2. Использовались данные стандартного алгоритма обработки, представленного в открытом доступе на сайте <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 10.09.2025). Пространственное разрешение данных составляло 1 км. Анализ спутниковых полей температуры выполнялся только для данных с маркерами качества (параметр *SST_qual*) стандартного алгоритма обработки 0 (отличное) и 1 (хорошее). Итоговая обеспеченность данными для валидации представлена в табл. 1.

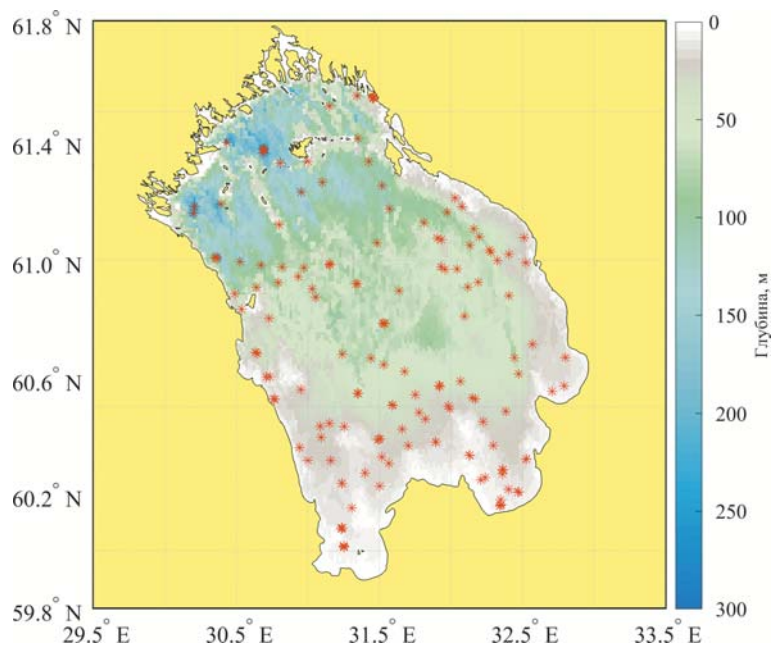


Рис. 1. Расположение гидрологических станций (красные звезды) за период с 2003 по 2013 год

Fig. 1. Location of hydrological stations (red stars) for the period from 2003 to 2013

Таблица 1. Количество значений *in situ* и полей спутниковых измерений температуры, используемых для валидации
Table 1. The total number of temperature values/fields after filtering to validate satellite measurements

Год Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<i>In situ</i>	21	17	40	13	30	18	27	31	16	20	12
Satellite	6	5	11	4	4	4	9	7	3	4	5

Таким образом, сопоставлялись спутниковые и *in situ* измерения, выполненные в те же даты и в совпадающих координатах. В итоге были сформированы ряды *in situ* наблюдений и дистанционных измерений для инструментов MODIS/Aqua и MODIS/Terra.

Оценка ошибок спутниковых измерений по сравнению с данными *in situ* проводилась как для всего временного диапазона в целом (май–октябрь), так и отдельно для двух временных интервалов. Первый соответствовал данным для мая–июня с длиной ряда (N) 69 значений для MODIS/Aqua и 68 значений для MODIS/Terra, второй – для периода с июля по октябрь с длиной ряда 176 значений для MODIS/Aqua и 164 значения для MODIS/Terra. Выбор двух дополнительных интервалов времени связан с тем, что в мае–июне в Ладожском озере наблюдается термобар, который приводит к формированию высокоградиентных зон в полях температуры, а также к разделению акватории озера на теплоактивную и термоинертную зоны.

В то время как второй выбранный временной интервал (июль–октябрь), напротив, характеризуется умеренным прогревом и охлаждением, что соответствует равномерному распределению температуры по всей акватории озера. Ряды сравнивались между собой на основе нескольких статистических параметров: средней ошибки (m_x), средней абсолютной ошибки (MAE: Mean Absolute Error), средней квадратичной ошибки (MSE: Mean Squared Error) и стандартного отклонения (σ).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 приведены диаграммы рассеяния (с уравнениями регрессии) и функции плотности вероятности распределения ошибок для трех временных диапазонов, построенные по данным контактных и дистанционных измерений. Основные статистические показатели ошибок определения температуры приборами MODIS/Aqua и MODIS/Terra представлены в табл. 2.

Анализ рисунков демонстрирует выраженную линейную зависимость между контактными и спутниковыми данными, что проявляется в характерном вытягивании облака точек вдоль прямой линии для обоих спутников. Эта визуальная закономерность получает статистическое подтверждение через высокие значения коэффициента детерминации ($R^2 > 0,9$), которые сохраняются как для общего временного диапазона, так и для выделенных сезонных поддиапазонов. Высокая теснота корреляционной связи свидетельствует о принципиальной пригодности спутниковых данных для воспроизведения пространственно-временной изменчивости температуры поверхности воды в Ладожском озере на уровне, сопоставимом с результатами *in situ* измерений.

Более детальная оценка точности, основанная на статистических характеристиках ошибок из табл. 2, показывает удовлетворительное качество спутниковых данных. Однако выявляются и статистически значимые различия между радиометрами на разных спутниках. В целом за весь теплый период данные MODIS/Terra демонстрируют несколько более высокую точность, о чем свидетельствует меньшая средняя абсолютная ошибка (MAE = 0,73 °C) по сравнению с MODIS/Aqua (MAE = 0,85 °C).

Анализ сезонной динамики ошибок выявил различие в поведении радиометров на разных спутниках. Для MODIS/Aqua (рис. 2) характерна резкая сезонная изменчивость. В весенний период (май–июнь) его радиометр работает

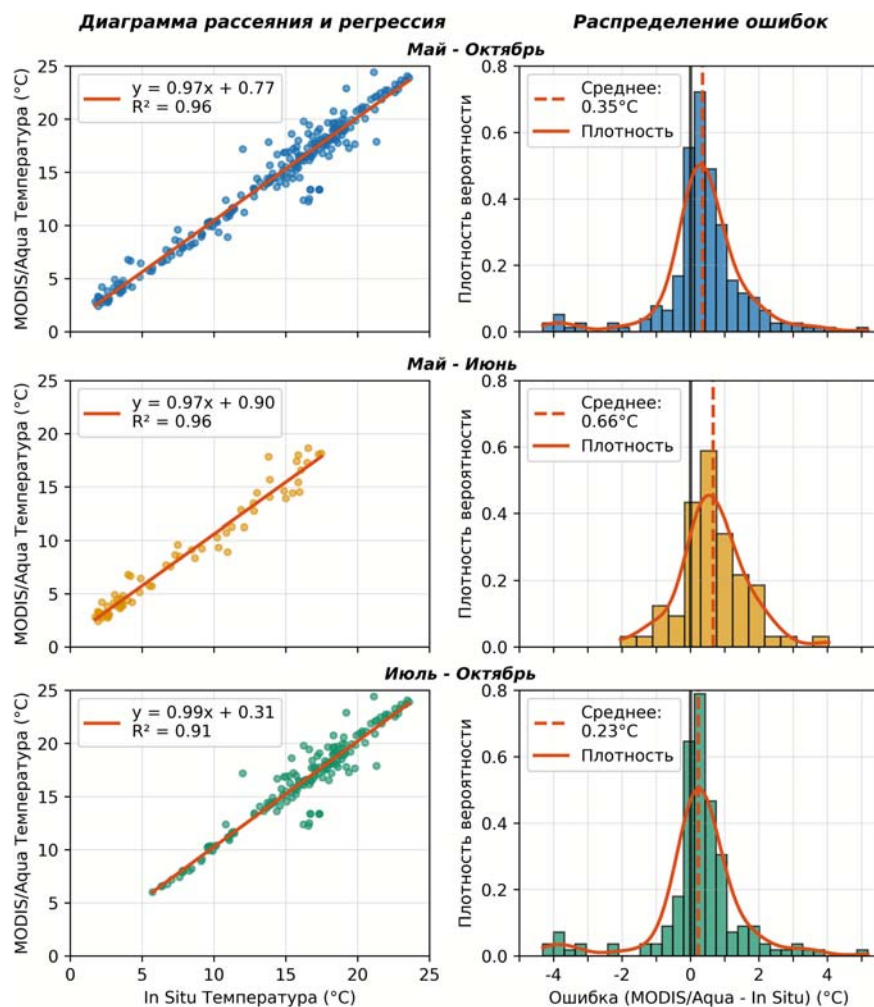


Рис. 2. Результаты расчета линейной регрессии *in situ* и спутниковых измерений температуры для MODIS/Aqua.

Здесь и на рис. 3: $y = ax + b$ – регрессионное уравнение, где a – коэффициент регрессии, b – коэффициент тренда; R^2 – коэффициент детерминации

Fig. 2. The results of calculating linear regression *in situ* and satellite temperature measurements for MODIS/Aqua.

Here and in Fig. 3: $y = ax + b$ is the regression equation, where a is the regression coefficient and b is the trend coefficient; R^2 is the coefficient of determination

со значительным положительным смещением ($m_x = 0,66 \text{ }^\circ\text{C}$), но при этом демонстрирует относительно низкий разброс ошибок ($\sigma = 0,98 \text{ }^\circ\text{C}$). Летом и осенью (июль–октябрь) картина кардинально меняется: систематическое смещение сокращается до минимального значения $0,23 \text{ }^\circ\text{C}$, но радикально, почти на 35 %, возрастает разброс ($\sigma = 1,32 \text{ }^\circ\text{C}$). Данная особенность позволяет предположить, что в теплый сезон на точность показаний прибора со спутника MODIS/Aqua сильнее влияют переменные факторы, такие как повышенная облачность, влажность атмосферы или динамическое состояние водной поверхности, которые вносят случайную, но значительную ошибку, нивелируя выигрыш от уменьшения систематического смещения.

В противоположность этому ошибки MODIS/Terra (рис. 3) показывают временную стабильность. Метрики точности данного радиометра

остаются практически неизменными в течение всего периода наблюдений. Значения m_x колеблются в узком диапазоне от $0,34$ до $0,48 \text{ }^\circ\text{C}$, а величины σ – от $0,77$ до $0,99 \text{ }^\circ\text{C}$. Именно поэтому данные MODIS/Terra обладают неоспоримым преимуществом для климатологов: отличаются высокой устойчивостью к сезонным колебаниям термических условий в акватории озера. Указанная стабильность, выражающаяся в постоянстве ошибок, повышает ценность этого спутникового продукта для построения многолетних климатических рядов.

Распределение плотности вероятности ошибок, представленное на рисунках, предоставляет дополнительное объяснение этим различиям. Положительное смещение для обоих спутников ($0,35 \text{ }^\circ\text{C}$ для MODIS/Aqua (рис. 2) и $0,44 \text{ }^\circ\text{C}$ для MODIS/Terra (рис. 3)) подтверждает выявленную тенденцию к завышению значений.

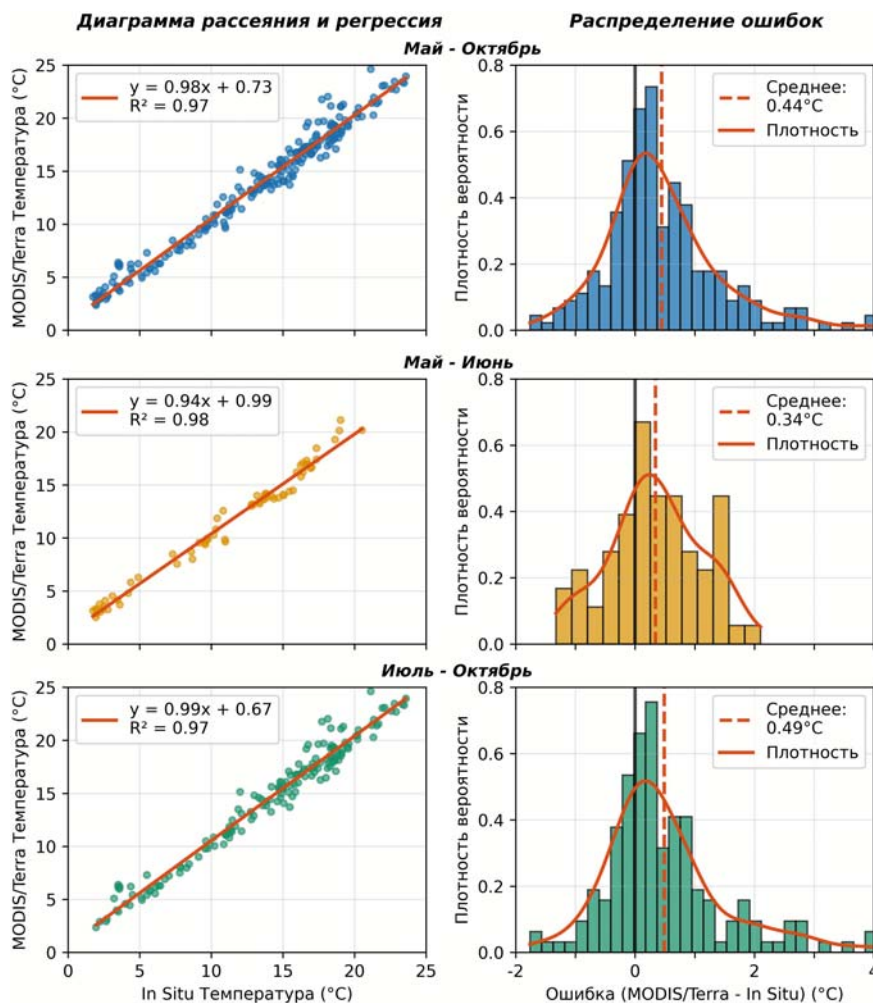


Рис. 3. Результаты расчета линейной регрессии *in situ* и спутниковых измерений температуры для MODIS/Terra

Fig. 3. The results of calculating linear regression *in situ* and satellite temperature measurements for MODIS/Terra

Таблица 2. Статистические характеристики ошибок температуры поверхности воды (попарная разница между рядами температуры MODIS и *in situ*)

Table 2. Statistical characteristics of surface temperature errors for depths up to 30 and over 30 m (pairwise difference between satellite and *in situ* temperature series)

Период/Period	m_x , °C	MAE, °C	MSE, °C ²	σ , °C	N, шт.
Aqua/MODIS (май–октябрь / May–October)	0,35	0,85	1,29	1,24	245
Aqua/MODIS (май–июнь / May–June)	0,66	0,92	1,18	0,98	69
Aqua/MODIS (июль–октябрь / July–October)	0,23	0,82	1,32	0,31	176
Terra/MODIS (май–октябрь / May–October)	0,44	0,73	1,04	0,94	232
Terra/MODIS (май–июнь / May–June)	0,34	0,69	0,84	0,77	68
Terra/MODIS (июль–октябрь / July–October)	0,48	0,76	1,11	0,99	164

Примечание. m_x – средняя ошибка; MAE – средняя абсолютная ошибка; MSE – средняя квадратичная ошибка; σ – стандартное отклонение; N – длина выборки.

Note. m_x – average error; MAE – Mean Absolute Error; MSE – Mean Squared Error; σ – standard deviation; N – sample length.

Однако форма кривых распределения несколько отличается: у MODIS/Aqua (рис. 2) наблюдается более широкий и пологий «хвост» распределения, особенно в летне-осенний период, что подтверждает больший разброс случайных ошибок. В отличие от MODIS/Aqua распределение ошибок MODIS/Terra (рис. 3) является более узким и компактным. Высокая плотность распределения вблизи среднего значения визуально подтверждает его повышенную стабильность, что соответствует меньшей случайной погрешности.

Заключение

В данном исследовании выполнена комплексная валидация спутниковых измерений температуры поверхности Ладожского озера, полученных радиометрами MODIS/Aqua и MODIS/Terra, на основе репрезентативной выборки из 245 *in situ* измерений. Полученные результаты убедительно демонстрируют наличие тесной функциональной зависимости ($R^2 > 0,9$) и исключительно высоких коэффициентов корреляции ($R = 0,97–0,99$) между спутниковыми и натурными данными, что подтверждает принципиальную пригодность продукции MODIS для мониторинга термического режима озера.

Наиболее важным результатом работы стало выявление систематического завышения спутниковых оценок температуры поверхности относительно натуральных наблюдений, составляющего 0,35 °C для MODIS/Aqua и 0,44 °C для MODIS/Terra. При этом проведенный детальный анализ выявил существенные различия в точности получаемых с радиометров данных. Данные MODIS/Terra демонстрируют

статистически значимое превосходство по средней абсолютной ошибке (MAE = 0,73 °C против 0,85 °C у MODIS/Aqua). MODIS/Terra также показал большую стабильность по сравнению с MODIS/Aqua. Изменения его систематического смещения и случайной ошибки между разными интервалами наблюдений (май–июнь и июль–октябрь) были существенно меньше. В противоположность этому ошибки MODIS/Aqua характеризовались значительной изменчивостью по рассматриваемым временным диапазонам. В частности, в период с июля по октябрь, когда систематическая ошибка уменьшалась до 0,23 °C, наблюдался одновременный рост случайной составляющей, стандартное отклонение которой достигало 1,32 °C.

Проведенное исследование демонстрирует важность оценки погрешностей спутниковых измерений температуры поверхности воды как для получения достоверных интегральных оценок пространственно-временной изменчивости термических полей, так и для использования этих данных при верификации математических моделей. Для дальнейшего повышения качества данных дистанционного зондирования необходима разработка региональных алгоритмов, учитывающих специфические оптические и термические особенности Ладожского озера.

Литература

Блохина Н. С., Показеев К. В. Уникальное природное явление – термобар // Земля и Вселенная. 2015. № 6. С. 78–88.

Гузиватый В. В., Науменко М. А., Румянцев В. А. Оценка поверхностных течений Ладожского озера

методом максимальной кросс-корреляции // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 20–30. doi: 10.31857/S0205961420010042

Коросов А. А., Поздняков Д. В., Филатов Н. Н., Мазуров А. А., Лупян Е. А., Грассл Х., Ионов В. В. Изучение сезонной и пространственной изменчивости некоторых экопараметров в Ладожском озере по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2006. № 5. С. 76–85.

Науменко М. А. Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период весеннего прогрева Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 2. С. 78–88. doi: 10.7868/S2073667321020076

Науменко М. А., Гузиватый В. В. Климатические соотношения между температурой воздуха и температурами воды различных лимнических районов Ладожского озера // География и природные ресурсы. 2022а. Т. 43, № 1. С. 83–92. doi: 10.15372/GIPR20220109

Науменко М. А., Гузиватый В. В. Методические подходы и результаты анализа климатического сезонного хода параметров устойчивой стратификации димиктического озера (на примере центральной части Ладожского озера) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022б. Т. 58, № 1. С. 52–62. doi: 10.31857/S0002351522010102

Науменко М. А., Гузиватый В. В. Связаны ли параметры устойчивой плотностной стратификации с температурой поверхности Ладожского озера? // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 328–344. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344

Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцева. М.: РАН, 2021. 640 с.

Тихомиров А. И. Дистанционное зондирование температуры поверхности водоемов // Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987. С. 168–173.

Тихомиров А. И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.

Тихомиров А. И., Каретников С. Г., Вишневский А. Е., Широков К. П. Сравнительная характеристика радиационной температуры и температуры поверхности воды Ладожского озера // Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987. С. 173–183.

Тронин А. А. Температура поверхности морей и озер Северо-Запада России по спутниковым данным // Региональная экология. 2016. № 4(46). С. 52–58.

Boehrer B., Fukuyama R., Chikita K., Kikukawa H. Deep water stratification in deep caldera lakes Ikeda, Towada, Tazawa, Kuttara, Toya and Shikotsu // Limnology. 2009. Vol. 10. P. 17–24. doi: 10.1007/s10201-008-0257-1

Carmack E., Vagle S. Thermobaric processes both drive and constrain seasonal ventilation in deep Great Slave Lake, Canada // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2021. Vol. 126. e2021JF006288. doi: 10.1029/2021JF006288

Carmack E., Vagle S., Kheyrollah Pour H. Seasonal temperature and circulation patterns in a hybrid

Polar Lake, Great Bear Lake, Canada // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2024. Vol. 129. e2024JF007650. doi: 10.1029/2024JF007650

Grim J. A., Knievel J. C., Crosman E. T. Techniques for using MODIS data to remotely sense lake water surface temperatures // J. Atmos. Ocean. Technol. 2013. Vol. 30. P. 2434–2451. doi: 10.1175/JTECH-D-13-00003

Malm J., Mironov D., Terzhevik A., Jonsson L. Investigation of the spring thermal regime in Lake Ladoga using field and satellite data // Limnol. Oceanogr. 1994. Vol. 39, no. 6. P. 1333–1348. doi: 10.4319/lo.1994.39.6.1333

Melnik N. G., Bondarenko N. A., Belykh O. I., Blinov V. V., Ivanov V. G., Korovyakova I. V., Kostornova T. Ya., Lazarev M. I., Logacheva N. F., Pomazkova G. I., Sherstyankin P. P., Sorokovikova L. M., Tolstikova L. I., Tereza E. P. Distribution of pelagic invertebrates near a thermal bar in Lake Baikal // Hydrobiologia. 2006. Vol. 568 (Suppl 1). P. 69–76. doi: 10.1007/s10750-006-0331-9

Moukomla S., Blanken P. D. Remote sensing of the North American Laurentian Great Lakes' surface temperature // Remote Sens. 2016. Vol. 8. Art. 286. doi: 10.3390/rs8040286

Oesch D. C., Jaquet J.-M., Hauser A., Wunderle S. Lake surface water temperature retrieval using advanced very high-resolution radiometer and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data: Validation and feasibility study // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. C12014. doi: 10.1029/2004JC002857

Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Blagodatskikh E. A., Konik A. A., Filatov N. N., Rodionov A. A. Submesoscale eddy structures of Lake Ladoga according to Sentinel-1 radar data for a warm period of 2019–2022 // Doklady Earth Sciences. 2023. Vol. 514, no. 2. P. 296–300. doi: 10.1134/s1028334x23602742

References

Blokhina N. S., Pokazeev K. V. A unique natural phenomenon is the thermal bar. *Zemlya i vseleennaya = Earth and Universe*. 2015;6:78–88. (In Russ.)

Boehrer B., Fukuyama R., Chikita K., Kikukawa H. Deep water stratification in deep caldera lakes Ikeda, Towada, Tazawa, Kuttara, Toya and Shikotsu. *Limnology*. 2009;10:17–24. doi: 10.1007/s10201-008-0257-1

Carmack E., Vagle S. Thermobaric processes both drive and constrain seasonal ventilation in deep Great Slave Lake, Canada. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2021;126:e2021JF006288. doi: 10.1029/2021JF006288

Carmack E., Vagle S., Kheyrollah Pour H. Seasonal temperature and circulation patterns in a hybrid Polar Lake, Great Bear Lake, Canada. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2024;129:e2024JF007650. doi: 10.1029/2024JF007650

Grim J. A., Knievel J. C., Crosman E. T. Techniques for using MODIS data to remotely sense lake water surface temperatures. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2013;30:2434–2451. doi: 10.1175/JTECH-D-13-00003

Guzivatyi V. V., Naumenko M. A., Rummyantsev V. A. Estimation of velocity of upper layer of Lake Ladoga by using of maximum cross correlation (mcc) method. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploration of Earth*

from Space. 2020;2:20–30. (In Russ.). doi: 10.31857/S0205961420010042

Kondrat'ev S. A., Pozdnyakov Sh. R., Rumyantsev V. A. (eds.). Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in the context of changing climate. Moscow: RAN; 2021. 640 p. (In Russ.)

Korosov A. A., Pozdnyakov D. V., Filatov N. N., Mazurov A. A., Lupyay E. A., Grassl Kh., Ionov V. V. A satellite data-based study of seasonal and spatial variations of some ecoparameters in Lake Ladoga. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploration of Earth from Space*. 2006;5:76–85. (In Russ.)

Malm J., Mironov D., Terzhevik A., Jonsson L. Investigation of the spring thermal regime in Lake Ladoga using field and satellite data. *Limnol. Oceanogr.* 1994;39(6):1333–1348. doi: 10.4319/lo.1994.39.6.1333

Melnik N. G., Bondarenko N. A., Belykh O. I., Blinov V. V., Ivanov V. G., Korovyakova I. V., Kostornova T. Ya., Lazarev M. I., Logacheva N. F., Pomazkova G. I., Sherstyankin P. P., Sorokovikova L. M., Tolstikova L. I., Tereza E. P. Distribution of pelagic invertebrates near a thermal bar in Lake Baikal. *Hydrobiologia*. 2006;568(S1):69–76. doi: 10.1007/s10750-006-0331-9

Moukomla S., Blanken P. D. Remote sensing of the North American Laurentian Great Lakes' surface temperature. *Remote Sens.* 2016;8:286. doi: 10.3390/rs8040286

Naumenko M. A. Features of climatic relationships between surface water-air temperature during vernal heating period in Lake Ladoga. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021;14(2):78–88. (In Russ.). doi: 10.7868/S2073667321020076

Naumenko M. A., Guzivatyi V. V. Climate relationships between air temperature and water temperatures in the different limnetic zones of Lake Ladoga. *Geography and Natural Resources*. 2022;43(1):69–76. doi: 10.1134/S1875372822010097

Naumenko M. A., Guzivatyi V. V. Methodological approaches and results of an analysis of the climatic seasonal course of stable stratification parameters of a dimictic lake (case study of the central part of Lake Ladoga). *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana = Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022;58(1):44–53. doi: 10.1134/S0001433822010108

Naumenko M. A., Guzivatyi V. V. Are the parameters of stable density stratification related to the surface temperature of Lake Ladoga? *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2024;75:328–344. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344

Oesch D. C., Jaquet J.-M., Hauser A., Wunderle S. Lake surface water temperature retrieval using advanced very high-resolution radiometer and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data: Validation and feasibility study. *J. Geophys. Res.* 2005;110: C12014. doi: 10.1029/2004JC002857

Tikhomirov A. I. Remote sensing of the surface temperature of reservoirs. *Kompleksnyi distantsionnyi monitoring ozer = Comprehensive remote monitoring of lakes*. Leningrad: Nauka; 1987. P. 168–173. (In Russ.)

Tikhomirov A. I. Thermology of large lakes. Leningrad: Nauka; 1982. 232 p. (In Russ.)

Tikhomirov A. I., Karetnikov S. G., Vishnevsky A. E., Shirokov K. P. Comparative characteristics of radiation temperature and surface temperature of Lake Ladoga water. *Kompleksnyi distantsionnyi monitoring ozer = Comprehensive remote monitoring of lakes*. Leningrad: Nauka; 1987. P. 173–183. (In Russ.)

Tronin A. A. The satellite-measured sea surface temperature change in the North-West Russia ponds. *Regional'naya ekologiya = Regional Ecology*. 2016;4(46):52–58. (In Russ.)

Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Blagodatskikh E. A., Konik A. A., Filatov N. N., Rodionov A. A. Submesoscale eddy structures of Lake Ladoga according to Sentinel-1 radar data for a warm period of 2019–2022. *Doklady Earth Sciences*. 2023;514(2):296–300. doi: 10.1134/S1028334x23602742

Поступила в редакцию / received: 18.09.2025; принята к публикации / accepted: 07.11.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Коник Александр Александрович

канд. геогр. наук, научный сотрудник

e-mail: konikrshu@gmail.com

Исаев Алексей Владимирович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: isaev1975@gmail.com

Зимин Алексей Вадимович

д-р геогр. наук, главный научный сотрудник,
руководитель лаборатории геофизических
пограничных слоев

e-mail: zimin2@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Konik, Aleksander

Cand. Sci. (Geogr.), Researcher

Isaev, Aleksey

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Zimin, Aleksey

Dr. Sci. (Geogr.), Chief Researcher, Head of Laboratory