Тренды температуры поверхности озера Байкал: многолетний анализ на основе валидированных спутниковых продуктов

Е. А. Мамаш [1], И. А. Пестунов [1,4], В. В. Блинов [2], А. Н. Мазяр [3], И. А. Асламов [2]

[1] *Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, 630090, Россия*
E-mails: elenamamash@gmail.com, pestunov@ict.nsc.ru

[2] *Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*
E-mail: ilya_aslamov@bk.ru

[3] *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Россия*
E-mail: a.mazyar@g.nsu.ru

[4] *Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*

Данное исследование посвящено анализу многолетних трендов температуры поверхностного слоя (ТПС) озера Байкал с использованием валидированных спутниковых данных. Работа решает две основные задачи: 1) оценка точности современных продуктов ТПС, полученных по данным Terra/Aqua MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и Landsat-8, -9 на основе уникального массива судовых измерений Лимнологического института СО РАН (2021–2024); 2) выявление пространственно-временных тенденций изменения ТПС озера. Валидация подтвердила применимость всех рассмотренных продуктов для оценки ТПС Байкала, но выявила их особенности. Продукты Terra/Aqua MODIS характеризуются сдвигом относительно наземных данных от 0,13 до 0,8 °C в абсолютном выражении и среднеквадратической ошибкой (*англ.* Root Mean Square Error — RMSE) от 1,47 до 1,77 °C. Исследования выполнены отдельно для дневных и ночных данных. Наивысшую точность показали данные Landsat: коэффициент детерминации R^2 равен 0,98, RMSE достигает 0,62 °C, средний сдвиг составляет –0,14°C, что, по-видимому, обусловлено их высоким пространственным разрешением. Это определяет преимущество Landsat для детального анализа, тогда как высокая частота съёмки MODIS сохраняет их ценность для оперативного мониторинга. Анализ многолетних трендов на основе валидированных данных выявил статистически значимое потепление Байкала. Наиболее выражено оно в центральной и северной части озера в период открытой воды (июнь – ноябрь). Тренд варьируется в зависимости от продукта и периода (0,066–0,095 °C/год), но устойчиво указывает на продолжающееся повышение температуры поверхности озера.

Ключевые слова: валидация, спутниковые данные, температура поверхностного слоя озера Байкал, температурные тренды, Terra/Aqua MODIS, Landsat

Одобрена к печати: 11.08.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-306-321

Введение

Температура поверхностного слоя (ТПС) выступает ключевым параметром состояния озёрной экосистемы (Россолимо, 1957), определяющим биологические и химические процессы, энергетические потоки и взаимодействие с атмосферой. Озеро Байкал, уникальное по размерам, возрасту и биоразнообразию, обладает огромной теплоёмкостью и служит важным индикатором климатических изменений, что подтверждается исследованиями его температуры воды и ледового режима (Троицкая и др., 2003; Moore et al., 2009; Shimaraev et al., 2002). Следовательно, непрерывный мониторинг ТПС Байкала критически важен для понимания его лимнологических процессов, гидродинамики и биологии.

Спутниковое дистанционное зондирование представляет собой незаменимый инструмент для мониторинга таких обширных водоёмов, как Байкал (площадь 31,7 тыс. км^2)

(Carrea et al., 2023; Dörnhöfer, Oppelt, 2016; Piccolroaz et al., 2024), обеспечивая оперативное получение пространственно-временных данных по всей акватории. Этот подход превосходит традиционные судовые и станционные наблюдения, которые часто характеризуются неоднородностью, неравномерным распределением и различиями в калибровке, затрудняя построение длительных однородных рядов. Напротив, многолетние спутниковые данные обеспечивают непрерывность и объективность анализа ТПС (Du et al., 2020; Jia et al., 2022; Mogilev, Gnatovskiy, 2003; O'Reilly et al., 2015; Sobrino et al., 2024).

Для оценки ТПС озёр, включая Байкал, широко применяются данные множества спутниковых систем, таких как Terra/Aqua MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), NOAA/MetOp AVHRR (*англ*. Advanced Very-High-Resolution Radiometer), Suomi NPP VIIRS (*англ*. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), Sentinel-3A/B SLSTR (*англ*. Sea and Land Surface Temperature Radiometer), Landsat-5, -7, -8, -9 TIRS (*англ*. Thermal Infrared Sensor), ERS-1 ATSR1 (*англ*. Along Track Scanning Radiometer), ERS-2 ATSR2, Envisat AATSR (*англ*. Advanced Along-Track Scanning Radiometer) (Евдокимов, Штефуряк, 2024; Attiah et al., 2023; Carrea et al., 2022; Dörnhöfer, Oppelt, 2016; Jia et al., 2022; Pareeth et al., 2016; Phan, Kappas, 2018; Piccolroaz et al., 2024).

Однако ключевой проблемой дистанционного зондирования воды остаётся вопрос достоверности получаемых параметров (Jia et al., 2022), обусловленный оптической сложностью и изменчивостью водных масс, а также разнообразием используемых методов и алгоритмов. Валидация спутниковых температурных продуктов для внутренних водоёмов обычно проводится сравнением с наземными (*in situ*) измерениями: данными стационарных датчиков на буях или станциях (Евдокимов, Штефуряк, 2024; Aranda et al., 2021; Herrick et al., 2023; Hook et al., 2004, Moukomla, Blanken, 2016) или судовыми наблюдениями (Сутырина, 2014). Выбор спутниковых данных часто определяется их пространственным разрешением и размерами водоёма.

В большинстве случаев наблюдается хорошее согласие между спутниковыми данными ТПС и измерениями *in situ* со значением коэффициента детерминации $R^2 > 0{,}8$ (Aranda et al., 2021; Dyba et al., 2022; Ptak et al., 2017), а во многих работах R^2 превышает 0,9 (Attiah et al., 2023; Herrick et al., 2023; Korver et al., 2024; Liu et al., 2015; Moukomla, Blanken, 2016; Sharaf et al., 2019; Xie et al., 2022). Для озера Байкал исторические оценки точности различаются: одна из первых попыток для данных AVHRR NOAA (Bolgrien et al., 1995) показала расхождения до 4 °C, связанные, в частности, с апвеллингом. Исследование сезонной изменчивости также на данных AVHRR NOAA в 1996–1999 гг. (Mogilev, Gnatovskiy, 2003) указывало на точность 0,5–0,8 °C. Валидация данных AVHRR NOAA за 1998–2004 гг. по судовым измерениям (Сутырина, 2014) показала хорошую согласованность со среднеквадратическим отклонением 0,3–0,4 °C.

В настоящее время генерируется ряд спутниковых продуктов в рамках глобальных проектов по оценке климатических параметров, включая ТПС озёр. Например, проект ESA CCI Lakes (https://climate.esa.int/en/projects/lakes/data) предоставляет продукты LSWT (*англ*. Lake Surface Water Temperature) с разрешением ~1 км на основе данных Envisat AATSR, MODIS Terra/Aqua, SLSTR Sentinel-3A/B, ATSR2 ERS-2, NOAA/MetOp AVHRR за период 1992–2022 гг. (Carrea et al., 2023; Maligaya et al., 2024; Piccolroaz et al., 2024). Валидация проведена по 207 точкам в 79 озёрах (Simis et al., 2021); данные имеют индикатор качества (1–5) и доступны на портале https://lakescci.eofrom.space/. Алгоритмы основаны на разработках проектов ARC-Lake (https://www.laketemp.net/), предоставляющих данные по 1628 крупным водоёмам (>500 км^2) на основе ERS-2 ATSR2 и Envisat AATSR (1995–2012) (Fiedler et al., 2014; Guo et al., 2022; Merchant, MacCallum, 2018).

Ещё один глобальный температурный продукт, готовый к использованию, генерируется национальной метеорологической службой Великобритании (*англ*. UK's national meteorological service, https://www.metoffice.gov.uk/) (с 1982 г., разрешение 0,05°). Он носит название OSTIA (*англ*. Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis) GHRSST product (*англ*. Global Historical Reprocessed Foundation Sea Surface Temperature product) (Fiedler et al., 2014). Продукт генерируется на основе данных 25 сенсоров, включая данные NOAA/MetOp AVHRR,

Sentinel-3A/B SLSTR, Envisat AATSR и др. В работе (Fiedler et al., 2014) приводятся оценки продукта OSTIA для восьми крупных озёр, в том числе и для озера Байкал, в сравнении с наземными данными, данными отдельных спутников и продуктами ARC-Lake. Показано, что при валидации данных OSTIA на основе данных *in situ* среднее значение среднеквадратической ошибки (*англ.* Root Mean Square Error — RMSE) достигает примерно 1 °C, а при сравнении продуктов OSTIA с данными ARC-Lake величина RMSE в среднем равна 1,31 °C, причём самая большая RMSE соответствует как раз Байкалу и составляет 2,76 °C.

Таким образом, точность спутниковой оценки ТПС может зависеть от множества факторов: пространственного разрешения, времени суток, параметров сенсора, алгоритмов обработки и специфики водоёма. Указанное большое значение RMSE для Байкала в продукте OSTIA (2,76 °C) на фоне обычно хорошего согласия ($R^2 > 0{,}8$) подчёркивает необходимость надёжной локальной валидации современных спутниковых продуктов именно для этого уникального водоёма с использованием пространственных *in situ* данных высокой точности.

Цели настоящей работы: 1) валидация температурных спутниковых продуктов, основанных на данных Terra/Aqua MODIS и Landsat-8, -9, для акватории озера Байкал по массиву судовых измерений за 2021–2024 гг., полученных Лимнологическим институтом СО РАН; 2) построение и анализ долговременных трендов ТПС озера Байкал на основе отвалидированных спутниковых данных для выявления ключевых тенденций произошедших изменений.

Спутниковые и наземные данные для валидации ТПС

В работе проводится валидация спутниковых продуктов Terra/Aqua MODIS MO(Y)D11A1 (https://lpdaac.usgs.gov/documents/119/MOD11_ATBD.pdf) и MO(Y)D21A1 (https://lpdaac.usgs.gov/documents/1399/MOD21_ATBD.pdf), имеющих пространственное разрешение 1 км в надире, и продуктов, полученных на основе данных Landsat-8, -9 TIRS (продукт L2SP) (Cook et al., 2014), содержащих оценки значений ТПС с пространственным разрешением 100 м. Для краткости изложения продукты MO(Y)D11A1 и MO(Y)D21A1 далее обозначаются как MO(Y)D11 и MO(Y)D21 соответственно.

Все продукты генерируются Геологической службой США (*англ.* United States Geological Survey — USGS). Доступ к данным и описаниям продуктов MODIS предоставляется через LP DAAC (https://lpdaac.usgs.gov/data/), а к данным Landsat — через EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/). Оперативная генерация продуктов Landsat L2SP USGS началась в 2022 г. Продукт L2SP основан на решении уравнения радиационного переноса с помощью программы MODTRAN (*англ.* MODerate resolution atmospheric TRANsmission) (Berk et al., 2014). Для атмосферной коррекции используются данные североамериканского реанализа NARR (*англ.* North American Regional Reanalysis) (McCarville et al., 2011). Расчёт коэффициента эмиссии выполняется на основе данных ASTER GED (*англ.* ASTER Global Emissivity Dataset) (Hulley et al., 2015). Продукты MO(Y)D11 и MO(Y)D21 генерируются дважды в сутки (дневные/ночные сцены), в то время как частота повторной съёмки Landsat составляет 16 дней, среднее время пролёта — 11:45 местного времени. Доступ и обработка всех перечисленных спутниковых данных возможны на облачном сервисе GEE (*англ.* Google Earth Engine). Последние версии (V6) продуктов MO(Y)D11 и MO(Y)D21, доступные на USGS и GEE, различаются алгоритмами восстановления LST (*англ.* Land Surface Temperature) и используемыми моделями радиационного переноса для атмосферной коррекции. MO(Y)D11 применяет двухканальный алгоритм скользящего окна (Wan, Dozier, 1996). Атмосферная коррекция выполняется программой MODTRAN, а значения коэффициента эмиссии вычисляются на основе данных каналов 31 и 32 MODIS. Продукт MO(Y)D21 реализует трёхканальный алгоритм ASTER TES (*англ.* ASTER Temperature Emissivity Separation) (Hulley et al., 2014), где для оценки коэффициента эмиссии, помимо каналов 31 и 32 MODIS, используются данные 29-го канала MODIS и данные ASTER GED. В качестве модели радиационного переноса применяется модель RTTOV (*англ.* Radiative Transfer for the TIROS Operational Vertical Sounder) (Saunders et al., 2018).

Хотя, как утверждается в работе (Phan, Kappas, 2018), продукт MO(Y)D21 в большей степени подходит для засушливых и полузасушливых территорий, его валидация для водных объектов, представленная в документации ATDB (*англ.* Algorithm Theoretical Basis Document) (https://lpdaac.usgs.gov/documents/1399/MOD21_ATBD.pdf), показала в некоторых случаях лучшие результаты по сравнению с MO(Y)D11, что обуславливает его включение в данное исследование.

Все использованные в исследовании продукты прошли фильтрацию облачности. Согласно документации ATDB, основными инструментами для фильтрации облаков в продуктах MO(Y)D11 и MO(Y)D21 являются маски облачности из продукта MOD35_L2 (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD35_L2). Также использовались битовые маски на основе слоя контроля качества (QA-слоя, *англ.* Quality Assurance). Фильтрация облачности в продукте MO(Y)D21 выполнялась с использованием более совершенных алгоритмов на основе ASTER TES, о которых говорилось выше; эти алгоритмы обеспечивают более высокую точность по сравнению с MO(Y)D11. Фильтрация облачности для данных Landsat осуществлялась в GEE наложением битовых масок на основе данных QA-слоя.

Наземные данные (*in situ*) для валидации получены в ходе экспедиций Лимнологического института СО РАН на озере Байкал с 2021 по 2024 г. Обработаны данные 16 экспедиций, охватывающих разные сезоны (май – июнь, июль – август, сентябрь – октябрь). Температура поверхности воды измерялась с помощью CTD-зонда (*англ.* Conductivity, Temperature and Depth) SBE-37 MicroCAT (Sea-Bird Scientific) с интерфейсом RS-232, имеющего диапазон измерения температуры от −5 до 45 °C, разрешение 0,0001 °C и точность ±0,002 °C. Измерения проводились с борта научно-исследовательских судов «Г. Ю. Верещагин» и «Титов» (ЦКП «Центр комплексных судовых исследований Байкала») с интервалом 5 с; данные регистрировались на персональном компьютере.

При постобработке наземных данных были исключены измерения, выполненные на стоянках или в дрейфе, для устранения влияния судна на температуру прилегающей воды из-за застоя воды вокруг датчика. Измерения, выполненные при движении судна, усреднялись с 1-мин интервалом. Это обеспечило пространственное разрешение наземных данных около 160 м на среднем ходу (6 узлов) и 230 м на полном ходу судна (8,5 узла). Такое пространственное и временное разрешение данных *in situ* позволяет проводить валидацию спутниковых продуктов синхронно, посредством точного сопоставления времени пролёта спутника и времени проведения судовых измерений.

Результаты валидации

В *табл. 1* представлены основные статистические характеристики сравнения экспедиционных измерений ТПС озера Байкал и спутниковых продуктов: средний сдвиг MBE (*англ.* Mean Bias Error), стандартное отклонение σ, среднеквадратическая ошибка RMSE, коэффициент детерминации R^2 и наклон линейной регрессии Slope. Результаты валидации продуктов MO(Y)D11 и MO(Y)D21 приведены отдельно для дневного и ночного времени.

Таблица 1. Статистические характеристики валидации (MBE, σ, RMSE, Slope, R^2) (в °C) спутниковых данных по данным *in situ* (*N* — количество синхронных измерений)

	MBE	σ	RMSE	Slope	R^2	*N*
MO(Y)D11 (день)	−0,52	1,08	1,52	0,93	0,91	183
MO(Y)D11 (ночь)	−0,81	0,96	1,47	0,96	0,91	183
MO(Y)D21 (день)	0,64	1,07	1,62	1,02	0,91	183
MO(Y)D21 (ночь)	−0,13	1,27	1,77	1,03	0,89	107
L2SP (Landsat-8, -9)	−0,14	0,38	0,62	1,01	0,98	19

Валидация температурного продукта L2SP выполнена на объединённой выборке Landsat-8, -9 из-за ограниченного объёма данных. Все статистические показатели рассчитаны после исключения выбросов с использованием фильтра Хампеля (Davies, Gather, 1993). Соответствующие диаграммы рассеяния представлены на *рис. 1.*

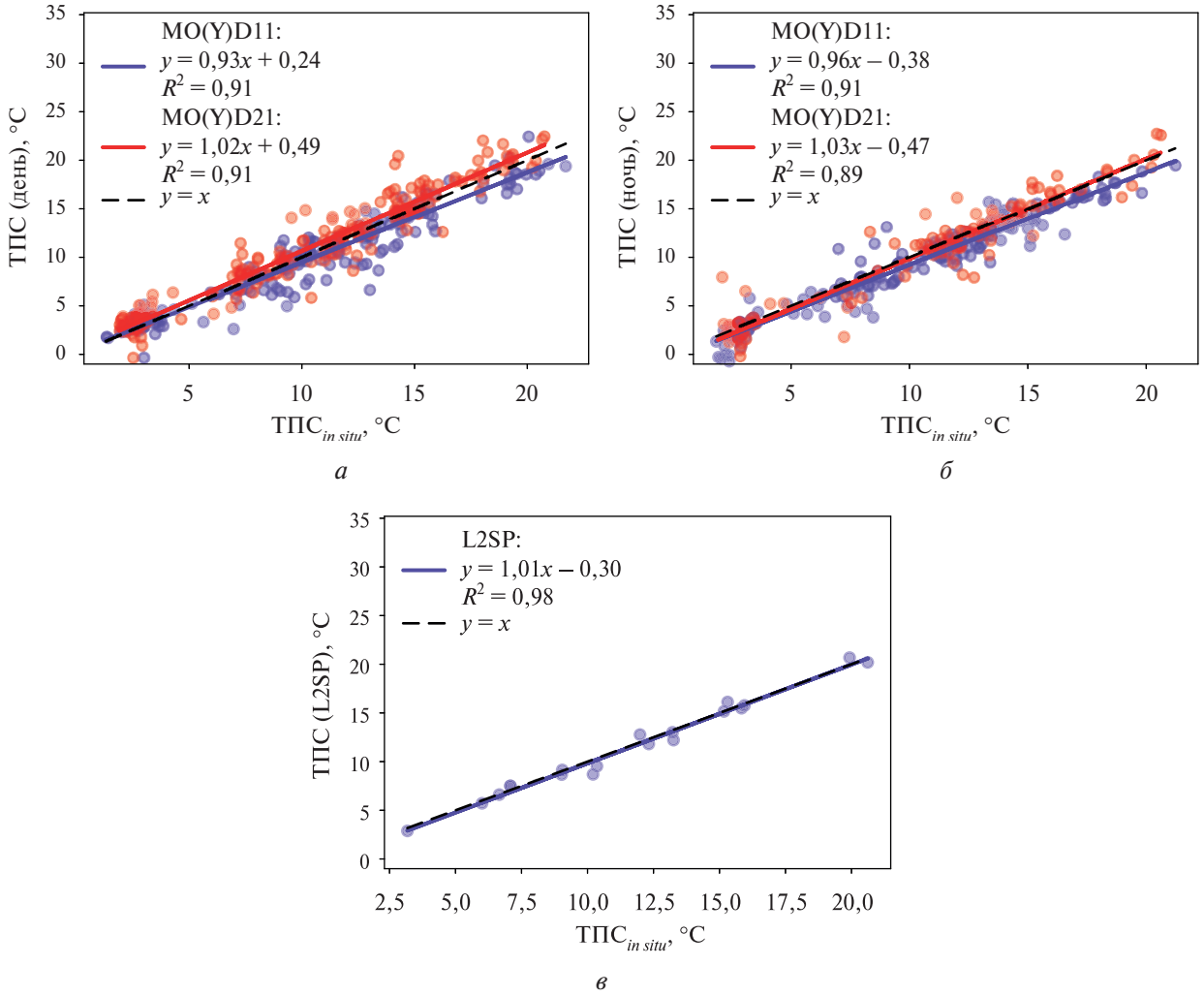

Рис. 1. Диаграммы рассеяния, уравнения регрессии и коэффициент детерминации R^2 для измерений *in situ* и спутниковых значений ТПС: *а* — MO(Y)D11 и MO(Y)D21 (день); *б* — MO(Y)D11 и MO(Y)D21 (ночь); *в* — L2SP

Анализ данных (*табл. 1*, см. *рис. 1*) показывает, что для продуктов MO(Y)D11 характерен отрицательный средний сдвиг относительно наземных измерений: примерно –0,8 °C для ночных данных и –0,5 °C для дневных. В то же время продукт MO(Y)D21 демонстрирует положительный сдвиг около +0,6 °C днём, тогда как ночью его сдвиг незначителен и составляет менее 0,15 °C по модулю. Интересно, что величина расхождения данных MO(Y)D11 с измерениями *in situ* заметно увеличивается по модулю при росте температуры, тогда как для MO(Y)D21 подобной тенденции не наблюдается.

Рисунки 1а, б дополнительно иллюстрируют, что значения MO(Y)D21, как правило, выше значений MO(Y)D11 при одинаковых величинах *in situ*. Это хорошо согласуется с данными *табл. 2* (см. далее), а средний сдвиг между самими продуктами MO(Y)D21 и MO(Y)D11 составляет +1,12 °C для дня и +1,35 °C для ночи. Вероятно, это различие обусловлено применением различных алгоритмов атмосферной коррекции при генерации продуктов.

Хотя коэффициент детерминации (R^2) для всех продуктов MODIS близок к 0,9, что указывает на хорошую общую согласованность с измерениями, продукты MO(Y)D11 и MO(Y)D21 имеют не только преимущества, но и недостатки. Несмотря на наличие систематического сдвига, значения стандартного отклонения σ и RMSE для MO(Y)D11 примерно на 0,2 °C меньше, чем аналогичные показатели для MO(Y)D21. Таким образом, MO(Y)D21 отличается минимальным средним сдвигом, а MO(Y)D11 — наименьшим значением RMSE. Оба продукта пригодны для анализа температуры поверхности озера Байкал, если учитывать полученные оценки точности.

При этом данные Landsat показали наилучшие результаты валидации (см. *табл. 1*, *рис. 1в*). Для них коэффициент детерминации достиг 0,98, среднеквадратическая ошибка составила всего 0,62 °C, а средний сдвиг был незначительным (всего 0,14 °C по модулю). Прежде всего, это может быть связано с их существенно более высоким пространственным разрешением по сравнению с данными MODIS. Хотя наилучшие статистические показатели делают данные Landsat более предпочтительными для пространственно-временного анализа ТПС Байкала, это не снижает важности продуктов MODIS, ключевое преимущество которых — значительно более высокая частота съёмки.

Пространственно-временные тренды ТПС озера Байкал

Глобальное изменение климата, воздействуя на термический режим водоёмов, влечёт за собой ряд серьёзных экологических, гидрологических и биологических последствий, что подчёркивает необходимость постоянного мониторинга их ключевых параметров. Исследования многолетних трендов (свыше 60 лет) среднегодовой температуры поверхности воды Байкала и прибрежного воздуха, основанные на данных метеостанции и станции отбора проб в 2,7 км от берега (Ananina, Ananin, 2020; Hampton et al., 2008), выявили устойчивый положительный тренд 0,02 °C/год за 1945–2005 гг. и более выраженный летний тренд в 0,04 °C/год. Особенно заметное потепление в Северном Прибайкалье наблюдается с 1990 г. и продолжается до сих пор. Однако эти выводы носят локальный характер, будучи ограниченными измерениями в одной точке. Более масштабные исследования температуры поверхности Байкала, основанные на данных прибрежных метеостанций, расположенных в разных котловинах озера, также выявили значительные тренды с 1970 по 1993 г. (Троицкая и др., 2003). Несмотря на то, что авторы предполагают, что данные, полученные на станциях с крутым склоном, являются репрезентативными для условий открытого Байкала, тем не менее очевидно, что в штилевую погоду прогрев прибрежных вод будет более интенсивным, и для июля–августа полученные значения трендов могут быть завышены.

Для получения более полной картины пространственного распределения ТПС используются спутниковые данные. Анализ многолетней динамики ТПС озера Байкал с применением спутниковых данных представлен в ряде исследований (Сутырина, 2014; Du et al., 2020; Mogilev, Gnatovskiy, 2003; Sobrino et al., 2024). В частности, в работе (Sobrino et al., 2024) проведено глобальное исследование трендов ТПС для крупных озёр, включая Байкал, за период 2003–2020 гг. на основе восьмидневных продуктов MODIS SST (*англ.* Sea Surface Temperature) с пространственным разрешением 1 км. Для анализа временных трендов ТПС Байкала в этом исследовании использовались средние значения температуры, рассчитанные пространственным интегрированием данных по всей акватории озера. При этом учитывались четыре независимых средних значения, полученных по данным сенсоров MODIS Terra (день/ночь) и MODIS Aqua (день/ночь):

$$\mathrm{SST}_{\mathrm{MODIS}} = \frac{\mathrm{SST}^{mean}_{day_\mathrm{Terra}} + \mathrm{SST}^{mean}_{day_\mathrm{Aqua}} + \mathrm{SST}^{mean}_{night_\mathrm{Terra}} + \mathrm{SST}^{mean}_{night_\mathrm{Aqua}}}{4}. \quad (1)$$

Здесь $\mathrm{SST}_{\mathrm{MODIS}}$ — среднее значение ТПС за исследуемый период, полученное на основе данных MODIS SST (*англ.* Sea Surface Temperature); $\mathrm{SST}^{mean}_{day_\mathrm{Terra}}$, $\mathrm{SST}^{mean}_{day_\mathrm{Aqua}}$, $\mathrm{SST}^{mean}_{night_\mathrm{Terra}}$, $\mathrm{SST}^{mean}_{night_\mathrm{Aqua}}$ — средние дневные и ночные значения ТПС для данных MODIS Terra и MODIS

Aqua, полученные на основе среднего времени пролёта спутников соответственно в 10:30, 13:30, 22:30 и 00:30 местного времени.

Результаты анализа (Sobrino et al., 2024) показали наличие значимого положительного тренда ТПС озера Байкал (+0,083 °C/год) при уровне значимости 99,79 %. При этом использовались данные MODIS SST за весь год, включая зимние месяцы с ледовым покровом. Авторы отмечают, что отрицательные значения ТПС, регистрируемые в этот период, вероятно, связаны с погрешностями алгоритмов распознавания льда по спутниковым данным. Количественные оценки временных трендов ТПС здесь выполнены с применением метода линейной регрессии и непараметрического, устойчивого к выбросам метода, использующего оценку Тейла – Сена. Статистическая значимость выявленных трендов оценена с помощью теста Манна – Кендалла, широко используемого в климатологии и гидрологии.

В данной работе мы углубляем этот анализ, используя различные спутниковые продукты с целью выявления тренда ТПС Байкала, оценки его величины и значимости, а также пригодности самих продуктов для таких задач. Учитывая проблемы качества данных в период ледостава, выявленные в работах (Du et al., 2020; Sobrino et al., 2024), рассматривается исключительно период открытой воды (июнь – ноябрь). Выбор продуктов обусловлен их пространственно-временным разрешением и доступностью через платформы GEE и ESA CCI.

Для анализа временных трендов использовались 8-дневные композитные продукты MO(Y)D11A2 и MO(Y)D21C2, где каждое значение пикселя представляет собой среднее за 8-дневный период из соответствующих дневных и ночных сцен продуктов MO(Y)D11A1 и MO(Y)D21A1. Результаты анализа временной динамики ТПС Байкала были также сопоставлены с глобальным продуктом MODIS SST, разработанным для оценки ТПС морей, океанов, озёр и других водоёмов в Центре космических полётов имени Годдарда (*англ.* NASA Goddard Space Flyght Center) (https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/resources/atbd/sst/) (доступен в GEE с 2001 по 2021 г., разрешение ~4,6 км, ежедневный). Ключевое его отличие от продуктов MO(Y)D11 и MO(Y)D21 заключается в алгоритме подсчёта ТПС: коэффициенты для расчёта температуры вычисляются на основе эмпирически полученных данных с дрейфующих буёв, а атмосферная коррекция выполняется с помощью модели RTTOV.

Кроме этого, нами проведено сравнение полученных результатов с продуктами LSWT проекта ESA CCI Lakes (доступны через портал https://lakescci.eofrom.space/), для анализа которых были выбраны данные с высоким уровнем качества (медианная оценка 4 и 5 по рекомендациям разработчиков продукта (Carrea et al., 2023)) и с данными Landsat-5, -7, -8, -9 (L2SP).

Для продуктов MO(Y)D11A2 и MO(Y)D21C2, имеющих до четырёх измерений в день, средние значения ТПС вычислялись по формуле (1). Средние значения MODIS SST получали усреднением доступных в GEE среднесуточных значений по Terra/MODIS и Aqua/MODIS за день, а затем за весь период. Данные Landsat-5, -7, -8, -9 и LSWT ESA CCI усреднялись за каждый год в течение всего исследуемого периода; если съёмка велась несколькими спутниками Landsat одновременно, их данные также усреднялись. Рассчитанные таким образом временные тренды ТПС для всех проанализированных продуктов представлены на *рис. 2* (см. с. 313), а соответствующие статистические оценки (среднее значение (Mean, °C), линейный тренд (Slope, °C), наклон Сена (Sen's slope, °C), значимость по Манну – Кендаллу (MK, %)) — в *табл. 2*. Начало и конец анализируемых периодов определялись сроком работы спутников на орбите и наличием данных в системах GEE и ESA CCI.

Проведённый анализ выявил значимый положительный тренд ТПС Байкала: 0,066 °C/год для дневных данных Landsat с 1990 г. и 0,087–0,095 °C/год для среднесуточных продуктов MODIS с 2003 г. (см. *рис. 2*, *табл. 2*). Эти значения немного превышают температурный тренд, полученный в работе (Sobrino et al., 2024) (0,083 °C/год), однако там использовался 8-дневный продукт MODIS SST с пространственным разрешением в 1 км и данные анализировались за весь календарный год в более коротком временном периоде (2003–2020). Наши результаты подтверждают сохранение тенденции к потеплению в последние годы. В отличие от MODIS и Landsat, данные LSWT (ESA CCI) не показали значимого тренда, что ставит под сомнение их пригодность для анализа многолетних температурных изменений озера Байкал.

Это может быть связано с тем, что продукт LSWT представляет собой композит, полученный на основе данных различных спутниковых систем и радиометров.

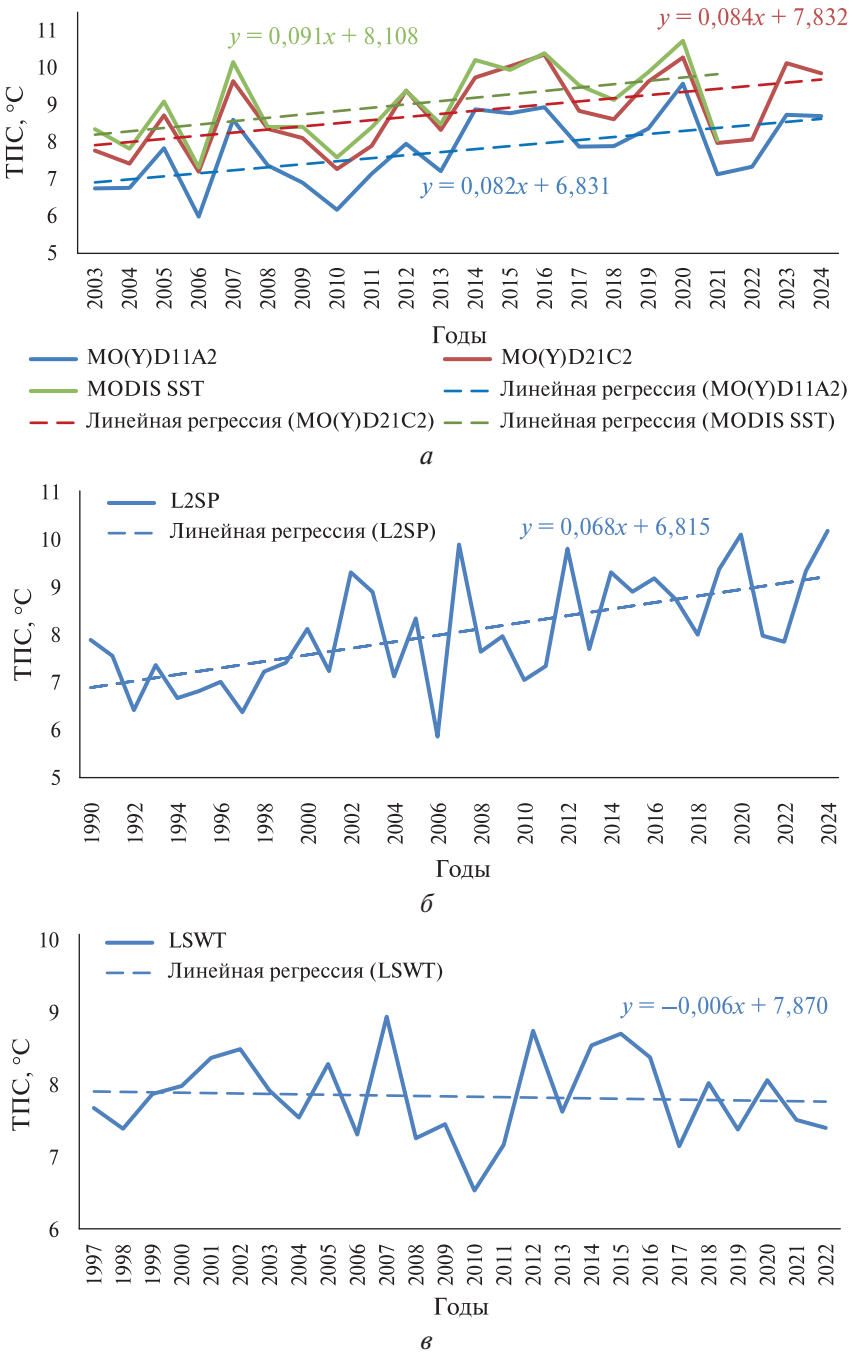

Рис. 2. Средняя ТПС Байкала и уравнения линейных трендов для различных типов спутниковых данных: *а* — MO(Y)D11A2 (2003–2024), MO(Y)D21C2 (2003–2024) и MODIS SST (2003–2021); *б* — L2SP (1990–2024); *в* — LSWT (1997–2022)

Из *рис. 2* видно, что значения ТПС, вычисленные по данным MO(Y)D21C2, превышают соответствующие значения MO(Y)D11A2 (см. *рис. 2а*); график кривой смещён вверх, а средний сдвиг составляет 1,03 °С. Это согласуется с приведёнными выше результатами валидации. Значения ТПС, полученные по данным MODIS SST, ближе к данным MO(Y)D21C2 (средний сдвиг между ними равен 0,3 °С), чем к данным MO(Y)D11A2 (средний сдвиг составляет 1,32 °С). Этот результат может быть связан с тем, что при генерации продуктов MO(Y)

D21C2 и MODIS SST используется одна и та же процедура атмосферной коррекции на основе модели RTTOV, тогда как в процессе создания продукта MO(Y)D11A2 применяется код MODTRAN. Также из *рис. 2а* видно, что, несмотря на присутствие сдвига, все три кривые хорошо коррелируют друг с другом: коэффициент детерминации R^2 находится в диапазоне от 0,94 до 0,96.

Таблица 2. Значения статистических оценок и теста Манна – Кендалла (значимые оценки выделены полужирным начертанием) для долговременных трендов ТПС

Спутниковые данные	Период	Mean, °C	Slope, °C/год	Sen's slope, °C/год	МК, %
MO(Y)D11A2 (MODIS)	2003–2024	7,77±0,97	0,081	0,087	**98,9**
MO(Y)D21C2 (MODIS)	2003–2024	8,80±1,03	0,084	0,090	**98,2**
SST (MODIS)	2003–2021	9,01±1,02	0,091	0,095	**97,3**
L2SP (Landsat)	1990–2024	8,05±1,12	0,068	0,066	**100,0**
LSWT (ESA CCI)	1997–2022	7,79±0,58	–0,005	–0,010	30,9

Также выполнен анализ долговременного тренда для данных Landsat за период, соответствующий периоду, используемому для анализа данных MODIS, т. е. за 2003–2024 гг. Этот анализ показал, что температурный тренд для данных L2SP в данном периоде возрастает по сравнению с расчётами за 1990–2024 гг. и составляет 0,076 °C/год. Для сравнения были вычислены тренды для данных MOD11A2 (Terra) и MYD21C2 (Terra), полученных примерно в одно время с данными Landsat. Они составили 0,077 и 0,078 °C/год соответственно, что согласуется с результатом, полученным для продуктов Landsat, и подтверждает их достоверность.

Помесячный анализ трендов ТПС, построенных по данным MO(Y)D11A2 (*табл. 3*) показал, что самые значительные температурные тренды (0,146 и 0,173 °C/год) приходятся на июль и август соответственно. В эти месяцы наблюдается самая тесная связь температуры поверхности озера Байкал с температурой воздуха, вследствие небольшой ветровой активности и малой толщины эпилимниона (Троицкая и др., 2003). Максимальная средняя температура поверхности ожидаемо приходится на август (13,52±1,52 °C). Июнь, октябрь и ноябрь характеризуются минимальной изменчивостью из-за близости к условиям гомотермии и глубокому ветро-волновому перемешиванию озера.

Таблица 3. Статистические оценки и тест Манна – Кендалла для данных MO(Y)D11A2 за 2003–2024 гг. по месяцам

Месяц	Mean, °C	Slope, °C/год	Sen's slope, °C/год	МК, %
Июнь	4,46±1,02	0,052	0,043	82,4
Июль	11,09±2,09	0,138	0,146	92,9
Август	13,52±1,52	0,150	0,173	**97,6**
Сентябрь	9,50±1,28	0,078	0,079	89,8
Октябрь	5,07±0,82	0,045	0,030	85,8
Ноябрь	1,85±0,59	0,027	0,029	85,8

Анализ картограмм, отражающих пространственное распределение темпов изменения температуры по данным MODIS (2003–2024) и Landsat (1990–2024), представленных на *рис. 3*, позволил выявить устойчивую закономерность: скорость потепления поверхностного слоя озера Байкал возрастает в направлении с юга на север. Эта тенденция согласуется с результатами, полученными в предыдущих работах (Асламов и др., 2025; Троицкая и др., 2003; Shimaraev, Troitskaya, 2018). Ускорение потепления в Среднем Байкале может быть свя-

зано с усиленным влиянием огромной массы воды на метеорологические процессы в котловине озера, выражающимся в летний период в уменьшении облачности и увеличении прозрачности атмосферы, что способствует усилению притока солнечной энергии в верхние слои средней котловины (Shimaraev, Troitskaya, 2018). В то время как в северной котловине озера ускоренные темпы потепления объясняются пониженной ветровой активностью и, как следствие, меньшей толщиной верхнего перемешанного слоя, большими температурными градиентами в термоклине и ослабленным теплообменом с холодными водами гиполимниона (Троицкая и др., 2003). Полученные результаты хорошо коррелируют с выводами, сделанными в работе (Ananina, Ananin, 2020) о значительном увеличении продолжительности тёплого периода в Северном Байкале с 1990 г., и согласуются с общей тенденцией увеличения скорости потепления в северных регионах России (https://www.meteorf.gov.ru).

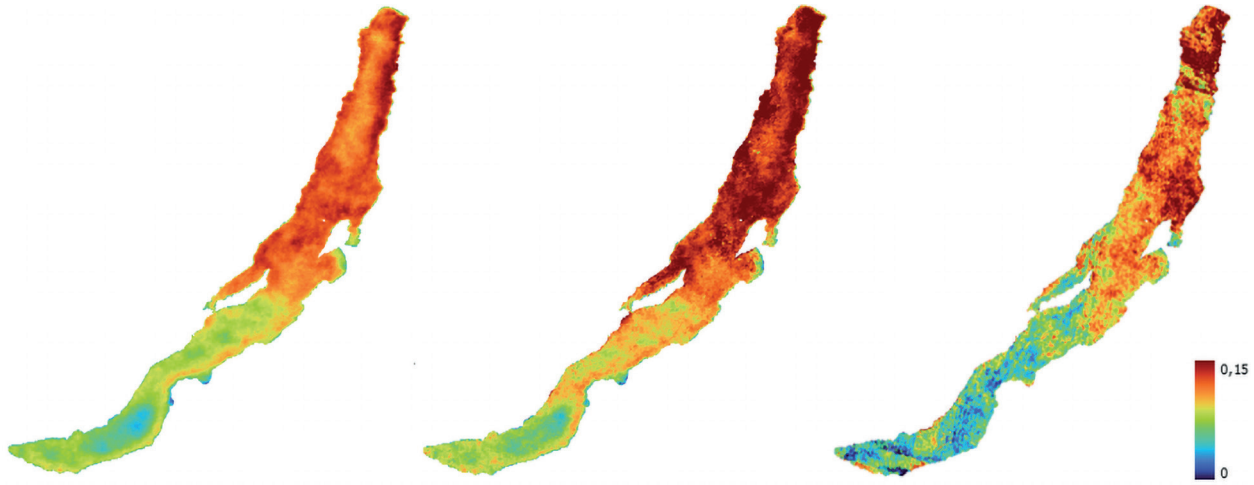

Рис. 3. Пространственное распределение трендов ТПС озера Байкал на основе рядов спутниковых данных (°C/год): *а* — MO(Y)D11A1 (2003–2024); *б* — MO(Y)D21A1 (2003–2024); *в* — Landsat-5, -7, -8, -9 (1990–2024)

Выводы

Валидация спутниковых продуктов (MO(Y)D11, MO(Y)D21, L2SP Landsat) по экспедиционным данным Лимнологического института СО РАН (2021–2024) подтвердила их принципиальную пригодность для оценки ТПС Байкала, выявив при этом характерные особенности каждого продукта. Проведённый анализ показал, что продукт MO(Y)D11 характеризуется устойчивым отрицательным сдвигом относительно наземных измерений: –0,8 °C для ночных и –0,5 °C для дневных данных. Продукт MO(Y)D21 демонстрирует положительный дневной сдвиг (+0,6 °C) и незначительный ночной (–0,13 °C). Несмотря на высокую общую согласованность с наземными данными ($R^2 \approx 0{,}9$ для обоих продуктов MODIS), MO(Y)D11 имеет преимущество по точности: его стандартное отклонение и RMSE примерно на 0,2 °C меньше, чем у MO(Y)D21. Таким образом, MO(Y)D21 отличается минимальным средним сдвигом, а MO(Y)D11 — наименьшим значением RMSE, что делает оба продукта пригодными для анализа при учёте их систематических погрешностей. Наилучшие результаты валидации показали данные Landsat: с коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}98$, RMSE = 0,62 °C и минимальным средним сдвигом, равным –0,14 °C, что вероятно связано с их высоким пространственным разрешением. Это делает данные Landsat наиболее подходящими для детального пространственно-временного анализа ТПС Байкала, однако высокая частота получения данных MODIS сохраняет их ключевую ценность для оперативного мониторинга динамики температуры.

Анализ многолетних трендов на основе этих данных выявил значимое потепление поверхности озера, особенно выраженное в его центральной и северной части в период открытой воды (июнь–ноябрь). Величина тренда варьируется в зависимости от используемого спутникового продукта и периода анализа (0,066–0,095 °C/год), но устойчиво указывает на продолжающееся повышение температуры.

Полученные результаты количественно характеризуют реакцию экосистемы Байкала на глобальное изменение климата и подтверждают важность спутникового мониторинга для её изучения.

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»).

Литература

1. *Асламов И. А.*, *Гнатовский Р. Ю.*, *Макаров М. М.*, *Тюрнев И. Н.*, *Блинов В. В.* Климатические изменения и термобарическая неустойчивость верхнего слоя гиполимниона озера Байкал при летней стратификации // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы 3-й Международ. конф. Казань: Изд-во Акад. наук РТ, 2025. С. 247–252.
2. *Евдокимов С. И.*, *Штефуряк А. В.* Сравнительный анализ температуры воды с использованием спутниковых снимков (на примере Псковского озера) // Псковский регионологический журн. 2024. Т. 20. № 4. С. 121–135. DOI: 10.37490/S221979310032412-6.
3. *Россолимо Л. Л.* Температурный режим озера Байкал // Тр. Байкальской лимнологической станции ВСФ АН СССР. 1957. Т. 16. 552 с.
4. *Сутырина Е. Н.* Изучение внутренних водоёмов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.
5. *Троицкая Е. С.*, *Шимараев М. Н.*, *Цехановский В. В.* Многолетние изменения температуры поверхности воды в Байкале // География и природ. ресурсы. 2003. № 2. С. 47–50.
6. *Ananina T. L.*, *Ananin A. A.* Long-term climatic changes in the northeastern Baikal Region (Russia) // J. Atmospheric Science Research. 2020. V. 3. No. 4. P. 10–15. DOI: 10.30564/jasr.v3i4.2255.
7. *Aranda A. C.*, *Rivera-Ruiz D.*, *Rodríguez-López L. et al.* Evidence of climate change based on lake surface temperature trends in South Central Chile // Remote Sensing. 2021. V. 13. Article 4535. DOI: 10.3390/rs13224535.
8. *Attiah G.*, *Kheyrollah Pour H.*, *Scott K. A.* Lake surface temperature retrieved from Landsat satellite series (1984 to 2021) for the North Slave Region // Earth System Science Data. 2023. V. 15. P. 1329–1355. DOI: 10.5194/essd-15-1329-2023.
9. *Berk A.*, *Conforti P.*, *Kennett R. et al.* MODTRAN6: A major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code // 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). Lausanne, Switzerland, 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/WHISPERS.2014.8077573.
10. *Bolgrien D. W.*, *Granin N. G.*, *Levin L.* Surface temperature dynamics of Lake Baikal observed from AVHRR images // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1995. V. 61. No. 2. P. 111–116.
11. *Carrea L.*, *Crétaux J.-F.*, *Liu X. et al.* ESA Lakes Climate Change Initiative (Lakes_cci): Lake products, Version 2.0.2. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 2022. DOI: 10.5285/a07deacaffb8453e93d57ee214676304.
12. *Carrea L.*, *Crétaux J.-F.*, *Liu X. et al.* Satellite-derived multivariate world-wide lake physical variable timeseries for climate studies // Scientific Data. 2023. V. 10. Article 30. DOI: 10.1038/s41597-022-01889-z.
13. *Cook M.*, *Schott J. R.*, *Mandel J.*, *Raqueno N.* Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a land surface temperature (LST) product from the archive // Remote Sensing. 2014. V. 6. No. 11. P. 11244–11266. DOI: 10.3390/rs61111244.
14. *Davies P.*, *Gather U.* The identification of multiple outliers // J. American Statistical Association. 1993. V. 88. No. 423. P. 782–792. DOI: 10.2307/2290763.
15. *Dörnhöfer K.*, *Oppelt N.* Remote sensing for lake research and monitoring — Recent advances // Ecological Indicators. 2016. V. 64. P. 105–122. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.12.009.

16. *Du J.*, *Jacinthe P.-A.*, *Zhou H. et al.* Monitoring of water surface temperature of Eurasian large lakes using MODIS land surface temperature product // Hydrological Processes. 2020. V. 34. No. 16. P. 3582–3595. DOI: 10.1002/hyp.13830.
17. *Dyba K.*, *Ermida S.*, *Ptak M. et al.* Evaluation of methods for estimating lake surface water temperature using Landsat 8 // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 15. Article 3839. DOI: 10.3390/rs14153839.
18. *Fiedler E. K.*, *Martin M. J.*, *Roberts-Jones J.* An operational analysis of Lake Surface Water Temperature // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2014. V. 66. No. 1. Article 21247. DOI: 10.3402/tellusa.v66.21247.
19. *Guo L.*, *Zheng H.*, *Wu Y. et al.* An integrated dataset of daily lake surface water temperature over the Tibetan Plateau // Earth System Science Data. 2022. V. 14. No. 7. P. 3411–3422. DOI: 10.5194/essd-14-3411-2022.
20. *Hampton S. E.*, *Izmest'eva L. R.*, *Moore M. V. et al.* Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake — Lake Baikal, Siberia // Global Change Biology. 2008. V. 14. No. 8. P. 1947–1958. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x.
21. *Herrick C.*, *Steele B. G.*, *Brentrup J. A. et al.* lakeCoSTR: A tool to facilitate use of Landsat Collection 2 to estimate lake surface water temperatures // Ecosphere. 2023. V. 14. No. 1. Article e4357. 16 p. DOI: 10.1002/ecs2.4357.
22. *Hook S. J.*, *Chander G.*, *Barsi J. A. et al.* In-flight validation and recovery of water surface temperature with Landsat-5 thermal infrared data using an automated high-altitude lake validation site at Lake Tahoe // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2004. V. 42. No. 12. P. 2767–2776. DOI: 10.1109/TGRS.2004.839092.
23. *Hulley G.*, *Veraverbeke S.*, *Hook S.* Thermal-based techniques for land cover change detection using a new dynamic MODIS multispectral emissivity product (MOD21) // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 140. P. 755–765. DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.014.
24. *Hulley G.*, *Hook S.*, *Abbott E. et al.* The ASTER Global Emissivity Database (ASTER GED): Mapping Earth's emissivity at 100 meter spatial resolution // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. P. 7966–7976. DOI: 10.1002/2015GL065564.
25. *Jia T.*, *Yang K.*, *Peng Z. et al.* Review on the change trend, attribution analysis, retrieval, simulation, and prediction of lake surface water temperature // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2022. V. 15. P. 6324–6355. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3188788.
26. *Korver M. C.*, *Lehner B.*, *Jeffrey A. et al.* Surface water temperature observations and ice phenology estimations for 1.4 million lakes globally // Remote Sensing of Environment. 2024. V. 308. Article 114164. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114164.
27. *Liu G.*, *Ou W.*, *Zhang Y. et al.* Validating and mapping surface water temperatures in Lake Taihu: Results from MODIS land surface temperature products // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. V. 8. No. 3. P. 1230–1244. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2386333.
28. *Maligaya V. H.*, *Baltodano A.*, *Agramont A. et al.* Exploring trends and variability of water quality over Lake Titicaca using global remote sensing products // Remote Sensing. 2024. V. 16. No. 24. Article 4785. DOI: 10.3390/rs16244785.
29. *McCarville D.*, *Buenemann M.*, *Bleiweiss M.*, *Barsi J.* Atmospheric correction of Landsat thermal infrared data: A calculator based on North American Regional Reanalysis (NARR) data // American Soc. for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conf. 2011. V. 15. P. 319–330.
30. *Merchant C.*, *MacCallum S.* Lake Surface Water Temperature ARC-Lake v3 (1995–2012). University of Reading. 2018. DOI: 10.17864/1947.186.
31. *Mogilev N. Y.*, *Gnatovskiy R. Y.* Satellite imagery in the study of Lake Baykal surface temperatures // Mapping Sciences and Remote Sensing. 2003. V. 40. No. 1. P. 41–50. DOI: 10.2747/0749-3878.40.1.41.
32. *Moore M. V.*, *Hampton S. E.*, *Izmest'eva L. R. et al.* Climate change and the world's "Sacred Sea" — Lake Baikal, Siberia // BioScience. 2009. V. 59. No. 5. P. 405–417. DOI: 10.1525/bio.2009.59.5.8.
33. *Moukomla S.*, *Blanken P. D.* Remote sensing of the North American Laurentian Great Lakes' surface temperature // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 4. Article 286. DOI: 10.3390/rs8040286.
34. *O'Reilly C. M.*, *Sharma S.*, *Gray D. K. et al.* Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. No. 24. P. 10773–10781. DOI: 10.1002/2015GL066235.
35. *Pareeth S.*, *Salmaso N.*, *Adrian R.*, *Neteler M.* Homogenised daily lake surface water temperature data generated from multiple satellite sensors: A long-term case study of a large sub-Alpine lake // Scientific Reports. 2016. V. 6. Article 31251. DOI: 10.1038/srep31251.
36. *Phan T. N.*, *Kappas M.* Application of MODIS land surface temperature data: a systematic literature review and analysis // J. Applied Remote Sensing. 2018. V. 12. No. 4. Article 41501. DOI: 10.1117/1.JRS.12.041501.
37. *Piccolroaz S.*, *Zhu S.*, *Ladwig R. et al.* Lake water temperature modeling in an Era of climate change: Data sources, models, and future prospects // Reviews of Geophysics. 2024. V. 62. No. 1. Article e2023RG000816. DOI: 10.1029/2023RG000816.

38. *Ptak M.*, *Choiński A.*, *Piekarczyk J.*, *Pryłowski T.* Applying Landsat satellite thermal images in the analysis of Polish lake temperatures // Polish J. Environmental Studies. 2017. V. 26. No. 5. P. 2159–2165. DOI: 10.15244/pjoes/69444.
39. *Saunders R.*, *Hocking J.*, *Turner E. et al.* An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12) // Geoscientific Model Development. 2018. V. 11. Iss. 7. P. 2717–2737. DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018.
40. *Sharaf N.*, *Fadel A.*, *Bresciani M. et al.* Lake surface temperature retrieval from Landsat-8 and retrospective analysis in Karaoun Reservoir, Lebanon // J. Applied Remote Sensing. 2019. V. 13. No. 4. Article 044505. DOI: 10.1117/1.JRS.13.044505.
41. *Shimaraev M. N.*, *Troitskaya E. S.* Current trends in upper water layer temperature in coastal zones of Baikal // Geography and Natural Resources. 2018. V. 39. P. 349–357. DOI: 10.1134/S187537281804008X.
42. *Shimaraev M. N.*, *Kuimova L. N.*, *Sinyukovich V. N. et al.* Manifestation of global climatic changes in Lake Baikal during the 20th century // Doklady Earth Sciences. 2002. V. 383. No. 3. P. 288–291.
43. *Simis S.*, *Liu X.*, *Calmettes B. et al.* ESA CCI Lakes Product Validation and Intercomparison Report Product (PVIR). Report CCI-LAKES-0031-PVIR. European Space Agency, 2021. 175 p. https://climate.esa.int/media/documents/CCI-LAKES-0031-PVIR_v2.1.pdf.
44. *Sobrino J. A.*, *García-Monteiro S.*, *Julien Y.* An analysis of the Lake Surface Water Temperature evolution of the world's largest lakes during the years 2003–2020 using MODIS data // Recent Advances in Remote Sensing. 2024. V. 1. P. 1–9. DOI: 10.62880/rars240001.
45. *Wan Z.*, *Dozier J.* A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1996. V. 34. No. 4. P. 892–905. DOI: 10.1109/36.508406.
46. *Xie C.*, *Zhang X.*, *Zhuang L. et al.* Analysis of surface temperature variation of lakes in China using MODIS land surface temperature data // Scientific Reports. 2022. V. 12. Article 2415. DOI: 10.1038/s41598-022-06363-9.

Trends in Lake Baikal surface temperature: Long-term analysis based on validated satellite products

E. A. Mamash [1], I. A. Pestunov [1,4], V. V. Blinov [2], A. N. Mazyar [3], I. A. Aslamov [2]

[1] *Federal Research Center for Information and Computational Technologies Novosibirsk 630090, Russia*
E-mails: elenamamash@gmail.com, pestunov@ict.nsc.ru
[2] *Limnological Institute SB RAS, Irkutsk 664033, Russia*
E-mail: ilya_aslamov@bk.ru
[3] *Novosibirsk State University, Novosibirsk 630090, Russia*
E-mail: a.mazyar@g.nsu.ru
[4] *Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS Irkutsk 664033, Russia*

This study analyzes long-term trends in Lake Baikal skin temperature (ST) using validated satellite data. The work addresses two main objectives: (1) validation of Terra/Aqua MODIS and Landsat-8, -9 ST products against *in situ* ship measurements from LIN SB RAS (Limnological Institute SB RAS) (2021–2024), and (2) identification of spatiotemporal trends in the lake ST. Validation confirmed the applicability of all considered products for ST estimation while revealing their specific characteristics. Terra/Aqua MODIS products exhibit a bias of 0,13–0,8 °C (absolute value) and a root mean square error (RMSE) of 1,47–1,77 °C relative to *in situ* data. Analyses were conducted separately for daytime and nighttime observations. Landsat data showed the highest accuracy, with a coefficient of determination (R^2) of 0.98, RMSE of 0.62 °C, and a mean bias of −0.14 °C, likely attributable to their high spatial resolution. Consequently, Landsat is preferable for detailed analysis, whereas MODIS high temporal resolution maintains its utility for near-real-time monitoring. Long-term trend analysis based on validated data revealed statistically significant warming of Lake Baikal ST. The warming is most pronounced in the central and northern basins during the open-water period (June–November), with trend magnitudes varying by dataset and time period (0,066–0,095 °C/year). These results consistently indicate ongoing surface temperature increase.

Keywords: validation, satellite data, Lake Baikal surface layer temperature, temperature trends, Terra/Aqua MODIS, Landsat

Accepted: 11.08.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-306-321

References

1. Aslamov I. A., Gnatovsky R. Yu., Makarov M. M., Tyurnev I. N., Blinov V. V., Climatic changes and thermobaric instability of the upper layer of the hypolimnion of Lake Baikal during summer stratification, *Materialy 3-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya"* (Proc. 3rd Intern. Conf. "Lakes of Eurasia: problems and ways of their solution", Kazan: Publishing house of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan), Kazan: Izd. Akademii nauk RT, 2025, pp. 247–252 (in Russian).
2. Evdokimov S. I., Shtefuryak A. *V.*, Comparative analysis of water temperature using satellite images (on the example of Lake Pskov), *Pskovskii regionologicheskii zhurnal*, 2024, V. 20, No. 4, pp. 121–135 (in Russian), DOI: 10.37490/S221979310032412-6.
3. Rossolimo L. L., Temperature regime of Lake Baikal, *Trudy Baikal'skoi limnologicheskoi stantsii VSF AN SSSR*, 1957, V. 16, 552 p. (in Russian).
4. Sutyrina E. N., *Izuchenie vnutrennikh vodoemov i vodosborov s primeneniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Study of inland water bodies and watersheds using remote sensing data), Irkutsk: Izd. IGU, 2014, 133 p. (in Russian).
5. Troitskaya E. S., Shimaraev M. N., Tsekhanovsky V. V., Multiyear changes in water surface temperature in Baikal, *Geografiya i prirodnye resursy*, 2003, No. 2, pp. 47–50 (in Russian).
6. Ananina T. L., Ananin A. A., Long-term climatic changes in the northeastern Baikal Region (Russia), *J. Atmospheric Science Research*, 2020, V. 3, No. 4, pp. 10–15, DOI: 10.30564/jasr.v3i4.2255.
7. Aranda A. C., Rivera-Ruiz D., Rodríguez-López L. et al., Evidence of climate change based on lake surface temperature trends in South Central Chile, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, Article 4535, DOI: 10.3390/rs13224535.
8. Attiah G., Kheyrollah Pour H., Scott K. A., Lake surface temperature retrieved from Landsat satellite series (1984 to 2021) for the North Slave Region, *Earth System Science Data*, 2023, V. 15, pp. 1329–1355, DOI: 10.5194/essd-15-1329-2023.
9. Berk A., Conforti P., Kennett R. et al., MODTRAN6: A major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code, *6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing* (*WHISPERS*), Lausanne, Switzerland, 2014, pp. 1–4, DOI: 10.1109/WHISPERS.2014.8077573.
10. Bolgrien D. W., Granin N. G., Levin L., Surface temperature dynamics of Lake Baikal observed from AVHRR images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, V. 61, No. 2, pp. 111–116.
11. Carrea L., Crétaux J.-F., Liu X. et al., *ESA Lakes Climate Change Initiative* (*Lakes_cci*): *Lake Products*, *Version 2.0.2*, NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 2022, DOI: 10.5285/a07deacaffb8453e93d57ee214676304.
12. Carrea L., Crétaux J.-F., Liu X. et al., Satellite-derived multivariate world-wide lake physical variable timeseries for climate studies, *Scientific Data*, 2023, V. 10, Article 30, DOI: 10.1038/s41597-022-01889-z.
13. Cook M., Schott J. R., Mandel J., Raqueno N., Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a land surface temperature (LST) product from the archive, *Remote Sensing*, 2014, V. 6, No. 11, pp. 11244–11266, DOI: 10.3390/rs61111244.
14. Davies P., Gather U., The identification of multiple outliers, *J. American Statistical Association*, 1993, V. 88, No. 423, pp. 782–792, DOI: 10.2307/2290763.
15. Dörnhöfer K., Oppelt N., Remote sensing for lake research and monitoring — Recent advances, *Ecological Indicators*, 2016, V. 64, pp. 105–122, DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.12.009.
16. Du J., Jacinthe P.-A., Zhou H. et al., Monitoring of water surface temperature of Eurasian large lakes using MODIS land surface temperature product, *Hydrological Processes*, 2020, V. 34, No. 16, pp. 3582–3595, DOI: 10.1002/hyp.13830.
17. Dyba K., Ermida S., Ptak M. et al., Evaluation of methods for estimating lake surface water temperature using Landsat 8, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 15, Article 3839, DOI: 10.3390/rs14153839.
18. Fiedler E. K., Martin M. J., Roberts-Jones J., An operational analysis of Lake Surface Water Temperature, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2014, V. 66, No. 1, Article 21247, DOI: 10.3402/tellusa.v66.21247.
19. Guo L., Zheng H., Wu Y. et al., An integrated dataset of daily lake surface water temperature over the Tibetan Plateau, *Earth System Science Data*, 2022, V. 14, No. 7, pp. 3411–3422, DOI: 10.5194/essd-14-3411-2022.

20. Hampton S. E., Izmest'eva L. R., Moore M. V. et al., Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake — Lake Baikal, Siberia, *Global Change Biology*, 2008, V. 14, No. 8, pp. 1947–1958, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x.
21. Herrick C., Steele B. G., Brentrup J. A. et al., lakeCoSTR: A tool to facilitate use of Landsat Collection 2 to estimate lake surface water temperatures, *Ecosphere*, 2023, V. 14, No. 1, Article e4357, 16 p., DOI: 10.1002/ecs2.4357.
22. Hook S. J., Chander G., Barsi J. A. et al., In-flight validation and recovery of water surface temperature with Landsat-5 thermal infrared data using an automated high-altitude lake validation site at Lake Tahoe, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2004, V. 42, No. 12, pp. 2767–2776, DOI: 10.1109/TGRS.2004.839092.
23. Hulley G., Veraverbeke S., Hook S., Thermal-based techniques for land cover change detection using a new dynamic MODIS multispectral emissivity product (MOD21), *Remote Sensing of Environment*, 2014, V. 140, pp. 755–765, DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.014.
24. Hulley G., Hook S., Abbott E. et al., The ASTER Global Emissivity Database (ASTER GED): Mapping Earth's emissivity at 100 meter spatial resolution, *Geophysical Research Letters*, 2015, V. 42, pp. 7966–7976, DOI: 10.1002/2015GL065564.
25. Jia T., Yang K., Peng Z. et al., Review on the change trend, attribution analysis, retrieval, simulation, and prediction of lake surface water temperature, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, V. 15, pp. 6324–6355, DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3188788.
26. Korver M. C., Lehner B., Jeffrey A. et al., Surface water temperature observations and ice phenology estimations for 1.4 million lakes globally, *Remote Sensing of Environment*, 2024, V. 308, Article 114164, DOI: 10.1016/j.rse.2024.114164.
27. Liu G., Ou W., Zhang Y. et al., Validating and mapping surface water temperatures in Lake Taihu: Results from MODIS land surface temperature products, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, V. 8, No. 3, pp. 1230–1244, DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2386333.
28. Maligaya V. H., Baltodano A., Agramont A. et al., Exploring trends and variability of water quality over Lake Titicaca using global remote sensing products, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 24, Article 4785, DOI: 10.3390/rs16244785.
29. McCarville D., Buenemann M., Bleiweiss M., Barsi J., Atmospheric correction of Landsat thermal infrared data: A calculator based on North American Regional Reanalysis (NARR) data, *American Soc. for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conf.*, 2011, V. 15, pp. 319–330.
30. Merchant C., MacCallum S., Lake Surface Water Temperature ARC-Lake v3 (1995–2012), *University of Reading*, 2018, DOI: 10.17864/1947.186.
31. Mogilev N. Y., Gnatovskiy R. Y., Satellite imagery in the study of Lake Baykal surface temperatures, *Mapping Sciences and Remote Sensing*, 2003, V. 40, No. 1, pp. 41–50, DOI: 10.2747/0749-3878.40.1.41.
32. Moore M. V., Hampton S. E., Izmest'eva L. R. et al., Climate change and the world's "Sacred Sea" — Lake Baikal, Siberia, *BioScience*, 2009, V. 59, No. 5, pp. 405–417, DOI: 10.1525/bio.2009.59.5.8.
33. Moukomla S., Blanken P. D., Remote sensing of the North American Laurentian Great Lakes' surface temperature, *Remote Sensing*, 2016, V. 8, No. 4, Article 286, DOI: 10.3390/rs8040286.
34. O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al., Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe, *Geophysical Research Letters*, 2015, V. 42, No. 24, pp. 10773–10781, DOI: 10.1002/2015GL066235.
35. Pareeth S., Salmaso N., Adrian R., Neteler M., Homogenised daily lake surface water temperature data generated from multiple satellite sensors: A long-term case study of a large sub-Alpine lake, *Scientific Reports*, 2016, V. 6, Article 31251, DOI: 10.1038/srep31251.
36. Phan T. N., Kappas M., Application of MODIS land surface temperature data: a systematic literature review and analysis, *J. Applied Remote Sensing*, 2018, V. 12, No. 4, Article 41501, DOI: 10.1117/1.JRS.12.041501.
37. Piccolroaz S., Zhu S., Ladwig R. et al., Lake water temperature modeling in an Era of climate change: Data sources, models, and future prospects, *Reviews of Geophysics*, 2024, V. 62, No. 1, Article e2023RG000816, DOI: 10.1029/2023RG000816.
38. Ptak M., Choiński A., Piekarczyk J., Pryłowski T., Applying Landsat satellite thermal images in the analysis of Polish lake temperatures, *Polish J. Environmental Studies*, 2017, V. 26, No. 5, pp. 2159–2165, DOI: 10.15244/pjoes/69444.
39. Saunders R., Hocking J., Turner E. et al., An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12), *Geoscientific Model Development*, 2018, V. 11, Iss. 7, pp. 2717–2737, DOI: 10.5194/gmd-11-2717-2018.
40. Sharaf N., Fadel A., Bresciani M. et al., Lake surface temperature retrieval from Landsat-8 and retrospective analysis in Karaoun Reservoir, Lebanon, *J. Applied Remote Sensing*, 2019, V. 13, No. 4, Article 044505, DOI: 10.1117/1.JRS.13.044505.

41. Shimaraev M. N., Troitskaya E. S., Current trends in upper water layer temperature in coastal zones of Baikal, *Geography and Natural Resources*, 2018, V. 39, pp. 349–357, DOI: 10.1134/S187537281804008X.
42. Shimaraev M. N., Kuimova L. N., Sinyukovich V. N. et al., Manifestation of global climatic changes in Lake Baikal during the 20th century, *Doklady Earth Sciences*, 2002, V. 383, No. 3, pp. 288–291.
43. Simis S., Liu X., Calmettes B. et al., *ESA CCI Lakes Product Validation and Intercomparison Report Product* (*PVIR*), *Report CCI-LAKES-0031-PVIR*, European Space Agency, 2021, 175 p., https://climate.esa.int/media/documents/CCI-LAKES-0031-PVIR_v2.1.pdf.
44. Sobrino J. A., García-Monteiro S., Julien Y., An analysis of the Lake Surface Water Temperature evolution of the world's largest lakes during the years 2003–2020 using MODIS data, *Recent Advances in Remote Sensing*, 2024, V. 1, pp. 1–9, DOI: 10.62880/rars240001.
45. Wan Z., Dozier J., A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1996, V. 34, No. 4, pp. 892–905, DOI: 10.1109/36.508406.
46. Xie C., Zhang X., Zhuang L. et al., Analysis of surface temperature variation of lakes in China using MODIS land surface temperature data, *Scientific Reports*, 2022, V. 12, Article 2415, DOI: 10.1038/s41598-022-06363-9.