

А. Н. Мазяр¹, Е. А. Мамаш², И. А. Пестунов^{1,2}✉

Многолетний анализ температуры поверхностного слоя озера Байкал по данным спутникового мониторинга

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

Аннотация. Температура поверхностного слоя (ТПС) – ключевой параметр при изучении гидрологического режима и экологического состояния водоёмов. Традиционные методы её измерения (судовые и стационарные наблюдения) имеют ряд ограничений, включая точечный характер данных, что затрудняет их использование для мониторинга динамичных крупных озёрных систем, таких как озеро Байкал. Целью данной работы являлась валидация температурных продуктов, использующих данные спутников Landsat, Aqua, Terra, и анализ многолетней динамики ТПС Байкала за период 1990–2024 гг. в контексте известных климатических сценариев. Результаты валидации показали, что алгоритм на основе данных Landsat обеспечивает более высокую точность оценки ТПС по сравнению с аналогичными продуктами: коэффициент детерминации для него составил 0.93, тогда как для других продуктов от 0.85 до 0.91. Анализ многолетней динамики выявил устойчивую тенденцию к потеплению ТПС Байкала со скоростью 0.049 °C/год, что соответствует пессимистичным климатическим сценариям.

Ключевые слова: озеро Байкал, температура поверхностного слоя, Landsat, MODIS, валидация, сценарии антропогенного воздействия

A. N. Maziar¹, E. A. Mamash², I. A. Pestunov^{1,2}✉

Multiyear analysis of lake Baikal surface layer temperature based on satellite monitoring data

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

²Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: pestunov@ict.nsc.ru

Abstract. Skin surface temperature (SST) is a key parameter in studying the hydrological regime and ecological state of water bodies. Traditional methods of its measurement (ship and stationary observations) have a number of limitations, including the point nature of the data, which makes it difficult to use them for monitoring dynamic large lake systems, such as Lake Baikal. The aim of this work was to validate temperature products using data from Landsat, Aqua, and Terra satellites and to analyze the multi-year dynamics of Baikal SST for the period 1990-2024 in the context of known climate scenarios. The validation results showed that the algorithm based on Landsat data provides higher accuracy of SST estimation compared to analogs: its coefficient of determination was 0.93, while for other products it was 0.85-0.91. The analysis of long-term dynamics revealed a steady tendency for the Baikal SST warming at a rate of 0.049 °C/year, which corresponds to pessimistic climate scenarios.

Keywords: lake Baikal, skin surface temperature, Landsat, MODIS, validation, anthropogenic impact scenarios

Введение

Температура поверхностного слоя (ТПС) – ключевой параметр водных объектов, влияющий на содержание хлорофилла, мутность, испарение и другие процессы [1]. Ее динамика служит важным индикатором климатических изменений [2]. Озеро Байкал, благодаря своей глубине и высокой теплоемкости, аккумулирует тепло в долгосрочной перспективе, что делает его особенно ценным для изучения климатических колебаний.

Традиционные методы измерения температуры (*in situ*) обладают ограниченной применимостью из-за точечного характера данных, что затрудняет оперативный мониторинг всего водоема. В отличие от них, спутниковое дистанционное зондирование обеспечивает пространственно-временную информацию по всей акватории, что особенно важно для крупных объектов, таких как Байкал.

Наибольшее применение при оценке температуры поверхностного слоя (ТПС) озер находят продукты, использующие данные спутников Landsat, Terra и Aqua. Многолетние временные ряды этих данных позволяют выявлять статистически значимые тренды изменения ТПС, определять основные закономерности термического режима и проводить количественную оценку наблюдаемых изменений за последние десятилетия [3, 4].

Первая попытка оценки температуры поверхностного слоя (ТПС) озера Байкал по спутниковым данным AVHRR/NOAA была осуществлена в 1995 году [5].

В исследованиях Е.Н. Сутириной [6, 7] на основе данных AVHRR/NOAA была проанализирована внутригодовая и межгодовая динамика пространственного распределения температуры поверхности озера.

Для анализа динамики ТПС озера Байкал в данной работе использовались многомодельные ансамбли CMIP5 и CMIP6 [8, 9]. Прогнозные расчеты для XXI века выполнялись по сценариям RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5 для CMIP5, а также SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 для CMIP6.

Сценарии RCP8.5 и SSP5-8.5 предполагают максимальное радиационное воздействие, обусловленное неконтролируемым ростом промышленности и населения при отсутствии мер по снижению выбросов парниковых газов. В отличие от них, сценарии RCP2.6 и SSP1-2.6 соответствуют активной климатической политике, направленной на достижение нулевых выбросов к 2100 году. Сценарии RCP4.5 и SSP2-4.5 занимают промежуточное положение, учитывая естественное ограничение доступности ископаемых ресурсов.

В рамках исследования проведена валидация температурных продуктов, основанных на данных спутников Landsat и MODIS. На основе этих данных рассчитаны среднегодовые значения ТПС озера Байкал за период 1990-2024 гг., а их динамика сопоставлена с прогнозными значениями климатических моделей из мультимодельных ансамблей CMIP5 и CMIP6, полученных для различных сценариев антропогенного воздействия.

Методы и материалы

Для валидации спутниковых температурных продуктов использовались судовые измерения, предоставленные Лимнологическим институтом СО РАН, за

период 2021-2024 гг. Валидация проводилась по данным дистанционного зондирования Земли со спутников Landsat-8, -9, Terra и Aqua за те же 2021-2024 гг. Для расчета среднегодовых значений ТПС озера Байкал и анализа их динамики применялись наборы данных: Landsat-5, -7, -8, -9 за 1990-2024 гг., а также Terra и Aqua за 2001-2024 гг.

Данные спектрорадиометра MODIS позволяют оценить температуру поверхностного слоя крупных водных объектов благодаря пространственному разрешению около 1000 м. В то же время, тепловые каналы спутников Landsat с разрешением приблизительно 100 м подходят в том числе для анализа температуры небольших водоёмов и прибрежных зон.

В данной работе доступ к спутниковым данным и их обработка осуществлялись через облачную платформу Google Earth Engine (GEE), которая в последние годы получает широкое распространение. Данная платформа предоставляет не только доступ к информации, но и инструменты для обработки больших временных рядов.

В исследовании использовались готовые температурные продукты MODIS LST: MOD11A1, MYD11A1, MOD21C1 и MYD21C1. Эти продукты представляют ряды дневных и ночных данных со спутников Terra и Aqua, которые ввиду различий между собой рассматривались отдельно.

В работе [10], выполненной S. Ermida и соавторами, был разработан алгоритм LST_erm для расчета температуры поверхностного слоя (ТПС) в среде GEE применительно к данным спутников серии Landsat, начиная с Landsat-4. При реализации алгоритма водные поверхности идентифицируются с помощью битовых масок, причем коэффициент эмиссии для водных объектов принимается постоянным и равным 0.99.

Следует, однако, отметить существенный недостаток данного подхода – необходимость использования данных ASTER GED, которые характеризуются неполным покрытием территории Российской Федерации. В частности, акватория озера Байкал имеет значительные пробелы в покрытии этими данными.

В работе [11] была предложена модифицированная версия алгоритма LST_erm, обозначенная как LST_sob, которая не зависит от покрытия ASTER GED. Основное отличие модифицированного алгоритма заключается в измененном подходе к расчету коэффициента эмиссии голой почвы. В оригинальной версии алгоритма этот параметр рассчитывался на основе базы данных ASTER GED, тогда как в модификации, разработанной в ФИЦ ИВТ, он принимается постоянным и равным 0.97.

Для исследования температурного тренда поверхностного слоя озера Байкал использовались среднегодовые значения температуры, полученные путем пространственного интегрирования по всей акватории озера и временного усреднения за период с июня по октябрь. Выбор этого временного интервала (период открытой воды) обусловлен ухудшением качества спутниковых данных в остальные месяцы, вызванным процессами ледостава, неблагоприятными метеорологическими условиями и повышенной облачностью. Анализ выполнен для временного ряда с 1990 по 2025 год.

Методика определения температурного тренда основана на линейной регрессии, что соответствует подходу, применённому в глобальном исследовании динамики температуры поверхностных вод с использованием продуктов MODIS LST [4]. В данной работе для построения регрессионной модели использовалась оценка Тейла-Сена.

В работе использовался преимущественно один член ансамбля экспериментов (r1i1p1f1) для каждой модели, поскольку количество доступных ансамблей варьировалось для разных моделей и сценариев. Все модельные данные были интерполированы на регулярную широтно-долготную сетку $1^\circ \times 1^\circ$ с применением метода билинейной интерполяции. Для оценки ТПС по прогнозам климатических моделей вычислялось среднее значение по обширной выборке доступных моделей. Всего в анализ включено 56 моделей (29 из ансамбля CMIP5 и 27 из ансамбля CMIP6).

Предварительная обработка данных, визуализация и сравнение результатов климатических моделей со спутниковыми данными выполнялись с использованием Earth System Model Evaluation Tool (ESMValTool) версии 2.0. Этот инструмент специально разработан для упрощения комплексной оценки и анализа моделей CMIP-ансамблей.

Результаты и обсуждения

Результаты валидации температурных продуктов включают расчет следующих статистических показателей: среднего сдвига (Bias), среднеквадратической ошибки (RMSE) и коэффициента детерминации (R^2). Хотя все рассмотренные продукты демонстрируют сопоставимые значения этих показателей, алгоритм LST_sob характеризуется наименьшими абсолютными значениями Bias и RMSE, а также наибольшим значением R^2 (табл. 1).

Все статистические характеристики были рассчитаны после исключения выбросов с использованием фильтра Хампеля – надежного метода обнаружения аномальных значений [12].

Таблица 1

Результаты валидации спутниковых температурных продуктов

Продукт	Bias	RMSE	R^2	N
MO(Y)D11A1 (день)	-0.52	1.52	0.91	183
MO(Y)D11A1 (ночь)	-0.81	1.47	0.91	183
MO(Y)D21C1 (день)	0.44	1.83	0.86	199
MO(Y)D21C1 (ночь)	-0.43	1.78	0.85	137
LST sob	-0.25	1.34	0.93	20

На рис. 1 представлены соответствующие диаграммы рассеяния и уравнения регрессий.

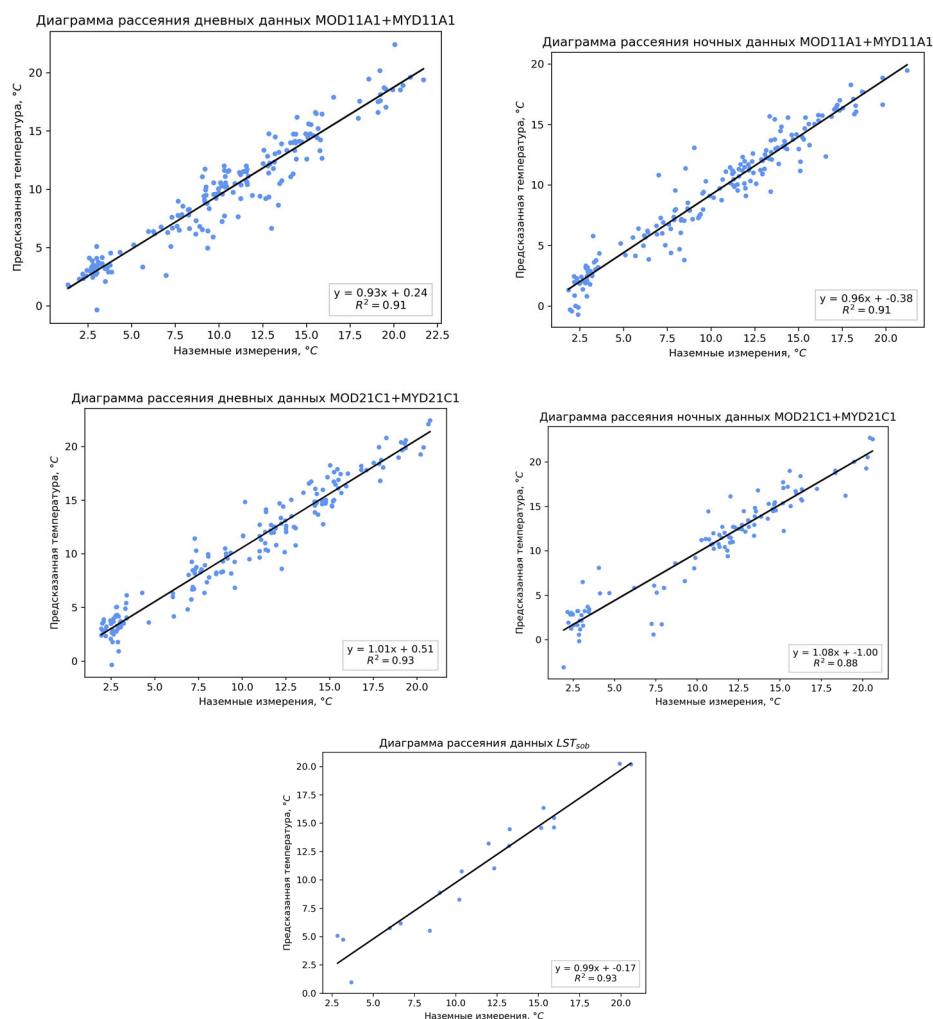


Рис. 1. Диаграммы рассеяния, уравнения регрессии и значения коэффициента детерминации на данных валидации для продуктов MODIS LST и LST_sob

Анализ среднегодовых трендов температуры поверхностного слоя озера Байкал, полученных по данным климатического моделирования, показывает высокую согласованность результатов внутри каждого многомодельного ансамбля (рис. 2). Для ансамбля CMIP5 расчетные значения составили: 0.0387 °C/год (RCP2.6), 0.0416 °C/год (RCP4.5) и 0.0408 °C/год (RCP8.5). В случае CMIP6 наблюдаются более высокие темпы потепления: 0.0545 °C/год (SSP1-2.6), 0.0591 °C/год (SSP2-4.5) и 0.0577 °C/год (SSP5-8.5).

Такая схожесть результатов внутри ансамблей объясняется относительно коротким периодом моделирования. В исторических экспериментах параметры выбросов парниковых газов, идентичные для всех сценариев, основаны на фактических данных. Различия между сценариями начинают проявляться только с 2005 года для CMIP5 и с 2015 года для CMIP6. За столь краткие периоды (20 и 10 лет соответственно) специфические параметры сценариев не успевают существенно повлиять на результаты моделирования.

Тренд ТПС, рассчитанный по спутниковым данным Landsat с использованием алгоритма LST_sob ($0.0468\text{ }^{\circ}\text{C/год}$), занимает промежуточное положение между значениями CMIP5 и CMIP6. Учитывая более продолжительный период моделирования в CMIP5, именно эти данные были использованы для сопоставления со спутниковыми наблюдениями. Результаты свидетельствуют, что наблюдаемый тренд температуры озера Байкал в большей степени соответствует пессимистичным климатическим сценариям.

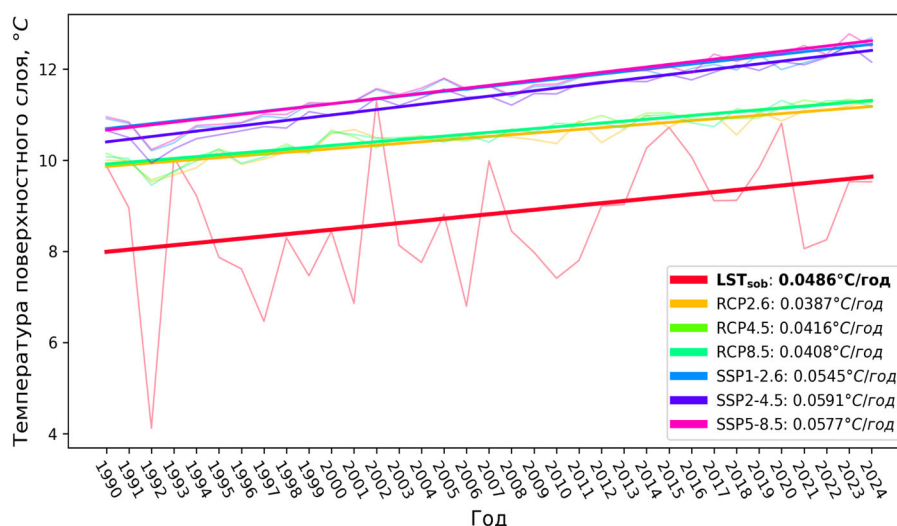


Рис. 2. Динамика среднемесячных значений ТПС для акватории озера Байкал по данным спутников Landsat-5, -7, -8, -9, и прогнозы ансамблей климатических моделей

Заключение

Разработанная методика валидации спутниковых данных, основанная на использовании судовых измерений и облачной платформы GEE, подтвердила эффективность рассматриваемых спутниковых продуктов для мониторинга температурного режима озера Байкал. Полученные значения среднеквадратической ошибки находятся в диапазоне 1.34–1.83, а коэффициента детерминации варьируют от 0.85 до 0.93.

Исследование динамики температуры поверхностного слоя озера Байкал, выполненное на основе спутниковых данных и климатического моделирования, выявило устойчивый положительный тренд ($0.0468\text{ }^{\circ}\text{C/год}$). Сравнение с результатами модельных расчетов CMIP5 и CMIP6 продемонстрировало соответствие наблюдаемых изменений температуры наиболее интенсивным сценариям антропогенного воздействия (RCP8.5/SSP5-8.5), превышающим прогнозы для умеренных вариантов развития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Россолимо Л.Л. Температурный режим озера Байкал // Тр. байк. лимнол. ст. ВСФ АН СССР. 1957. Т. XVI. – 552 с.

2. Donlon C. et al. Successes and challenges for the modern sea surface temperature observing system. Community // White Paper for Ocean Obs. 2009. Vol. 9. P. 1–9.
3. 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 Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. Vol. 8, № 3. P. 1230–1244.
4. 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. Vol. 1. P. 1–9.
5. Bolgrien D. W., Granin N. G., Levin L. Surface Temperature Dynamics of Lake Baikal Observed from AVHRR Images // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1995. Vol. 61, № 2. P. 211–216.
6. Сутырина Е. Н. Использование данных дистанционного спутникового зондирования для картографического отображения и анализа распределения температуры поверхности воды озера Байкал // Известия Ирк. гос. ун-та. Серия: Науки о Земле. 2012. Т. 5, № 2. С. 240–251.
7. Сутырина Е.Н. Применение интерполяции для заполнения пробелов в рядах спутниковых наблюдений за температурным режимом озера Байкал // В сборнике: Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы VII Междунар. науч. конф., СФУ, ИКИТ. 2020. С. 293–296.
8. Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design // Bulletin of the American Meteorological Society. 2012. Vol. 93. P. 485–498.
9. Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9. P. 1937–1958.
10. Ermida S., Soares P., Mantas V., Götsche F.-M., Trigo I. Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat series // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, № 9. P. 1471.
11. Мамаш Е. А., Пестунов И. А., Кудряшова С. Я., Чумбаев А. С. Валидация значений температуры земной поверхности, вычисляемых по данным радиометра TIRS/Landsat-8, и их использование для анализа температурного режима орошаемых и посторошаемых почв Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. №. 1. С. 9–25.
12. Davies P., Gather U. The identification of multiple outliers // J. of the American Statistical Association. 1993. Vol. 88, № 423. P. 782–792.

© А. Н. Мазяр, Е. А. Мамаш, И. А. Пестунов, 2025