

Е. А. Мамаш^{1}, И. А. Пестунов^{1,2}, Р. К. Федоров³*

Оценка среднемесячных значений температуры поверхностного слоя акватории озера Байкал по спутниковым данным различного пространственного разрешения

¹ Федеральное исследовательское учреждение информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Институт динамики и систем управления им. В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск,
Российская Федерация

* e-mail: elenamamash@gmail.com

Аннотация. Температура поверхностного слоя (ТПС) является одной из ключевых характеристик водных объектов. Традиционные судовые и станционные методы регистрации ТПС носят локальный характер и часто не являются репрезентативными для таких сложных и динамических экосистем как озера. Цель данной работы заключалась в проведении сравнительного анализа среднемесячных значений ТПС акватории озера Байкал, рассчитанных на основе многовременных серий спутниковых данных MODIS/Terra и TIRS/Landsat-8, полученных в период 2013-2022 гг., и исследовании влияния сезонной изменчивости на значение коэффициента корреляции Пирсона для этих серий данных. В ходе экспериментальных исследований установлено, что среднемесячные значения ТПС отличаются менее, чем на один градус, максимальное различие приходится на июнь и октябрь, а наименьшее – на сентябрь, что может быть обусловлено выравниванием значений температуры водной поверхности и температуры приземного слоя воздуха. Величина среднего сдвига пар данных ТПС, рассчитанных на основе различных данных колеблется в пределах от 0.15°C до 1.29°C. Анализ картограмм распределения температуры для акватории оз. Байкала подтверждает ее неравномерный характер, максимальный прогрев поверхности озера наблюдается в августе.

Ключевые слова: Landsat-8/TIRS, Terra/MODIS, температура поверхностного слоя, озеро Байкал

E. A. Mamash^{1}, I. A. Pestunov^{1,2}, R. K. Fedorov³*

Estimation of Monthly Average Surface Layer Temperature of Lake Baikal Water Area Based on Satellite Data of Various Spatial Resolution

¹ Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

* e-mail: elenamamash@gmail.com

Abstract. Surface layer temperature (SLT) is one of the key characteristics of water bodies. Traditional ship and station methods of SLT registration are localized and are often not representative for such complex and dynamic ecosystems as lakes. The aim of this work was to conduct a comparative analysis of monthly average SLT values of Lake Baikal water area calculated on the basis of multitemporal series of MODIS/Terra and TIRS/Landsat-8 satellite data obtained in the

period 2013-2022 and to study the influence of seasonal variability on the value of Pearson correlation coefficient for these data series. In the course of experimental studies, it was found that monthly mean SST values differ by less than one degree, with the maximum difference occurring in June and October, and the smallest in September, which may be due to the equalization of water surface temperature and surface air temperature values. The value of the average shift of SST data pairs calculated on the basis of various data ranges from 0.15°C to 1.29°C. The analysis of temperature distribution cartograms for the Lake Baikal water area confirms its non-uniform character, the maximum heating of the lake surface is observed in August.

Keywords: Landsat-8/TIRS, Terra/MODIS, surface layer temperature, Lake Baikal

Введение

Температура поверхностного слоя (ТПС) является одним из важнейших параметров, характеризующих водные объекты [1]. Ее ход и пространственно-временное распределение в значительной степени определяют ряд других процессов и показателей, например, содержание хлорофилла, мутность, динамику испарения и т.д. Исследование поведения ТПС позволяет выявлять также и климатические изменения [2]. Поэтому при изучении глобального и локального изменения климата необходим постоянный мониторинг ТПС.

Традиционные методы регистрации температуры воды, основанные на измерениях *in situ*, носят точечный характер и часто не являются репрезентативными для таких сложных и динамических экосистем, как озера. Кроме того, эти методы имеют также логистические ограничения и требуют существенных финансовых и временных ресурсов на их применение. Поскольку традиционные методы дают лишь точечные оценки, они не позволяют получить полную пространственную картину экологического состояния водоема в целом.

В связи этим в последнее десятилетие для определения ТПС акватории озер активно используется спутниковое дистанционное зондирование, являющееся незаменимым инструментом в изучении крупных внутренних водоемов, к которым относится и озеро Байкал с площадью акватории в 31,7 тыс. км² [3, 4]. Применение данных дистанционного зондирования даёт возможность наблюдать за состоянием всего водоёма и получать пространственно-временную информацию о происходящих в озере процессах, которую невозможно получить с использованием только судовых и станционных наблюдений.

Особенности распределения температуры в поверхностном слое акватории оз. Байкал в период открытой воды изучались Е.Н. Сутыриной в работах [5, 6] с использованием данных спектрорадиометра AVHRR/NOAA. В этих работах на основе отдельных снимков исследовалась внутригодовая и межгодовая изменчивость в распределении ТПС оз. Байкал. В результате было выявлено, что наибольшая межгодовая изменчивость температуры на его поверхности наблюдается в августе, который характеризуется наибольшим прогревом поверхности озера.

В данной работе проводится сравнительный анализ среднемесячных значений ТПС акватории озера Байкал, рассчитанных на основе многовременных се-

рий спутниковых данных разного пространственного разрешения, полученных в период 2013-2022 гг. Анализируется также влияние сезонной изменчивости на значение коэффициента корреляции Пирсона для данных разного пространственного разрешения данных.

Методы и материалы

В ряде исследований показано [7-9], что корреляция между температурой поверхностного слоя водных объектов, измеренной *in situ* и ее оценкой, полученной по спутниковым данным, достаточно высока (коэффициент детерминации $R^2 > 0,9$). При этом одними из наиболее эффективных оценок ТПС по спутниковым данным являются продукты, полученные по данным спутников серии Landsat/TIRS и (Terra+Aqua)/MODIS.

Данные, получаемые с помощью спектрорадиометра MODIS, позволяют получить общую оценку температуры поверхностного слоя акватории относительно больших по площади водных объектов, поскольку их пространственное разрешение составляет ~ 1000 м. Пространственное разрешение данных в тепловых каналах спутников Landsat составляет ~ 100 м, поэтому они могут быть использованы для анализа температуры небольших водоемов и прибрежной зоны.

Доступ к этим данным чаще всего осуществляется через сайт Геологической службы США (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov>). В последние годы все большую популярность приобретает также облачная платформа Google Earth Engine (GEE), обеспечивающая не только доступ к данным, но и обработку их больших временных серий. Температура земной поверхности (Land Surface Temperature – LST) является одним из стандартных информационных продуктов MODIS.

В работе мы использовали ряды дневных данных MODIS/Terra (MOD11A1) и температурные продукты, полученные с использованием данных TIRS/Landsat-8, за период 2013-2022 гг. Данные MOD11A1 являются готовым продуктом. Результаты валидации продукта MOD11A1 приведены, например, в работах [10-13], где показано, что разница между спутниковыми и наземными данными составляет $\sim 0,8-1,9^\circ\text{C}$. В работе [14] представлены также результаты валидации продукта MOD11A1, которая проводилась на основе измерений, полученных с 09.06.2021 г. по 20.09.2021 г. в Новосибирской области на территории Предсалаирской равнины. Среднее значение сдвига составило $-1,2^\circ\text{C}$, а коэффициент детерминации $R^2 > 0,6$ в 75% случаев.

При расчете LST по данным Landsat не существует как единого общепринятого метода радиометрической и атмосферной коррекции снимков, так и единого алгоритма вычисления коэффициента излучения (эмиссии).

USGS в рамках создания научных продуктов (Science products) второго уровня в 2022 году начала выпуск оперативного температурного продукта L2SP. Для реализации процедуры атмосферной коррекции в данном случае используются данные реанализа NARR, а для выполнения расчетов радиационного переноса используется программа MODTRAN. Коэффициент эмиссии вычисляется на основе данных ASTER GED [15]. Коллекция этих данных также представлена в системе доступа и обработки спутниковых данных GEE (Google Earth Engine).

В последнее время начинают появляться публикации, связанные с валидацией этого продукта как для земных [16], так и для водных [3] объектов. В результате показано наличие систематической ошибки продукта.

В работе [17] S. Ermida и др. предложен алгоритм расчета LST в системе GEE для серии спутников Landsat, начиная с Landsat-4. В качестве модели радиационного переноса используется модель RTTOV (Radiative Transfer for the TIROS Operational Vertical Sounder) V. 12.0 [18]. Водные поверхности выделяются на основе битовых масок, а коэффициент эмиссии для таких объектов берется постоянным, равным 0.99. К недостаткам этого алгоритма можно отнести необходимость использования данных ASTER GED, покрытие территории России которыми является неполным. Для акватории озера Байкал это покрытие также содержит целый ряд пробелов.

В работе [19] нами предложена модификация алгоритма вычисления LST S. Ermida [17], не зависящая от покрытия территории России данными ASTER GED (алгоритм L2_mod). Валидация алгоритма L2_mod с использованием наземных данных показала, что в большинстве случаев он показывает наилучшую точность. Наземные данные были получены с использованием автоматизированных регистраторов температуры DS-1921 “Thermochron” за период 17.07.2022 - 27.10.2022 гг. на территории Чуйской котловины (Республика Алтай). Также отмечена высокая корреляция наземных и спутниковых данных ($R > 0.98$).

В 2023 году проводились судовые измерения ТПС на Новосибирском водохранилище для и показано, что разница измерений in situ и спутниковых данных в среднем колеблется в пределах 1°C .

Результаты и обсуждения

В результате экспериментального исследования были построены среднемесячные картограммы ТПС за июнь – декабрь 2013-2022 гг. по данным MOD11A1, L2SP и данным, рассчитанным с помощью алгоритма L2_mod. Примеры картограмм для данных MOD11A1 приведены на рис. 1 и рис. 2. На рис. 1 картограммы отражают динамику среднемесячных значений ТПС в единой температурной шкале, а на рис. 2 температурные шкалы разные, что позволяет увидеть особенности пространственного распределения ТПС акватории оз. Байкал. Количество обработанных снимков для данных MODIS и Landsat-8 приведено в табл. 1.

Для полученных распределений ТПС вычислены основные статистические показатели: среднее (Mean), стандартное отклонение (σ), средний сдвиг (MBE) и его стандартные отклонения (σMBE), коэффициенты корреляции Пирсона (R) для всех пар данных (табл. 2-4). В ноябре и декабре (до 20.12, когда начинается ледостав) качество и количество снимков Landsat-8 резко уменьшается (погодные условия, облачность), поэтому сравнительный анализ для данных Landsat-8 проведен с июня по октябрь.

Из табл. 2 видно, что средние значения температур, вычисленные на основе трех наборов данных, несмотря на различное пространственное разрешение, в 87% случаев отличаются менее, чем на градус, максимальное отличие приходится на июнь и октябрь, а минимальное на сентябрь. Это можно связать, напри-

мер, с особенностями реализации алгоритмов для подсчета ТПС по данным Landsat-8. Кроме этого, из табл. 2 видно, что на июнь и июль приходятся максимальные значения стандартных отклонений (~2-3°C), которые постепенно уменьшаются и к сентябрю составляют ~1 °C.

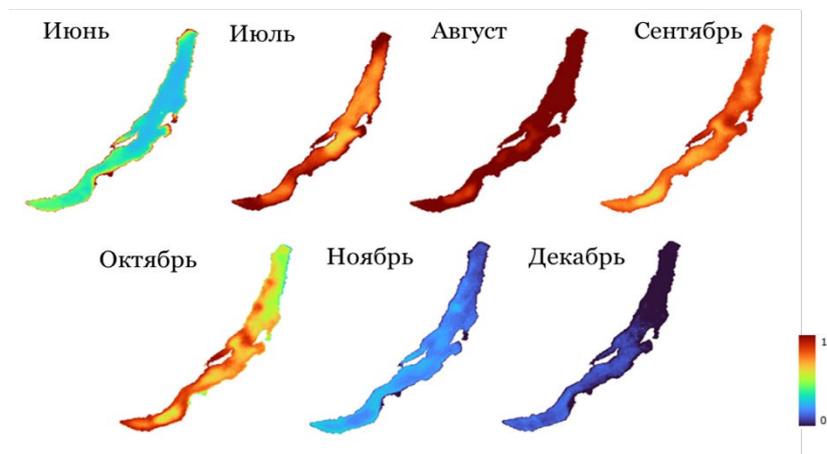


Рис. 1. Динамика среднемесячных значений ТПС для акватории оз. Байкал по данным MODIS/Terra

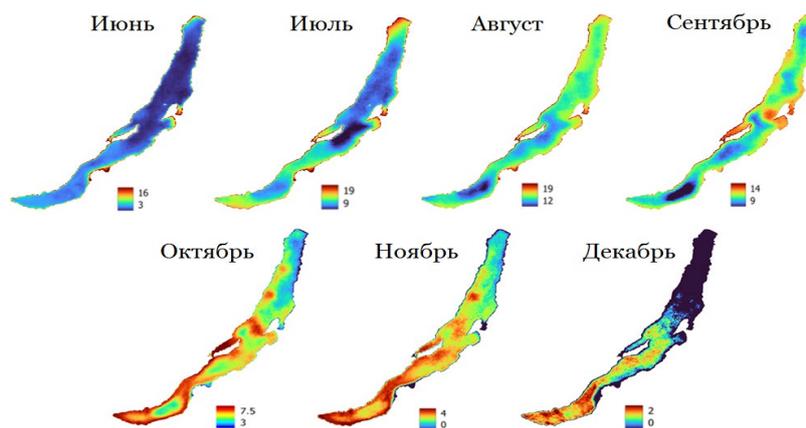


Рис. 2. Особенности распределения среднемесячных ТПС для акватории оз. Байкал по данным MODIS/Terra

Таблица 1

Количество обработанных снимков (2013-2022 гг.)

Тип данных	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Но- ябрь	Де- кабрь*
MODIS	300	310	310	300	298	285	180
Landsat-8	238	229	249	221	251	203	36

* Данные до 20.12.

Таблица 2

Среднемесячные значения ТПС (°C) и стандартные отклонения (Mean/ σ)

Данные	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
MOD11A1	5,54/3,04	12,26/2,56	14,91/1,4	11,14/1,13	5,56/1,06
L2_mod	5,97/1,95	12,4/2,03	15,08/1,12	10,91/0,98	4,28/1,07
L2SP	4,69/2,28	11,81/2,56	15,44/1,31	11,69/1,11	5,42/1,11

Таблица 3

Средний сдвиг между парами данных в градусах Цельсия и стандартные отклонения (МВЕ/ σ МВЕ)

Типы данных	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
MOD11A1 + L2_mod	-0,67/1,3	-0,32/1,45	-0,26/0,91	0,18/0,72	1,29/0,83
MOD11A1 + L2SP	0,59/1,3	0,26/1,49	-0,63/0,77	-0,6/0,64	0,15/0,74
L2_mod + L2SP	1,27/0,54	0,59/0,76	-0,36/0,39	-0,78/0,47	-1,13/0,56

Таблица 4

Коэффициент корреляции Пирсона между парами данных (R)

Пары данных	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
MOD11A1 + L2_mod	0,86	0,8	0,8	0,76	0,7
MOD11A1 + L2SP	0,85	0,82	0,81	0,82	0,75
L2_mod + L2SP	0,98	0,97	0,96	0,91	0,86

Средний сдвиг между слоями данных ТПС (табл. 3) не превышает по модулю 1,3°C и зависит от сезона. Также из табл. 3 видно, что значение стандартного отклонения σ МВЕ достигает максимума в июне и июле (~1.5°C).

Из табл. 4 видно, что коэффициенты корреляции данных Landsat-8 и MODIS, независимо от алгоритма вычисления ТПС достаточно высокие. В 70% случаев они превышают 0.8 и уменьшаются в октябре до 0.7 и 0.75. Это позволяет утверждать, что распределения ТПС акватории озера по данным Landsat и MODIS имеют схожий характер, несмотря на различное пространственное разрешение (100 м и 1000 м). Для наборов данных L2_mod и L2SP коэффициенты корреляции ожидаемо высокие, так как получены на основе одного и того же сырого потока данных Landsat-8.

Заключение

Таким образом, экспериментальное сравнение трех наборов данных разного пространственного разрешения показало, что их среднемесячные значения ТПС в бесснежный период отличаются в большинстве случаев менее, чем на один градус, максимальное различие приходится на июнь и октябрь, а наименьшее - на сентябрь, что может быть обусловлено выравниванием значений температуры

водной поверхности и температуры приземного слоя воздуха. Величина среднего сдвига между различными парами данных ТПС колеблется в пределах от 0.15 °С до 1.29 °С.

Анализ картограмм распределения температуры поверхностного слоя для акватории оз. Байкала подтверждает неравномерный характер ее распределения, максимальный прогрев поверхности озера наблюдается в августе, а также указывает на схожий характер распределения поверхностных температур в октябре и ноябре.

Полученные картограммы среднемесячных температур могут быть использованы соответствующими специалистами для мониторинга распределения температуры акватории оз. Байкал.

Благодарности

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»).

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. – pp. 1-9.
3. Dyba K., Ermida S., Ptak M., Piekarczyk J., Sojka M. Evaluation of Methods for Estimating Lake Surface Water Temperature Using Landsat 8 // Remote Sens. 2022. – Vol. 14 – P. 3839.
4. Guo L., Zheng H., Wu Y., Fan L., Wen M., Li J., Zhang F., Zhu L., Zhang B. An integrated dataset of daily lake surface water temperature over the Tibetan Plateau// Earth Syst. Sci. Data. 2022.– Vol. 14. – pp. 3411–3422.
5. 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.
6. 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.
7. Prats J., Reynaud N., Rebière D., Peroux T., Tormos T., Danis P.-A. LakeSST: Lake Skin Surface Temperature in French Inland Water Bodies for 1999–2016 from Landsat Archives // Earth Syst. Sci. Data. 2018. – Vol. 10. – pp. 727-743.
8. Simon R.N., Tormos T., Danis P.-A. Retrieving Water Surface Temperature from Archive LANDSAT Thermal Infrared Data: Application of the Mono-Channel Atmospheric Correction Algorithm over Two Freshwater Reservoirs // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2014. – Vol. 30. – pp. 247-250.
9. Zhao G., Gao H., Cai X. Estimating lake temperature profile and evaporation losses by leveraging MODIS LST data // Remote Sens. Environ. – 2020. – Vol. 251. – P. 112104.

10. Guo L.; Zheng H.; Wu Y.; Zhu L.; Wang J.; Ju J. Modelling Heat Balance of a Large Lake in Central Tibetan Plateau Incorporating Satellite Observations. // *Remote Sens.* 2023. – Vol. 15. – P. 3982.
11. Crosman, E. T. and Horel, J. D.: MODIS-derived surface temperature of the Great Salt Lake// *Remote Sens. Environ.* 2009. – Vol. 113. – pp. 73–81.
12. Hulley, G. C., Hook, S. J., and Schneider, P.: Optimized split window coefficients for deriving surface temperatures from inland water bodies, *Remote Sens. Environ.* 2011. – Vol. 115. – pp. 3758–3769.
13. Song K., Wang M., Du J., Yuan Y., Ma J., Wang M., Mu G. Spatiotemporal Variations of Lake Surface Temperature across the Tibetan Plateau Using MODIS LST Product // *Remote Sens.* 2016. – Vol. 8(10). – P.854.
14. Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С. Валидация температурных продуктов MODIS/(TERRA+AQUA) LST с использованием наземных данных // Материалы IX Международной научной конференции “Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли”. Красноярск. 2022. – С. 113-117.
15. Hulley G.C., Hook S.J., Abbott E., Malakar N., Islam T., Abrams M. The ASTER Global Emissivity Dataset (ASTER GED): mapping Earth’s emissivity at 100 m spatial scale // *Geophysical Research Letters.* 2015. – Vol. 42. – P. 7966-7976.
16. Galve J.M., Sánchez J.M., García-Santos V., González-Piqueras J., Calera A., Villodre J. Assessment of Land Surface Temperature Estimates from Landsat 8-TIRS in A High-Contrast Semiarid Agroecosystem. Algorithms Intercomparison // *Remote Sens.* 2022.– Vol. 14(8). – P. 1843.
17. Ermida S.L., Soares, P., Mantas V., Götsche F.-M., Trigo I.F. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series // *Remote Sens.* 2020 – Vol. 12. – P. 1471.
18. Saunders R., Hocking J., Turner E. . et al. An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12) // *Geosci. Model.Dev.* 2018. – Vol. 11. – pp. 2717–2737.
19. Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Ермаков Н.Б., Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С. Анализ многолетней динамики температурного режима Чуйской межгорной котловины (Республика Алтай) на основе данных Landsat // *Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023): Сб. тр. Всеросс. конф. с междунар. участием.* Новосибирск: ФИЦ ИВТ. 2023. – С. 294-304.

© Е. А. Мамаш, И. А. Пестунов, Р. К. Федоров, 2024