

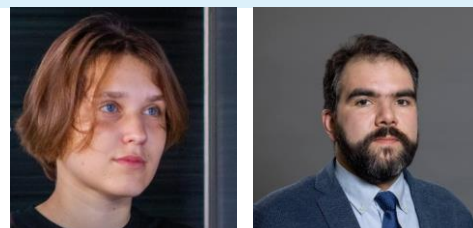
Дистанционный анализ температуры поверхности воды озера Плещеево

Е.Д. Лошкова^{1*}, В.М. Морейдо²

1 Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

2 Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

* lok2710@gmail.com



Ключевые слова дистанционное зондирование, ДЗЗ, Landsat 8/9, температура поверхности воды, LST, озеро Плещеево, Google Earth Engine

Аннотация В статье представлены описание и результаты проверки алгоритма LST для водного объекта, а также анализ температуры поверхности озера Плещеево на основе данных снимков Landsat 8/9 за период 2014–2024 гг. по полученным данным. Для расчета температуры подстилающей поверхности (LST) применен алгоритм, включающий расчет яркостной температуры и ее последующую коррекцию с использованием индекса NDVI для учета излучательной способности водной поверхности. Обработка данных выполнена в облачной платформе Google Earth Engine (GEE). Для валидации спутниковых данных использованы точечные натурные измерения температуры воды, предоставленные национальным парком «Плещеево озеро». Для сопоставления разновременных данных построена модель случайного леса деревьев решений, связывающая температуру воды с метеопараметрами (температура воздуха и точка росы). Результаты исследования демонстрируют эффективность использования данных Landsat 8/9 и платформы GEE для оперативного мониторинга температуры поверхности воды. Методология может быть применена для других внутренних водоемов.

1 Введение

Существует множество нетривиальных задач, для решения которых используются данные дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ). Одной из них является анализ температуры водных объектов, в данном случае – температуры поверхностного слоя воды озера Плещеево. Динамика этого параметра определяет ряд других процессов и показателей, таких как содержание хлорофилла, мутность, динамика испарения, изменение климата и т.д. [1].

Однако измерения температуры воды, полученные в ходе натурных наблюдений, обычно имеют точечный характер и не дают полной картины распределения, поэтому использование данных ДЗ помогает анализировать динамику температуры в масштабах всего водоема.

Вопрос такого анализа особо остро стоит для озера Плещеево, в котором с 2017 г. отмечаются вспышки массового цветения цианобактерии глеотрихии щетинистой (*Gloeotrichia echinulata*). Жизненный цикл вида, помимо прочих факторов, сильно зависит от температуры воды в водоеме [2]. При прогреве воды до 19 градусов и более глеотрихии выходят из состояния покоя и, оставаясь в донных отложениях, начинают извлекать из них соединения фосфора и железа, накапливая их в себе [3]. После этого глеотрихии поднимаются в верхние слои воды и там начинают вегетировать, что приводит к вторичному загрязнению экосистемы биогенными элементами. Основной экологической проблемой является то, что при увеличении своей численности *Gloeotrichia echinulata* может влиять на численность популяции других видов цианобактерий, а также продуцирует гепатотоксин микроцистин-LR (MC-LR) [4, 5].

Таким образом, анализ температуры воды в озере Плещеево может служить важным методом оценки текущего состояния водоёма и защиты от катастрофического цветения.

В основном дистанционный анализ температуры основывается на исследовании данных длинноволнового инфракрасного диапазона (8–15 мкм), или, как его ещё называют, Thermal Infrared Radiation. Каналы, которые в нём снимают, называются Thermal bands, TIRS Bands или Thermal Infrared bands [6].

В плане доступности снимков в таких каналах широко известны спутники Landsat, Sentinel и MODIS, но из-за сложности данных алгоритм, применяемый в данном исследовании, может быть использован только для обработки данных Landsat 8/9 [7].

При этом важно понимать, что по данным Landsat не существует единого алгоритма расчёта температуры, так как нет единого метода атмосферной коррекции снимков и единого алгоритма учёта излучательной способности земной поверхности (коэффициента эмиссии) [8].

2 Материалы и методы

2.1 Объект исследования

Озеро Плещеево – одно из самых крупных озёр средней полосы России, расположено на юге Ярославской области рядом с городом Переславль-Залесским (рис. 1). Самый крупный приток – река Трубеж, вытекающая из Берендеевского болота. Из самого озера вытекает одна река – Векса. Местность вокруг холмистая, за исключением низменного северо-западного берега.

Среднемноголетний уровень в озере Плещеево - 137,31 м. Длина озера – 9,55 км, наибольшая ширина – 6,5 км, наибольшая глубина - 24,5 м, объем воды – 541 млн. куб. м. Отлогое побережье представляет собой песчаную равнину, сложенную озерным аллювием.

Центральная часть озера глубоководная. Наибольшие глубины отмечаются в северо-западной части водоема¹.

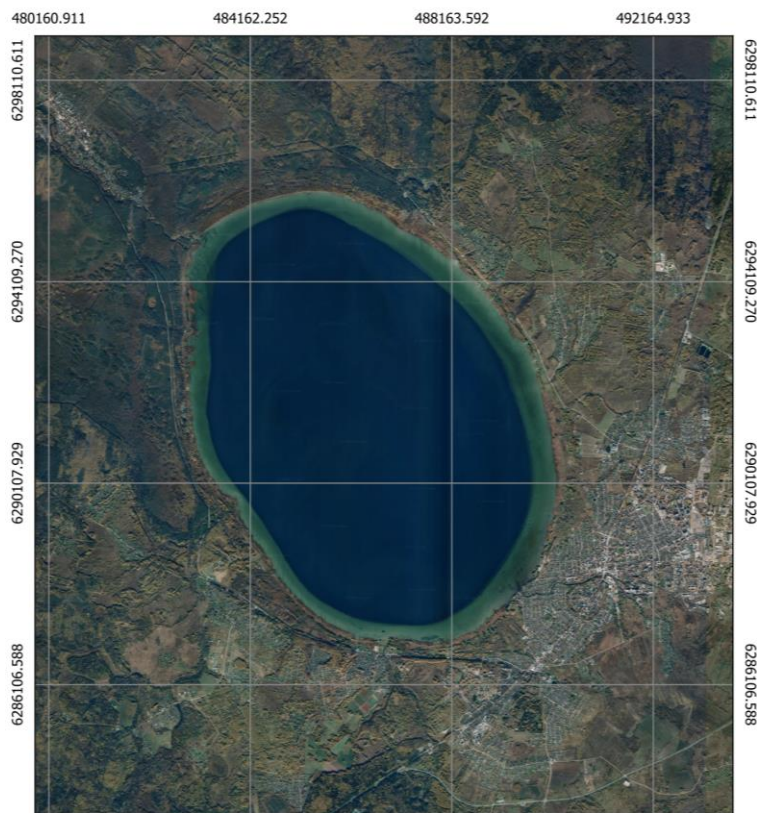


Рис. 1. Озеро Плещеево
(WGS 84/ UTM zone 37N).

Fig. 1. Lake Pleshcheyevo
(WGS 84/ UTM zone 37N).

Источник: составлено автором

2.2 Данные дистанционного зондирования

Данные ДЗ на территорию озера Плещеево в период с 2014 по 2024 гг. были получены из архивов данных спутников Landsat 8/9, доступ к которым можно получить через сайт Геологической службы США (USGS) [9]. Для расчёта температуры *подстилающей поверхности* (Land Surface Temperature – LST) использовались снимки в четвертом (RED, 0,64–0,67 мкм), пятом (NIR, 0,85–0,88 мкм) и десятом (TIRS, 10,60–11,19 мкм) каналах. Пространственное разрешение растровых данных: для 4 и 5 каналов – 30 м; для 10 канала – 100 м. [10]. Итоговое разрешение температурной карты: использованной для визуального осмотра – 100 м, использованной для получения статистических данных – 30 м. Для исследования использовались средние и медианные значения температуры водной поверхности.

2.3 Натурные данные температуры озера

В качестве натурных измерений использовались данные о температуре озера, полученные от национального парка «Плещеево озеро» (далее – национальный парк). Период измерений с 18.02.2014 по 15.10.2024, периодичность – раз в месяц с февраля

¹ Озеро Плещеево // Национальный парк «Плещеево озеро». – URL: <https://www.plesheevo-lake.ru/o-parke/ozero-pleshcheevo/> (дата обращения: 04.08.2025).

по октябрь (часто отсутствовали измерения в апреле), точка измерения располагалась в мелководной части озера.

В данной работе для анализа температуры озера Плещеево был использован алгоритм LST, описанный в статье научно-исследовательского института наук о Земле и космосе Анатолийского университета [7].

2.4 Алгоритм LST

1. Расчет спектральной энергетической яркости (the top atmospheric spectral radiance) в ваттах/(квадратный метр * стер * мкм):

$$L\lambda = ML \times Qcal + AL \quad (1)$$

где ML — мультипликативный коэффициент масштабирования для 10 канала;

$Qcal$ — значение пикселя 10 канала снимка;

AL — аддитивный коэффициент масштабирования для 10 канала.

2. Вычисление яркостной температуры (brightness temperature) в градусах Цельсия:

$$BT = \frac{K2}{\ln(K1/L\lambda + 1)} - 273.15 \quad (2)$$

где $K1$, $K2$ – константы термического преобразования для 10 канала.

3. Коррекция на излучательную способность:

Излучение, фиксируемое съёмочной аппаратурой, искажается в зависимости от состояния поверхности и атмосферы. Разные способы учёта этих факторов рожают множество способов вычисления коэффициента эмиссии – его можно считать постоянной величиной, можно использовать NDVI или иные методы классификации земной поверхности.

В данной работе для коррекции коэффициента эмиссии использовался NDVI.

3.1. Расчёт нормализованного индекса вегетации (NDVI):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (3)$$

где NIR и RED представляют собой отражательную способность ближнего инфракрасного и красного диапазонов соответственно.

3.2. Расчёт доли растительного покрова:

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVIS}{NDVIv - NDVIS} \right)^2 \quad (4)$$

где $NDVI_s = 0.2$ (значение NDVI для почвы)

$NDVI_v = 0.5$ (значение NDVI для растительности)

3.3. Расчёт излучательной способности земной поверхности ϵ :

ϵ – коэффициент эмиссии, это характеристика материала, которая показывает, насколько эффективно он излучает тепло по сравнению с абсолютно черным телом при той же температуре (закон Планка). В данном контексте коэффициент эмиссии влияет на точность измерения температуры поверхности. Коэффициент эмиссии (ϵ) рассчитывался путем выведения его из доли растительности (P_v) с использованием следующего эмпирического уравнения [11]:

$$E = 0.004 * P_v + 0.986 \quad (5)$$

4. Расчёт температуры подстилающей поверхности (LST):

$$LST = \frac{BT}{\left(1 + \left(\lambda * \frac{BT}{\rho}\right) \times \ln(\epsilon)\right)} \quad (6)$$

где BT – яркостная температура; λ — длина волны излученной радиации, среднее значение которой принято за 10,895 мкм; ρ – постоянная Больцмана, равная 14388 мК.

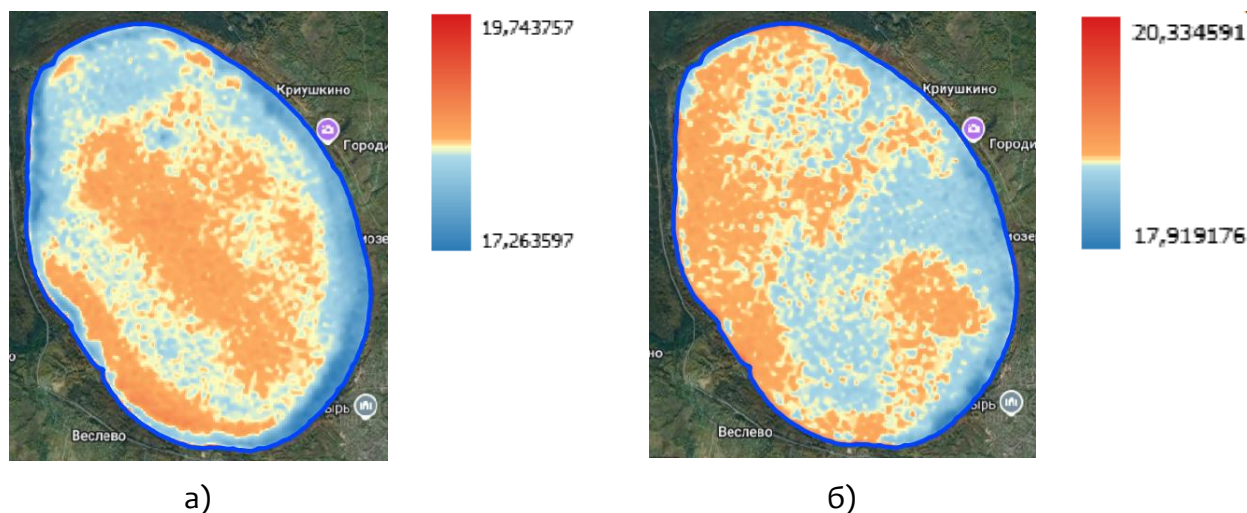


Рис. 2. – Результат работы алгоритма LST за: а) 16 августа 2024 г.; б) 17 сентября 2024 г.

Fig. 2. – The result of the LST algorithm for: а) 16th August 2024; б) 17th September 2024.

Источник: составлено автором

Чтобы провести анализ температуры озера в период с 2014 по 2024 гг., была использована облачная платформа Google Earth Engine (GEE).

В результате были получены данные о средней и медианной температуре поверхности озера в период с 12.07.2014 по 10.07.2025. Данные были отфильтрованы по облачности менее

31%, а также были удалены отрицательные результаты, вызванные большим попаданием процента облачности на территорию интереса. В итоге остались результаты с 44 снимков.

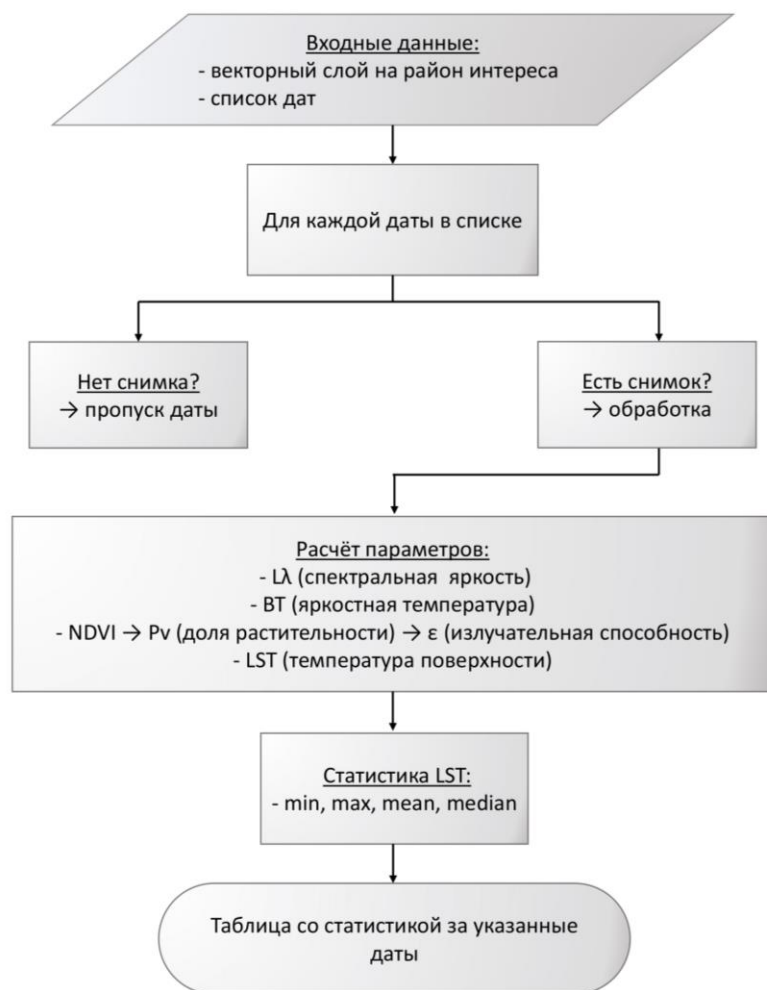


Рис. 3. – Схема работы кода в GEE

Fig. 3. – The code scheme in GEE

Источник: составлено автором

3 Проверка результатов

Так как дни натурных измерений не совпали с днями съёмки Landsat, чтобы восстановить температуру поверхности озера на даты полета была построена модель, основанная на линейной регрессии между температурой озера, полученной от национального парка, и температурой воздуха, а также температурой точки росы, полученными от метеостанции «Переславль» (время измерения 12 часов)².

² Архив погоды в Переславль-Залесском (Ярославская область, Россия) // Погода и климат. – 2025. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=27425> (дата обращения: 23.07.2024).

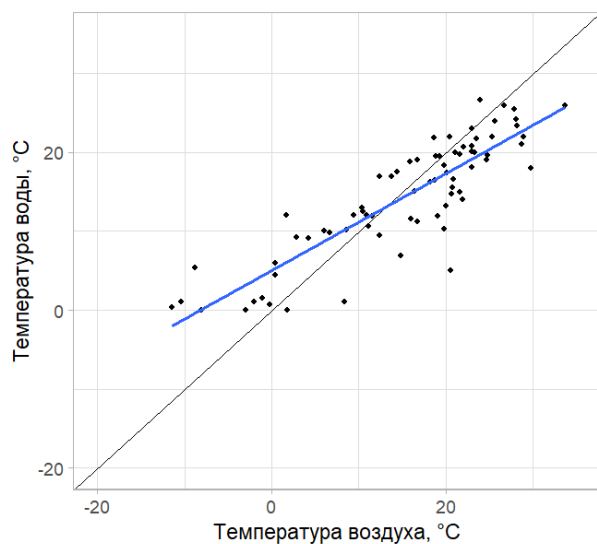


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности озера от температуры воздуха

Fig. 4. The dependence of lake surface temperature on air temperature

Источник: составлено автором

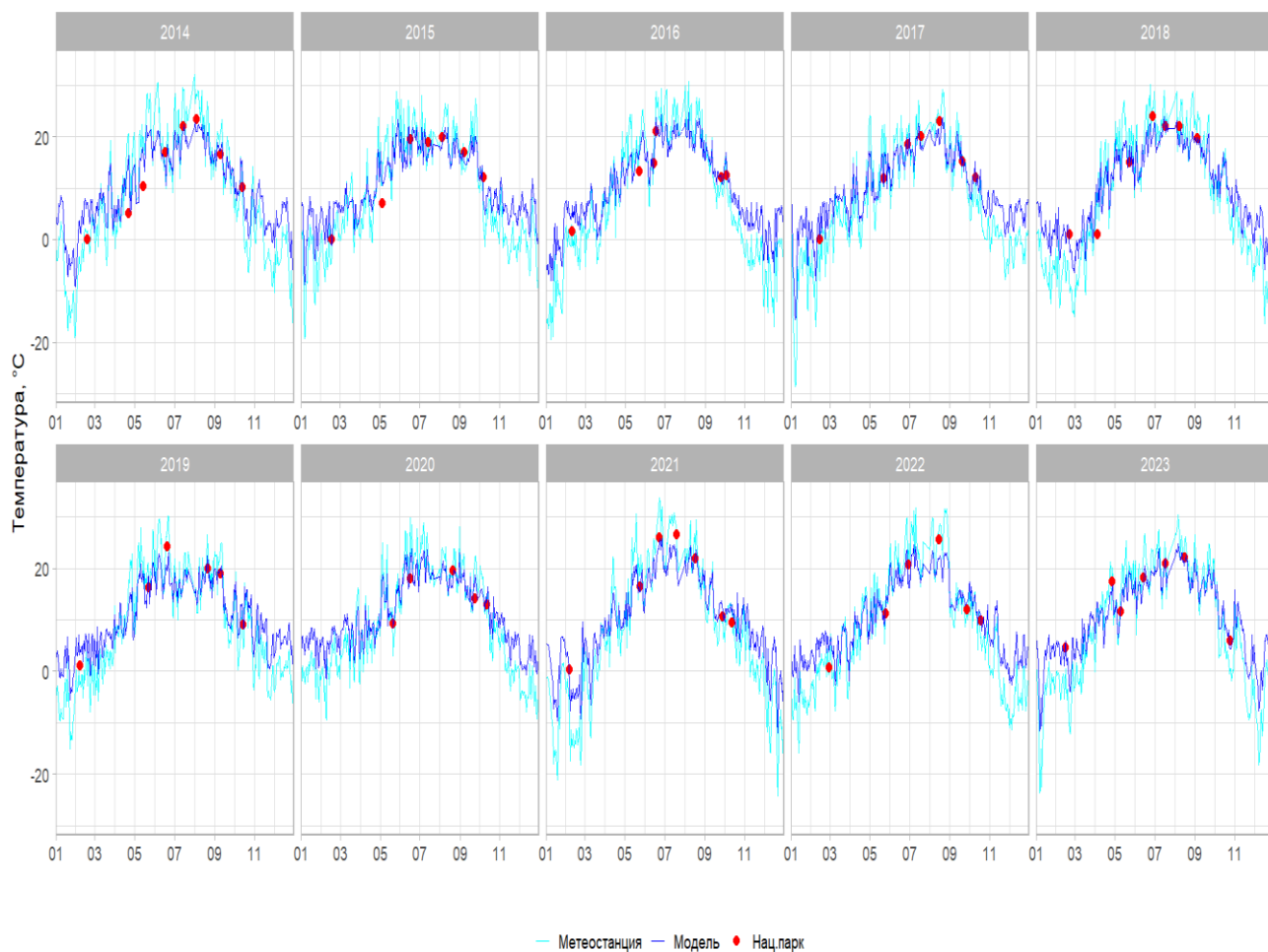


Рис. 5. Суточный ход температур воздуха и поверхности озера по данным измерений и моделирования.

Fig. 5. The daily course of air and lake surface temperatures according to measurements and modeling data.

При этом корреляция данных температуры поверхности озера, полученных от Национального парка, с температурой воздуха составила 0,871, а корреляция температуры

озера с температурой точки росы 0,835. Поэтому для улучшения точности модели была построена многомерная линейная регрессия, учитывающая и температуру воздуха, и температуру точки росы. Корреляция такой модели с температурой поверхности озера от национального парка составила 0,897. Средняя квадратичная ошибка (RMSE) модели = 3,30. Средняя абсолютная ошибка (MAE) модели = 2,51.

На каждую дату съемки Landsat было рассчитано медианное и среднее значение температуры воды на поверхности озера. Корреляция модели с медианной температурой составила 0,827, со средней – 0,84.

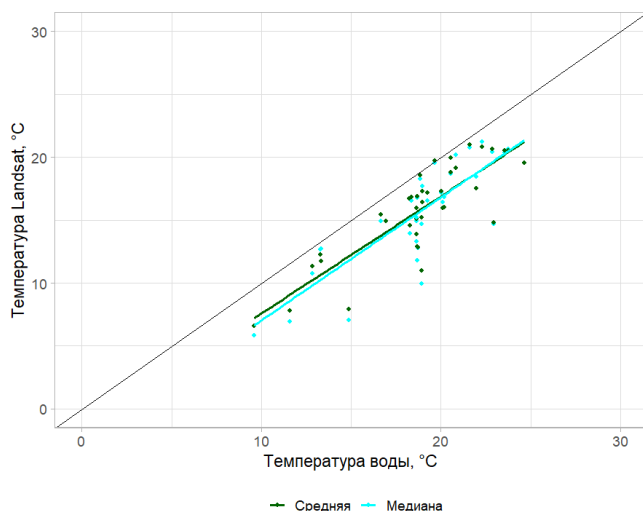


Рис. 6. Зависимость рассчитанных медианной и средней температуры поверхности озера со спутника Landsat от температуры поверхности озера модели.

Fig. 6. The dependence of the calculated median and average lake surface temperatures from the Landsat satellite on the lake surface temperature of the model.

Источник: составлено автором.

4 Заключение

Корреляция 0,84 между спутниковыми данными и моделью, основанной на натурных измерениях, подтвердила возможность использования данных Landsat 8/9 для мониторинга температуры водных объектов с учетом дополнительных корректировок.

Сравнение модели и рассчитанных данных показало, что средняя температура более приближена к реальной, чем медианная.

В результате анализа рассчитанных данных о температуре поверхности озера Плещеево стандартное отклонение составило 2,51 °C. Одна из причин разницы между измеренной температурой озера и LST в том, что мы сравниваем разные температуры (среднюю температуру поверхности воды и температуру на глубине 0,5 м под водой в определенной точке).

Из-за неравномерного распределения данных по годам (например, в 2014 году – 2 наблюдения, а в 2024 – 11) температуру, рассчитанную из данных Landsat, нельзя использовать для построения линии тренда. Но так как известна зависимость рассчитанных данных от натурных, то, построив линию тренда по значениям температуры, полученным от национального парка, можно сделать вывод, что среднегодовая температура озера увеличивается (рис. 7).



Рис. 7. Гистограмма зависимости измеренной национальным парком температуры озера от времени

Fig. 7. A histogram of the dependence of the lake temperature measured by the national park on time
Источник: составлено автором

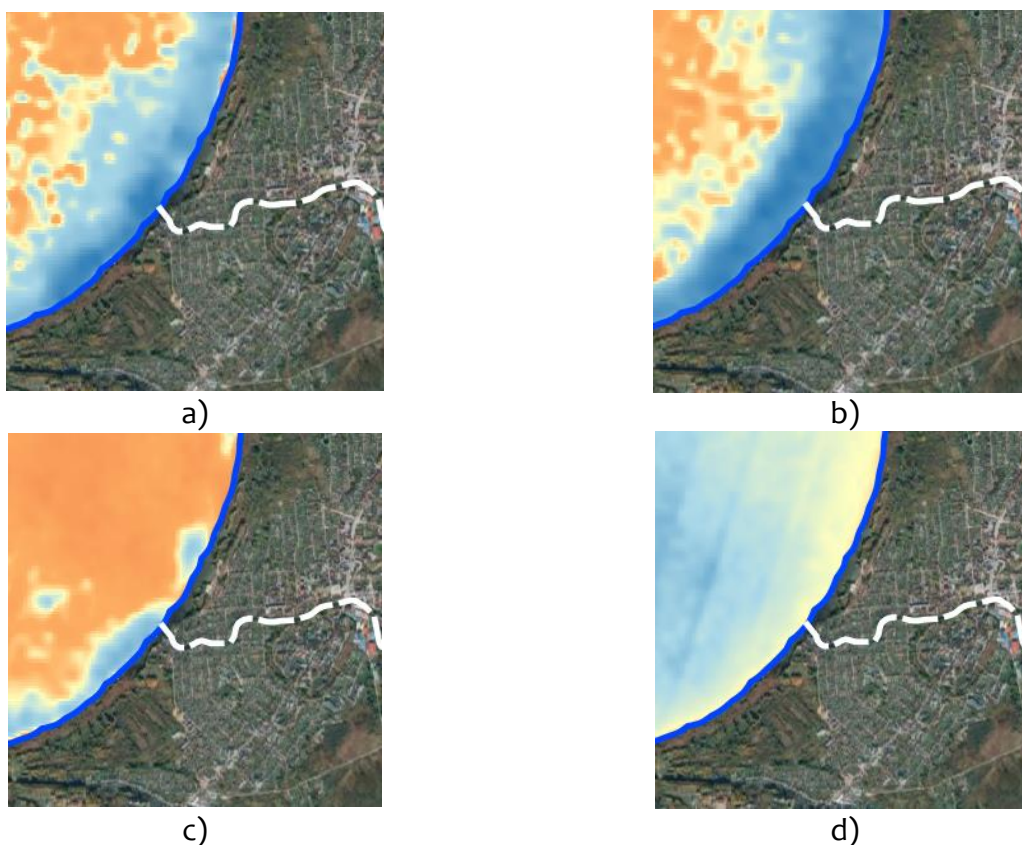


Рис. 8. Место впадения р. Трубеж в оз. Плещеево. Температурная карта за: а) 17 сентября 2024; б) 16 августа 2024; в) 7 июля 2024; г) 26 июня 2024.

Fig. 8. The place where the Trubezh River flows into the lake Pleshcheyevo.
Temperature map for: а) 17 september 2024; б) 16 august 2024; в) 7 july 2024; г) 26 june 2024.

Визуальный осмотр температурных карт позволяет сделать вывод, что приток реки Трубеж на формирование температурного режима озера или не влияет, или влияет незначительно (рис. 8). Основной прогрев озера происходит за счёт поглощения солнечной радиации.

Благодарности

Данное исследование и публикация его результатов были выполнены в рамках реализации исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» <https://rgo.ru/>.

Библиография

1. Е. А. Мамаш, И. А. Пестунов, Р. К. Федоров Оценка среднемесячных значений температуры поверхностного слоя акватории озера Байкал по спутниковым // Интерэкспо Гео-Сибирь. - 2024. - Т. 4, № 1. – 87 с.
2. Lakes Environmental Association. (2018). Lakes Environmental Association 2018 Water Testing Report. Chapter 3 - Gloeotrichia echinulata Monitoring. <https://mainelakes.org/wp-content/uploads/2019/02/2018-LEA-Water-Testing-Report-chapter-3.pdf>
3. Озеро с двойным дном // Наука и жизнь. – 2024. – URL: <https://www.nkj.ru/open/50922/> (дата обращения: 08.08.2025).
4. Carey C.C., Haney J.F. and Cottingham K.L. (2007). First report of microcystin-LR in the cyanobacterium Gloeotrichia echinulata. Environmental Toxicology, 22(3), 337–339. DOI: 10.1002/tox.20245;
5. Tekanova E., Sidelev S., Kalinkina N., Chernova E., Barinova S., Sharov A. and Smirnova V. (2024). Toxigenic Cyanobacteria and Microcystins in a Large Northern Oligotrophic Lake Onego, Russia. Toxins, 16(11). DOI: 10.3390/toxins16110457;
6. U.S. Geological Survey (USGS). What are the band designations for Landsat satellites? // Официальный сайт геологической службы США. – 2025. – URL: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites> (дата обращения: 20.07.2025).
7. Avdan U., Jovanovska G. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data // Journal of Sensors. – Том 2016. – Hindawi Publishing Corporation, 2016. – P. 8.
8. Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Анализ закономерностей в распределении температурных полей крупных промышленных городов Сибири по данным Landsat-8 // Вычислительные технологии. – 2022. – Том 27. – № 3. – С. 96.

9. U.S. Geological Survey (USGS). EarthExplorer // Официальный сайт геологической службы США. – 2025. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 17.07.2025).

10. Landsat Science. Landsat 8 // Официальный сайт программы Landsat. – 2025. – URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/> (дата обращения: 20.07.2025).

11. Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // *Remote Sensing of Environment*. — 2004. — Vol 90. — pp. 436.

Remote Analysis of Water Surface Temperature of Lake Pleshcheyevo

Ekaterina D. Loshkova^{1*}, Vsevolod M. Moreido²

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

² Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia

*lok2710@gmail.com

Key words remote sensing, Landsat 8/9, water surface temperature, LST, lake Pleshcheyevo, Google Earth Engine

Abstract The purpose of the study was to test the operation of the LST algorithm [4] on a water body, automate the algorithm and analyze the lake surface temperature based on the data obtained. Images from the Landsat 8/9 satellite for the period 2014-2024 were used. To calculate the temperature of the underlying surface (LST), an algorithm was applied that includes calculating the brightness temperature and its subsequent correction using the NDVI index to account for the emissivity of the water surface. The data is processed in the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. Point measurements of water temperature carried out by the Pleshcheyevo Lake National Park were used to verify the accuracy of satellite data. To compare data for different time periods, a random decision forest was built that relates water temperature to meteorological parameters (air temperature and dew point). The results of the study demonstrate the effectiveness of using Landsat 8/9 data and the GEE platform for operational monitoring of water surface temperature. The methodology can be applied to other inland bodies of water.

Acknowledgements

The study and the publication are carried out within the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage" with the financial support of the Russian Geo-Geographical Society, an All-Russian public organization <https://rgo.ru>.