

ПОСТРОЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КАРТ ГОРОДА НОВОСИБИРСКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКА LANDSAT 8

Елена Александровна Мамаш

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)334-91-77, e-mail: elenamamash@gmail.com

Игорь Алексеевич Пестунов

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)334-91-55, e-mail: pestunov@ict.sbras.ru

Дмитрий Леонидович Чубаров

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник, тел. (383)334-91-77, e-mail: dmitri.chubarov@gmail.com

Представлен алгоритм построения температурных карт подстилающей поверхности на основе многовременной серии атмосферно скорректированных спутниковых данных Landsat 8, реализованный в системе Google Earth Engine. Обсуждаются результаты построения с помощью этого алгоритма температурных карт города Новосибирска.

Ключевые слова: система Google Earth Engine, температура подстилающей поверхности, Landsat 8, температурные карты города Новосибирска

BUILDING OF TEMPERATURE MAPS OF NOVOSIBIRSK CITY BASED ON LANDSAT 8 DATA

Elena A. Mamash

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 6, Akademik Lavrentiev Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)334-91-77, e-mail: elenamamash@gmail.com

Igor A. Pestunov

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 6, Akademik Lavrentiev Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (383)334-91-55, e-mail: pestunov@ict.sbras.ru

Dmitrii L. Chubarov

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 6, Akademik Lavrentiev Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, phone: (383)334-91-77, e-mail: dmitri.chubarov@gmail.com

An algorithm for constructing temperature maps of the underlying surface based on a multi-time series of atmospheric corrected satellite data from Landsat 8, implemented in the Google Earth Engine system, is presented. The results of the construction of temperature maps of Novosibirsk using this algorithm are discussed.

Keywords: Google Earth Engine system, land surface temperature, Landsat 8, temperature maps of Novosibirsk

Введение

В последние годы все более актуальными становятся исследования в области дистанционного зондирования Земли (ДДЗ), связанные с анализом температурных режимов территорий и изменением климата. Изучение динамики процессов с использованием данных ДДЗ является достаточно сложной задачей, требующей использования специальных технологий и машинных ресурсов для обработки большого объема спутниковых данных. Среди самых известных систем, реализующих методы и технологии работы с распределенными архивами, в том числе в режиме онлайн, можно выделить системы Google Earth Engine (GEE) и ВЕГА-Science, разработанная в ИКИ РАН [1].

При решении различных прикладных задач, в том числе для исследования городских островов тепла, активно используются температурные данные LST (Land Surface Temperature), полученные со спутников. Многолетние исследования подтвердили сильную корреляцию температурных данных MODIS LST (спутники Terra/Aqua) и Landsat LST с наземными измерениями. Грищенко М.Ю., Варенцовым М.И. и др. изучались городские острова тепла Москвы, Нижнего Новгорода и крупнейших городов Заполярья [2-6]. Гостевой А.А., Матузко А.К., Якубайликом О.Э. опробована методика выявления изменений городской среды г. Красноярска на основе спутниковых данных Landsat LST [7]. В статье [8] проводится сравнение температурных данных, полученных на автоматических метеостанциях с данными спутника Landsat 8 на основе 10 снимков и 3-х метеостанций.

Следует отметить, что в упомянутых работах картирование выполнено на основе отдельных снимков, а детектирование изменений — на основе пар снимков. Недостатком этого подхода является чувствительность метода к выбору снимков.

В настоящей работе представлены результаты, полученные в результате реализации алгоритма построения температурных карт подстилающей поверхности на основе многовременной серии атмосферно скорректированных спутниковых данных Landsat 8 для территории г. Новосибирска. С целью валидации полученных результатов был разработан алгоритм извлечения временных серий спутниковых данных LST Landsat 8 в точке с заданными координатами, реализованный в системе GEE для различных методов подсчета коэффициента эмиссии.

Методы и материалы

В системе GEE спутниковые данные представлены по коллекциям, в том числе имеется коллекция атмосферно-скорректированных данных Landsat 8 [9]. Данные тепловых каналов Landsat 8 имеют разрешение 100 м. Однако в коллек-

ции GEE они представлены в пересчете на разрешение в 30 м, что очень удобно для изучения объектов внутригородских территорий.

Для подсчета температуры в данной работе использовался наиболее распространенный метод, описание которого можно найти, например, в [10, 11]:

$$T_{LST} = \frac{T_B}{\left(1 + \lambda \frac{T_B}{c_2}\right) \cdot \ln(\varepsilon)} - 273,15. \quad (1)$$

Здесь T_B – температура спектральной яркости (К), которая определяется интенсивностью излучения в спектральном канале спутника; λ – длина волны, для 10 канала Landsat 8 это значение равно $10,8 \mu\text{m}$; $c_2 = h \cdot c / s = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m K} = 14388 \mu\text{m K}$; $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ (постоянная Планка); $s = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ (константа Больцмана); $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (скорость света); ε – коэффициент эмиссии, вычислялся на основе NDVI [12].

Проводился сравнительный анализ результатов расчетов значений температуры, вычисленной по формуле (1) для коэффициента эмиссии, полученного на основе NDVI и равного 0.98. Разница значений варьировалась в пределах градуса, что говорит, в целом, о малой чувствительности результатов подсчета LST к данному параметру. Кроме того, при построении композитного изображения накладывались маски, исключаяющие облачность и тени от облаков.

Валидация спутниковых данных выполнялась двумя способами: 1) на основе данных пяти метеостанций, расположенных в черте города Новосибирска; 2) с использованием среднемесячных значений температуры Обского водохранилища.

Результаты

За период 2013-2019 гг. (сайт [13]) были извлечены архивные данные метеостанций: «Обская», «Огурцово», «Учебная», «Толмачево» и метеодатчика на правом берегу ($55^\circ 2.472' \text{ с.ш.}, 82^\circ 56.058' \text{ в.д.}$). Далее, на основе разработанного алгоритма для всех перечисленных метеостанций были получены наборы спутниковых измерений, в соответствующих точках. Количество спутниковых измерений за каждый месяц на разных метеостанциях различно, но в целом наблюдаются общие закономерности, а величина коэффициента корреляции наземных и спутниковых данных составляет более 0,9.

В результате построены графики, позволяющие сравнить и оценить близость наземных и спутниковых измерений. Пример такого графика для метеостанции «Огурцово» представлен на рис. 1.

Для всех метеостанций посчитана средняя разность температур, вычисленная по месяцам для спутниковых данных и данных метеостанций. Соответствующий график для метеостанции «Огурцово» приведен на рис. 2.

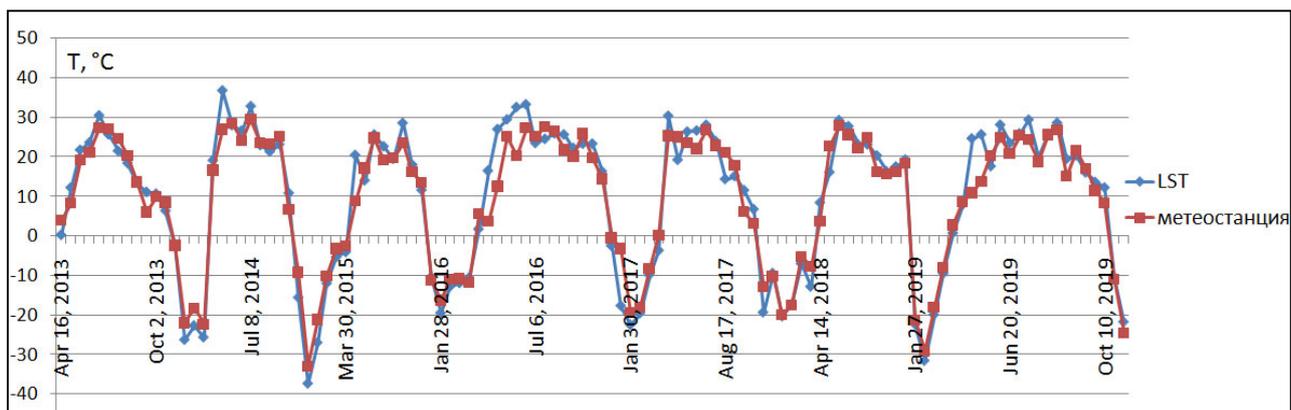


Рис. 1. Данные метеостанции «Огурцово» и спутниковые данные Landsat 8

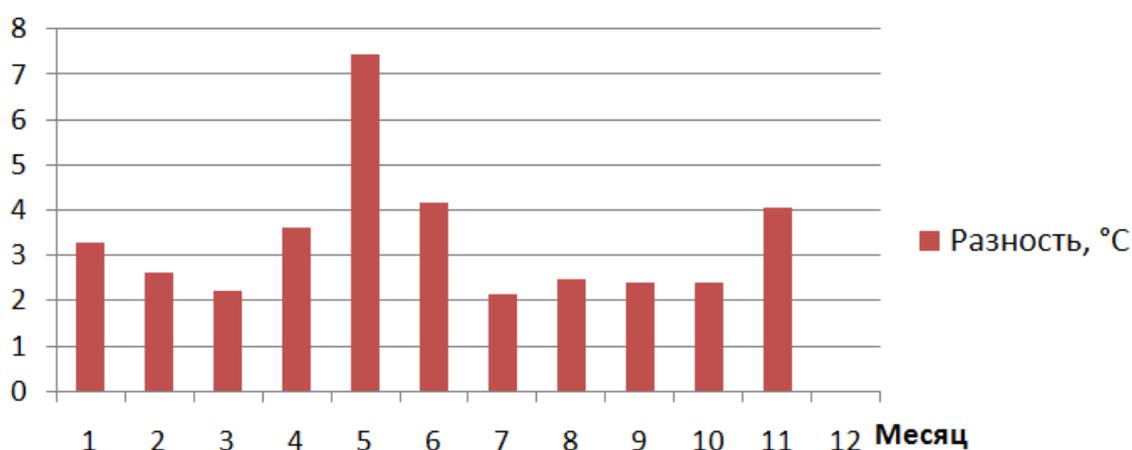


Рис. 2. Средняя разность температур, вычисленная по месяцам для спутниковых данных и метеостанции «Огурцово»

Следует отметить, что все графики средних разностей похожи тем, что демонстрируют наличие резко возрастающей ошибки в апреле-мае-июне, что может быть связано с тем, что спутник измеряет приземную температуру, а метеостанции – температуру воздуха на высоте 2 м от поверхности земли. Измерения проводятся в 12:00 – 12:30 местного времени, в эти часы температура воздуха меняется быстрее, чем приземная температура.

Показано, что графики распределения ошибок на метеостанциях «Огурцово», «Учебная» и метеостанции, расположенной на правом берегу, визуально похожи (коэффициенты корреляции равны 0,93; 0,83; 0,89 соответственно) и имеют меньшие значения ошибок по сравнению с другими двумя метеостанциями, где наличие значительных ошибок (до 9-11 градусов) можно объяснить влиянием антропогенного фактора (аэропорт Толмачево) и климатического (метеостанция «Обская» находится вблизи водохранилища). Кроме того, выполнено сравнение средних значений температур, полученных на метеостанциях и спут-

никовых данных по месяцам. Показано, что в 60% случаев, в основном в бес-
снежный период, среднемесячная температура, вычисленная на основе спутни-
ковых данных, превышает температурные данные метеостанций (рис. 3).

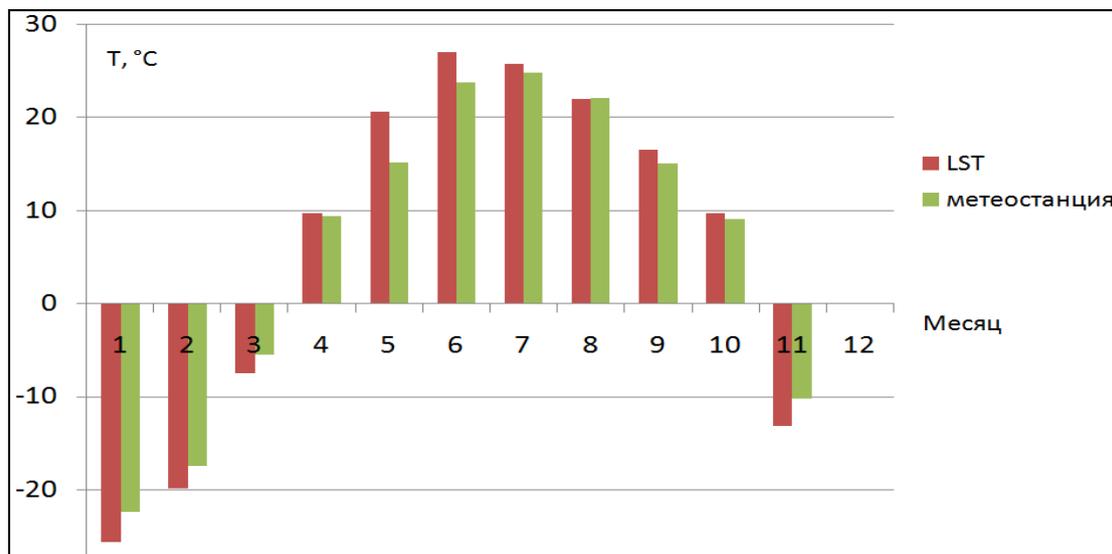


Рис. 3. Средние значения температур по месяцам: метеостанция «Огурцово» и спутниковые данные

Валидация спутниковых данных с использованием среднемесячных значений температуры Обского водохранилища проводилась на основе данных двух сайтов [14, 15] (таблица).

Наземные измерения

	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Сайт 1, [14]	13,5 °С	17,6 °С	20,3 °С	19,2 °С	12,9 °С	6,2 °С
Сайт 2, [15]	11,2 °С	15,4 °С	20,2 °С	17,9 °С	10,9 °С	7 °С

Средневзвешенное значение, вычисленное по данным сайта 1 составило 17,3 °С, по данным сайта 2 – 14,7 °С. В качестве весов выступало количество снимков, сделанных в каждом месяце за исследуемый временной интервал. Результаты наземных измерений сравнивались с данными Landsat 8 (2014-2020 гг.), всего было обработано 359 снимков. Максимальное количество снимков приходится на летние месяцы, в результате чего средняя многолетняя температура по результатам статистической обработки слоя в границах водохранилища составила 16,8 °С, что в целом согласуется с результатами, полученными по данным сайта 1 (разница составляет 0,5 °С), и несколько превышает (на 1,9 °С) данные сайта 2.

Обсуждение

Результаты валидации, описанные в предыдущем разделе позволяют сделать вывод о принципиальной применимости спутниковых данных в оценке температурного режима г. Новосибирска. Реализация в системе GEE алгоритма построения температуры подстилающей поверхности на основе данных Landsat 8 LST позволила построить серию композитных изображений температурного поля Новосибирска за снежный (ноябрь-март) и бесснежный (май-сентябрь) периоды 2014-2020 гг. исследовать многолетние закономерности распределения температур в городе Новосибирске и ближайших его окрестностях, определить области существования устойчивых температурных аномалий, или «островов тепла». Например, на композитном изображении за «холодный» период можно выделить следующие точечные объекты, соответствующие устойчивым тепловым аномалиям (рис. 4).

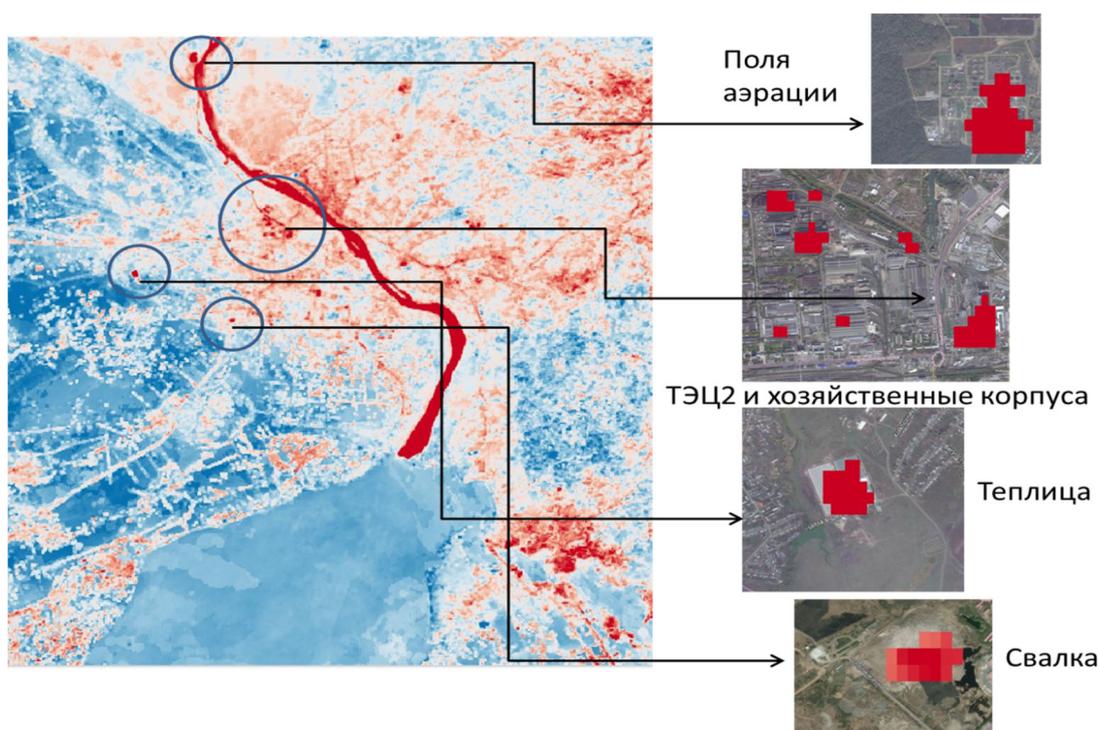


Рис. 4. Композитное изображение температурного поля г. Новосибирска и его окрестностей и примеры тепловых аномалий

Определение локализации таких аномальных областей в черте города и пригородных территориях является важной задачей в решении вопроса эффективного управления городскими территориями, позволяет, например, оценить характер и масштабы воздействия промышленной зоны на прилегающие городские территории.

Кроме того, анализ гистограммы средних значений температуры на территории г. Новосибирска в бесснежный период позволил выявить их связь с типом

подстилающей поверхности. Показано, что данные LST Landsat 8 могут служить дополнительным признаком при классификации городских территорий [16].

Заключение

Реализованный в системе GEE метод построения композитного изображения температурного поля подстилающей поверхности позволяет использовать максимальное количество спутниковой информации, включая снимки с большим процентом облачности. В результате, за достаточно короткое время, порядка нескольких секунд, в системе GEE можно выполнить обработку серии спутниковых снимков и получить композитное изображение, например, среднего значения температур за выбранный промежуток времени. Алгоритм был реализован для территории города Новосибирска с использованием данных LST Landsat 8, благодаря чему удалось выявить устойчивые тепловые аномалии и исследовать их зависимость от сезона года.

Также разработан алгоритм извлечения временных серий спутниковых данных LST Landsat 8 в точке с заданными координатами, алгоритм реализован для различных методов подсчета коэффициента эмиссии, проведены сравнение и оценка результатов. Разработанный алгоритм применен для извлечения серии многолетних данных в точках, соответствующих пяти метеостанциям г. Новосибирска, выполнена валидация спутниковых данных, получены оценки ошибок спутниковых измерений. Также показано, что эти данные могут служить дополнительным источником информации для мониторинга температурного режима водных объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Кашницкий А.В., Бурцев М.А. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9-27.
2. Baldina E.A., Grishchenko M.Y. Object oriented analysis of multi-temporal thermal infrared images // South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics. 2014. Vol. 3. № 2S. P. 415-418.
3. Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E., Repina I.A. Investigation of the urban heat island phenomenon during polar night based on experimental measurements and remote sensing of Norilsk city // Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2015. V.11. № 4. P. 329-337.
4. Грищенко М.Ю., Варенцов М.И., Михайлюкова П.Г. Анализ острова тепла Москвы с использованием космических снимков разного пространственного разрешения и результатов климатического моделирования // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VI Междунар. науч. конф. (Красноярск, 10-13 сентября 2019 г.). Красноярск: СФУ, 2019. С. 217-219.
5. Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H. Simultaneous assessment of the summer urban heat island in moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling // Geography, Environment, Sustainability. 2019.
6. Грищенко М.Ю., Ермилова Ю.В. Картографирование застройки крупнейших городов российского Заполярья по космическим снимкам разных спектральных диапазонов // Геодезия и картография. 2018. Т. 79. № 3. С. 23-34.

7. Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э Поиск изменений температуры городской среды по спутниковым данным на примере города Красноярска // Труды всероссийской конференции «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2019). 2019. С. 387-392.

8. Matuzko A.K., Yakubailik O.E. Monitoring of Land Surface Temperature in Krasnoyarsk and its Suburban Area Based on Landsat 8 Satellite Data // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2018. T.11 (8). P. 934-945.

9. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat>

10. Jimenez-Munoz J.C., Sobrino J.A., Skokovic D., Mattar C., Cristobal J., Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2014. V.11. P. 1840-1843.

11. Parastatidis D.; Mitraka Z.; Chrysoulakis N.; Abrams M. Online global land surface temperature estimation from Landsat // Remote Sens. 2017. V. 9. P. 1208.

12. Sekertekin A., Bonafoni S. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation // Remote Sens. 2020. V. 12 (2). P. 294.

13. <https://rp5.ru>

14. <https://travel.org.ua/water/obskoe-more-temperatura-vody>

15. <https://seatemperature.ru/current/russia/ob-novosibirsk-sea-temperature>

16. Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Чубаров Д.Л. Анализ пространственно-временного распределения температуры подстилающей поверхности на территории Новосибирска на основе данных космического аппарата Landsat-8 // Региональные проблемы дистанционного зондирования земли: Материалы VII Международной научной конференции (Красноярск, 29 сентября - 2 октября 2020 г.). 2020. С. 254-259.

© Е. А. Мамаш, И. А. Пестунов, Д. Л. Чубаров, 2021