МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА ПО МНОГОЛЕТНИМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

А.К. Матушко¹, О.Е. Якубайлик^{1,2}

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН., г. Красноярск

²Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Красноярск

Явление острова тепла в поле приземной температуры воздуха характерно любым городам и населенным пунктам; чем больше поселок или город, тем больше, как правило, разница температур внутри него и за его пределами. Интенсивность городских островов тепла весьма сильно зависит от особенностей рельефа. В условиях сложного рельефа на развитие острова тепла влияют различные локальные циркуляции. Исследование направлено на решение задач, связанных с определением температурных аномалий, которые возникают в течении года и определить системность их возникновения, используя многолетние спутниковые данные. Задача будет рассмотрена на примере горда Красноярска, по спутниковым снимкам Landsat-8 с 2013 по 2020 год.

Сформированные на основе многовременного анализа границы городских островов тепла содержат информацию о характеристиках объектов, влияющих на интенсивность их теплового излучения. Причины возникновения острова тепла разделяются на антропогенный или природный характер, так же наблюдается динамика изменения границ температурных аномалий в исследуемый период. Наблюдаются переменные и устойчивые острова тепла на территории города. Переменные острова тепла образовались в новых местах городской территории, где ранее не отмечались повышенные температуры земной поверхности, чаще всего это связано со строительством новых зданий (торговых центров, спортивных сооружений, жилых домов). Полученные данные могут быть использованы для территориального планирования, эколого-географических обследований, в том числе по оценке экологической обстановки.

Ключевые слова: тепловые космические снимки, Landsat, острова тепла, температура поверхности земли, климат городской среды.

ВВЕДЕНИЕ

Городской остров тепла – явление, которое характеризуется более высоким показателем температуры воздуха в городе по сравнению с окружающей его местностью, впервые открыт англичанином Люком Ховардом ещё в 1810-х гг., к исследованиям островов тепла в основном приступили в середине XX века [1]. К настоящему времени сделано много исследований этого явления, но в основном они опираются на данные от метеорологических станций. Изучение феномена городского острова тепла по данным дистанционного зондирования Земли стало изучаться научным сообществом более активно в последнее десятилетие.

Для понимания феномена были проведены исследования, которые, можно разделить на две широкие категории в зависимости от способов и высоты их проведения: воздушные (атмосферные) и наземные [2]. Атмосферные обычно измеряются датчиками на месте, установленными на стационарных метеорологических станциях. Из-за ограниченного количества станций атмосферного мониторинга измеряемые температуры воздуха обычно не обеспечивают достаточное количество пространственных деталей для планирования городского землепользования и исследований изменения климата. Наземные показатели температуры земной поверхности чаще всего

измеряется с помощью данных спутникового дистанционного зондирования, он может обеспечивать последовательные и повторяемые наблюдения за поверхностью Земли, что дает возможность изучать тепловую среду в городах в различных пространственных (от местных до глобальных масштабов) и временных (суточных, сезонных и межгодовых) масштабах.

Для анализа городских территорий наиболее эффективно рассматривать данные с пространственным разрешением до 100 метров. Космические банки данных содержат ежедневную съемку, но разрешение таких данных 1000 метров, более детальные данные имеют периодичность съемки 8-16 дней. Наиболее доступными являются данные Landsat-8, с пространственным разрешением тепловых карт 30 метров и периодичностью съемки один раз в 16 дней. Большинство публикаций посвящено летнему острову тепла, так как именно летом, в периоды экстремальной жары, наиболее сильно проявляются негативные социальные последствия этого явления, связанные с ухудшением метеорологической комфортности и усилением теплового стресса, повышенным энергопотреблением на кондиционирование зданий [3].

Для формирования многолетнего городского острова тепла собраны данные дистанционного зондирования Landsat-8 на территорию города Красноярска с 2013 года по 2020 год.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Взаимосвязь между использованием городских земель и качеством окружающей среды получила повышенное внимание, как при проведении исследований, так и в области планирования [4]. Эффект повышения температуры окружающей среды наблюдается в крупных городах, где температура воздуха в течение всего года на несколько градусов выше, чем за его границами. Наблюдение, что температура воздуха в городе выше, чем температура окружающей его местности было открыто в 1810 году Люком Ховардом, и получило название городской остров тепла.

Застроенные области выглядят как неравномерные искусственные ландшафты со строительными материалами, частично отличными от естественных поверхностей. Кроме того, антропогенные процессы выделяют избыточное тепло и загрязняют окружающую среду. Вместе они приводят к более высокой городской температуре по сравнению с относительно естественным окружением. Температура земной поверхности является также одним из индикаторов парникового эффекта и антропогенного влияния на природные ресурсы [5].

Работа направлена на исследование островов тепла города Красноярска. Красноярск – крупный промышленный центр с уникальными природными и климатическими особенностями, вызванными условиями рельефа и термической неоднородностью местности. Строительство Красноярской ГЭС привело к не замерзанию реки в черте города в холодный период года. Температура воздуха зимой достигает значений ниже -30°C , а в летний период поднимается выше 30°C , а температура воды остается около $5-7^{\circ}\text{C}$. Таким образом, взаимодействие двух эффектов тепловых аномалий в летний и в зимний период, негативно влияет на экологическую обстановку города [6].

Сеть наземных наблюдений недостаточная, так на территории крупного промышленного города протяженностью более 30 км вдоль реки Енисей расположено всего 7 государственных метеостанций, поэтому так важен поиск альтернативных методов получения информации, например, используя данные спутникового дистанционного зондирования с возможностью вычисления температуры земной поверхности.

Фонд материалов космической съемки в тепловом инфракрасном диапазоне накапливается с 1960-х гг. Собранный архив снимков позволяет анализировать изменения, произошедшие на Земле на протяжении уже более 60 лет [7]. Технологии получения информации дистанционными методами совершенствовались, увеличивалось качество пространственного и температурного разрешения. В феврале 2013 года состоялся запуск современного

спутника Landsat-8, данные представлены на онлайн-сервисе (<https://www.earthexplorer.usgs.gov>), который получает данные, используя два различных сенсора – Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). Сканер TIRS был создан в центре NASA Goddard Space Flight Center и предназначен для получения изображений в дальнем инфракрасном диапазоне (ИК). В фокальной плоскости TIRS установлены фотодатчики Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) на базе GaAs [8]. Сканер теплового диапазона TIRS ведет съемку в двух каналах 10,6-11,2 мкм (10 канал) и 11,5-12,5 мкм (11 канал) с пространственным разрешением 100 м, что позволяет анализировать по ним энергию самой земной поверхности, а не отражение солнечного света. По значениям тепловых каналов можно определить температуру земной поверхности. Поверхность земли из-за своей неоднородности имеет разную излучательную способность, которая определяется коэффициентом эмиссии. Метеорологические станции измеряют температуру воздуха в 2 метрах над землей, а используя спутниковые системы, вычисляется непосредственно температура поверхности. Теоретически точность оценки температуры около $0,5^{\circ}\text{C}$, однако, дымка в атмосфере занижает значения на несколько градусов ([www.wiki.gis-lab.info/w/Коррекция материалов Landsat](http://www.wiki.gis-lab.info/w/Коррекция_материалов_Landsat)). Работы по изучению температуры земной поверхности велись последние несколько лет и за это время было исследовано несколько вариантов расчёта температуры земной поверхности для данных Landsat-8, которые подробно описаны в других работах авторов [9]. Для всех вариантов расчета было использовано ПО QGIS.

Температура земной поверхности вычисляется по данным спутникового дистанционного зондирования, используя значения 10-го канала Landsat-8, прошедшие этап радиометрической и атмосферной коррекции. Вычисления выполнены в свободно распространяемом программном обеспечении QGIS 2.18.1 Для проведения атмосферной коррекции спутниковых данных и дальнейших вычислений используется плагин Semi-Automatic Classification Plugin (SACP) [10].

Материалы для моделирования острова тепла города Красноярска были собраны из банка космических снимков было отобрано 30 максимально безоблачных сцен Landsat-8 в бесснежный период с 2013 по 2020 год, и составлены по ним карты температуры земной поверхности:

18.06.2013,	07.07.2014,	17.07.2015,	14.05.2015,	08.06.2015,
01.07.2015,	23.04.2016,	07.10.2016,	05.09.2016,	10.06.2016,
07.08.2017,	2.07.2017,	29.06.2017,	20.06.2017,	28.05.2017,
23.06.2018,	02.07.2018,	09.07.2018,	25.07.2018,	10.08.2018,
19.08.2018,	20.09.2018,	07.09.2019,	23.04.2019,	29.08.2019,

23.09.2019, 09.10.2019, 20.06.2020, 15.08.2020, 20.05.2020. Городской остров тепла во многих работах характеризуется как негативное последствие развития крупных городов и промышленности [11]. Прогнозируется, что интенсивность и частота летних волн тепла в ближайшие годы возрастут, и это будет иметь негативные последствия для состояния окружающей среды и социально-экономической структуры в урбанизированных районах [12].

В ходе анализа карт температуры поверхности земли разработана схема методики для формирования границ разносезонных городских островов тепла. Методика работы состоит из следующих шагов:

1. Сбор данных.
2. Расчет температуры земной поверхности для каждой даты исследования.
3. Определить по растровым данным минимальное, максимальное и среднее значение температуры земной поверхности.
4. Исследуя гистограмму изображения, определить диапазон максимальных значений для каждого расчета температуры земной поверхности.
5. Провести преобразование растровых данных в векторные.
6. Удалить полигоны, где значения меньше, чем диапазон максимальных значений.
7. Произвести объединение оставшихся полигонов.
8. Удалить полигоны площадью менее 2,5 тыс. м².
9. Объединить результаты по временам года (лето, весна, осень).

Методика была реализована для каждой даты исследуемых снимков, все результаты были распределены по трем сезонам: лето, весна и осень. На рис. 1 весенний городской остров тепла, обозначен многоугольником со штриховкой с использованием подложки карты города OpenStreetMap (некоммерческий веб-картографический проект по созданию подробной свободной и бесплатной географической карты мира).

Рис. 1. Весеннее распределение максимальных температурных значений

Накопленный архив тепловых снимков позволяет анализировать динамику изменения острова тепла с 2013 года по 2020 год. Полученные результаты можно разделить на две группы устойчивые и переменные острова тепла. К группе устойчивых были отнесены те острова тепла, которые максимально сохранили свои контуры с 2013 по 2020 год. На рис. 2 приведены примеры устойчивых островов тепла, представлены фрагменты городской карты с островами тепла на подложке 2GIS, отмеченными многоугольниками, так данные за 2020 год обозначены зеленым цветом, а за 2013 год красно-коричневым. На рис. 2а, представлен фрагмент карты города в промышленной зоны, где не было никаких изменений в застройке и на этом месте остров тепла остался неизменным. Следующий фрагмент железнодорожных путей возле станции Путепровод, показан на рис. 3б, остался практически без изменений. На рис. 3с изображено здание торгово-развлекательного центра Планета, большую часть здания покрывает остров тепла, как в 2013, так и в 2020 году.

a

b

с

Рис. 2. Устойчивые острова тепла с 2013 по 2020 год

Переменные острова тепла образовались в новых местах городской территории, где ранее не отмечались повышенные температуры земной поверхности. На рис. 3 представлены фрагменты территории города Красноярск с использованием подложки Google Satellite, где зеленым цветом обозначены границы острова тепла сформированного летом 2020 года, большинство из них связано с антропогенным воздействием на городскую территорию. На рис. 3а остров тепла соответствует контуру спортивного сооружения, в 2018 году на месте полностью снесенного стадиона был построен крытый комплекс для проведения соревнований по хоккею с мячом на Зимней Универсиаде 2019 года. Рис. 3б отображает фрагмент карты города Красноярск, где полученный остров тепла совпадает с контуром гипермаркета, строительство которого было начато в 2014 году. На рис. 3с контур острова тепла совпадает с контуром строительного магазина, его эксплуатация началась в июне 2017 года.

а

б

с

Рис. 3. Переменные острова тепла с 2013 по 2020 год

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информацию о температуре земной поверхности от Landsat-8 необходимо вычислять дополнительно, так как до сих пор она не предоставляется напрямую в качестве стандартного продукта. Не смотря на эти усложняющие процессы получения данных о температуре земной поверхности была собрана обширная коллекция спутниковых снимков на территорию города Красноярск по данным Landsat-8. Архив насчитывает 30 сцен в бесснежный период с 2013 по 2020 год, по этим данным были составлены разносезонные острова тепла городской территории, а именно весенние, летние и осенние. Для определения границ островов тепла была применена авторская методика формирования границ разносезонных тепловых аномалий.

В ходе анализа были отмечены изменения, произошедшие в городских островах тепла, и выделены две группы устойчивые и переменные. К устойчивым были отнесены фрагменты тепловых карт, где не произошло значительных температурных изменений, чаще всего застройка в таких местах осталась постоянной. Местность, где были изменения в застройке, чаще всего это строительство новых объектов (магазинов, спортивных сооружений), была отмечена как переменный остров тепла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Clinton, N.; Gong, P. Modis detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls. *Remote Sens. Environ.* 2013, 134, 294–304.
2. Zhou D, Xiao J, Bonafoni S, Berger C, Deilami K, Zhou Y, Frolking S, Yao R, Qiao Z, Sobrino JA. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing*. 2019; 11(1):48. <https://doi.org/10.3390/rs11010048>
3. Еланский Н.Ф., Лаврова О.В., Мохов И.И., Ракин А.А. Структура острова тепла над городами России по наблюдениям с передвижной лаборатории // Доклады академии наук. 2012. Т. 443. No 3. С. 366–371.
4. Stone Jr., Rodgers M. O. Urban Form and Thermal Efficiency: How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island Effect, *APA Journal*. 67 (2001), 2, pp. 186-198
5. Асмус В.В., Дядюченко В.Н., Загребав В.А. и др. Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации, Тр. НИЦ «Планета». 2005, 1(46), 3-21.
6. Хлебопрос Р.Г., Тасейко О.В., Иванова Ю.Д., Михайлюта С.В. Красноярск. Экологические очерки//: Сибирский федеральный университет. Монография. 2012. 130 с.
7. Merlin O., Duchemin B., Hagolle O., Jacob F., Coudert B., Chehbouni G., Dedieu G., Garatuza J., Kerr Y., Disaggregation of MODIS surface temperature over an agricultural area using a time series of Formosat-2 images. *Rem. Sens. of Env.*, 2010, 114, 2500–12
8. Herbert J. Kramer Landsat-8 / LDCM (Landsat Data Continuity Mission) [Электронный ресурс] / Satellite Missions Database – 2002. – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org>
9. Matuzko A.K., Yakubailik O.E., Urban heat island effects over Krasnoyarsk obtained on the basis of Landsat 8 remote sensing data, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, Volume 211, Number 1, 012010
10. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation [Электронный ресурс] // From GIS to Remote Sensing – 2017 – 278 p. – Режим доступа: www.fromgis.org
11. Salamanca F., Martilli A., Tewari M., Chen F. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2011. V. 50(5). P. 1107–1128.
12. Гарицкая М. Ю., Байтелова А. И., Чекмарева О. В. Экологические особенности городской среды: учеб. пособие // М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования "Оренбург. гос. ун-т". - Оренбург: Университет, 2012. - 217 с.: ил. - Библиогр.: с. 215-216. - ISBN 978-5-4417-0091-7.

Матузко Александра Константиновна – младший научный сотрудник ИВМ СО РАН г. Красноярск, тел. (923)2847994, e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

Якубайлик Олег Эдуардович – к.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией космических систем и технологий, ФИЦ КНЦ СО РАН, тел. (391)2426432, e-mail: oleg@icm.krasn.ru

MODELING A URBAN HEAT ISLAND USING LONG TIME SERIES SATELLITE REMOTE SENSING DATA

A. K. Matuzko¹, O. E. Yakubailik^{1,2}

¹*Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk*

²*Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Krasnoyarsk*

The phenomenon of a heat island in the field of surface air temperature is characteristic of any cities and settlements; the larger the village or city, the greater, as a rule, the temperature difference inside and outside it. The intensity of urban heat islands is highly dependent on the features of the relief. In conditions of a difficult topography, the development of the heat island is influenced by various local circulations. The study is aimed at solving problems related to the determination of temperature anomalies that occur during the year and to determine the consistency of their occurrence, using long-term satellite data. The task will be considered on the example of Krasnoyarsk city, based on Landsat-8 satellite series from 2013 to 2020.

The boundaries of urban heat islands formed on the basis of multi-time analysis contain information on the characteristics of objects that affect the intensity of their thermal radiation. The reasons for the appearance of a heat island are divided into anthropogenic or natural ones, as well as the dynamics of changes in the boundaries of temperature anomalies in the period under study. There are variable and stable heat islands in the city. Variable heat islands formed in new places of the urban area, where previously there were no elevated temperatures of the earth's surface, most often this is associated with the construction of new buildings (shopping centers, sports facilities, residential buildings). The data obtained can be used for territorial planning, ecological and geographical surveys, including assessing the ecological situation.

Index terms: thermal space images, Landsat, heat islands, surface temperature, urban climate.

REFERENCES

1. Clinton, N.; Gong, P. Modis detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls. *Remote Sens. Environ.* 2013, 134, 294–304.
2. Zhou D, Xiao J, Bonafoni S, Berger C, Deilami K, Zhou Y, Frohling S, Yao R, Qiao Z, Sobrino JA. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing*. 2019; 11(1):48. <https://doi.org/10.3390/rs11010048>
3. Elansky N.F., Lavrova O.V., Mokhov I.I., Rakin A.A. The structure of the heat island over the cities of Russia according to observations from a mobile laboratory // *Reports of the Academy of Sciences*. 2012. Vol. 443. No. 3. P. 366–371 (in Russian)
4. Stone Jr., Rodgers M. O. Urban Form and Thermal Efficiency: How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island Effect, *APA Journal*. 67 (2001), 2, pp. 186–198
5. Asmus V.V., Dyadyuchenko V.N., Zagrebaev V.A. and other Terrestrial complex for receiving, processing, archiving and distribution of satellite information, *Tr. Research Center "Planet"*. 2005, 1 (46), 3–21 (in Russian)
6. Khlebopros R.G., Taseiko O.V., Ivanova Yu.D., Mikhailyuta S.V. Krasnoyarsk. Ecological essays //: Siberian Federal University. Monograph. 2012. 130 p. (in Russian)
7. Merlin O., Duchemin B., Hagolle O., Jacob F., Coudert B., Chehbouni G., Dedieu G., Garatuza J., Kerr Y., Disaggregation of MODIS surface temperature over an agricultural area using a time series of Formosat-2 images. *Rem. Sens. of Env.*, 2010, 114, 2500–12
8. Herbert J. Kramer Landsat-8 / LDCM (Landsat Data Continuity Mission) / Satellite Missions Database – 2002. – accessed: <https://directory.eoportal.org>
9. Matuzko A.K., Yakubailik O.E., Urban heat island effects over Krasnoyarsk obtained on the basis of Landsat 8 remote sensing data, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, Volume 211, Number 1, 012010
10. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation // *From GIS to Remote Sensing* – 2017 – 278 p. – accessed www.fromgists.blogspot.com.
11. Salamanca F., et al, A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2011. V. 50(5). P. 1107–1128.
12. Garitskaya M. Yu., Baytelova A. I., Chekmareva O. V. Ecological features of the urban environment: textbook. allowance // Ministry of Education and Science Ros. Federation, Feder. state budget. educated. institution of higher. prof. education "Orenburg. State University". - Orenburg: University, 2012. - 217 p. : ill. - Bibliography: p. 215–216. - ISBN 978-5-4417-0091-7 (in Russian).

Matuzko Alexandra Konstantinovna - assistant researcher, ICM SB RAS, Krasnoyarsk, tel. (923) 2847994, e-mail: akmatuzko@icm.krasn.ru

Yakubailik Oleg Eduardovich - candidate of physics and mathematics, associate professor, leading researcher, head of the laboratory of space systems and technologies, Federal Research Center of the KSC SB RAS, tel. (391) 2426432, e-mail: oleg@icm.krasn.ru