УДК 004.4, 912.4 DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-195-205

Гостева А.А.[1], Матузко А.К.[2], Якубайлик О.Э.[3]

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ИЗУЧЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В ГОРОДАХ (НА ПРИМЕРЕ г. КРАСНОЯРСКА, РОССИЯ)

АННОТАЦИЯ

Существует два способа получения данных о температуре поверхности земли. Прямой способ включает измерения, полученные непосредственно наземными методами, например, данные метеостанций, второй способ – дистанционный – включает данные спутникового дистанционного зондирования. Спутниковое дистанционное зондирование – единственное средство получения долговременных однородных рядов данных о температуре поверхности. В статье рассмотрены методы определения коэффициента излучения поверхности по данным спутникового дистанционного зондирования. Тепловое излучение является индикатором объектов, явлений и процессов, скрытых от непосредственного наблюдения.

Используя значения тепловых каналов, можно определить температуру поверхности земли. Поверхность земли из-за своей неоднородности имеет разную излучательную способность, которая определяется коэффициентом эмиссии. Самыми распространенными методами определения коэффициента эмиссии для спутникового снимка считаются: на основе нормализованного вегетационного индекса или применяя классификацию изображения. Температуру поверхности земли в нашем исследовании вычисляли в два шага, сначала для определения коэффициента эмиссии проводили классификацию изображения с выделением основных типов поверхности: почва, вода, растительность, строения. Далее, используя значения 10-го канала сканера TIRS спутника Landsat-8 и коэффициента эмиссии, вычисляли температуру поверхности земли в градусах Цельсия. Над спутниковыми данными проводилась радиометрическая и атмосферная коррекция. Было рассмотрено 10 безоблачных сцен с 2013 по 2016 г. По результатам исследования были выделены тепловые аномалии на территории г. Красноярска.

Проблема тепловых аномалий характерна для всех крупных городов мира. Спутниковые тепловые снимки являются весомым источником информации для анализа тепловых аномалий в пределах одной территории. Определение природы и границ тепловых аномалий поможет понять причины неблагоприятной экологической ситуации в исследуемом городе.

На территории г. Красноярска можно выделить два типа тепловых аномалий – природные и антропогенные. Выделены антропогенные объекты с интенсивным излучением тепла. В нашей работе такими объектами стали промышленные предприятия и торгово-развлекательные центры. Эти объекты состоят из плотных материалов с высокой теплоемкостью, таких как асфальт, бетон и железобетон, камень. Из таких материалов построена большая часть антропогенных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городской остров тепла, тепловые космические снимки, Landsat, тепловые аномалии, температура поверхности земли.

---

[1] Сибирский федеральный университет, ул. Киренского 26, корп. УЛК., 660074, Красноярск, Россия, *e-mail:* **AGosteva@sfu-kras.ru**

[2] Институт вычислительного моделирования СО РАН, Академгородок 50/44, 660036, Красноярск, Россия, *e-mail:* **akmatuzko@icm.krasn.ru**

[3] Институт вычислительного моделирования СО РАН, Академгородок 50/44, 660036, Красноярск, Россия, *e-mail:* **oleg@icm.krasn.ru.**

Anna A. Gosteva[1], Aleksandra K. Matuzko[2], Oleg E. Yakubailik[3]

REMOTE METHODS IN STUDYING THE TEMPERATURE OF THE EARTH'S SURFACE IN CITIES (ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF KRASNOYARSK, RUSSIA)

ABSTRACT

There are two methods for obtaining data about the Earth surface temperature. The direct method includes measurements obtained directly by ground-based methods, like weather station data, the another is a remote method, which includes satellite remote sensing data. The satellite remote sensing is the only instrument to obtain long-term homogenous series of data about the ground temperature. The paper reviews methods of determining the surface emission coefficient based on the satellite remote sensing data. Thermal emission is an attribute of objects, phenomena, and processes, which are hidden from direct observation.

The ground surface temperature can be defined by using the values of the thermal bands. Due to its heterogeneity, the ground surface has a different emissivity, which is determined by the emissivity coefficient. The most common methods for the determining the emissivity coefficient for a satellite image are based on a normalized vegetation index or on applying an image classification. In our study the calculation of the ground surface temperature is defined in two steps. At first, in order to determine the emissivity coefficient, the classification of the image is realized by with the identification of the main types of surface: soil, water, vegetation, and buildings. Then using the values of the 10th band of the TIRS scanner of the Landsat-8 satellite and the emissivity coefficient, the ground surface temperature in Celsius degrees was calculated. The radiometric and atmospheric corrections were applied to the satellite data. 10 cloudless scenes from 2013 to 2016 has been considered. Based on the results of the study thermal anomalies were identified in Krasnoyarsk city.

The problem of the thermal anomalies is typical for all major cities of the world. The satellite thermal images are a valuable source of the information for analyzing the thermal anomalies on a selected territory. The determination of nature and boundaries of the thermal anomalies will help to understand the causes of the unfavorable ecological situation in the considered city.

On the territory of Krasnoyarsk city, the two types of the thermal anomalies can be distinguished: natural and anthropogenic. The anthropogenic objects with intense thermal emission has been outlined (or defined). In our study, plant facilities and shopping malls are such objects. These objects consist of dense materials with high heat capacities, such as asphalt, concrete, and steel. Most of the anthropogenic objects are made of such materials.

KEYWORDS: urban heat island, thermal infrared imagery, Landsat, temperature anomalies, land surface temperature.

[1] Siberian Federal University, Kirenskogo str., 26, ULK building, 660074, Krasnoyarsk, Russia, *e-mail:* **AGosteva@sfu-kras.ru**

[2] Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM SB RAS), Akademgorodok 50/44, 660036, Krasnoyarsk, Russia, *e-mail:* **akmatuzko@icm.krasn.ru**

[3] Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM SB RAS), Akademgorodok 50/44, 660036, Krasnoyarsk, Russia, *e-mail:* **oleg@icm.krasn.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Существует два способа получения данных о температуре поверхности земли, прямой способ включает измерения, полученные непосредственно наземными методами, например, данные метеостанций, второй способ – дистанционный – включает данные спутникового дистанционного зондирования. Спутниковое дистанционное зондирование – единственное средство получения долговременных однородных рядов данных о температуре поверхности. В статье рассмотрены методы определения коэффициента излучения поверхности по данным спутникового дистанционного зондирования. Тепловое излучение является индикатором объектов, явлений и процессов, скрытых от непосредственного наблюдения.

Проблема тепловых аномалий характерна для всех крупных городов мира. Первые упоминания об изучении тепловых аномалий относятся к началу XIX в. В последние 20–30 лет стали применять данные спутникового дистанционного зондирования для изучения этого феномена.

Космические тепловые снимки являются весомым источником информации для анализа тепловых аномалий в пределах одной территории. Определение природы и границ тепловых аномалий поможет понять причины неблагоприятной экологической ситуации в Красноярске, где, помимо значительных промышленных выбросов, наблюдаются атмосферные процессы, приводящие к тому, что примеси задерживаются и концентрируются над городом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тепловые аномалии и территория исследования

Как при проведении исследований, так и в области планирования повышенное внимание уделяется взаимосвязи между использованием городских земель и качеством окружающей среды [Stone, Rodgers, 2001]. Климат города становится важнейшим предметом изучения, особенно важно понимать влияние, которое оказывают на него развивающиеся городские территории.

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 поверхности земли является также одним из индикаторов парникового эффекта и антропогенного влияния на природные ресурсы [Асмус и др., 2005].

Эффект повышения температуры окружающей среды наблюдается в крупных городах, где температура воздуха в течение всего года на несколько градусов выше, чем за его границами. Это явление – температура воздуха в городе выше, чем температура окружающей его местности, – было открыто в 1810 г. Люком Ховардом и получило название *городской остров тепла*.

Наша работа направлена на исследование температурных особенностей Красноярска. Красноярск – крупный промышленный центр с уникальными природными и климатическими особенностями, вызванными условиями рельефа и термической неоднородностью местности. Красноярск отнесен к зоне высокого потенциала загрязнения атмосферы. Котловинный характер местности, высокая повторяемость туманов и парение над Енисеем приводят к аккумуляции вредных примесей над основной территорией города.

Красноярск находится на стыке трех геоморфологических структур: Западно-Сибирской равнины, Средне-Сибирского плоскогорья и Алтае-Саянской горной страны. Город расположен на двух берегах вдоль р. Енисей, в котловине, образованной самыми север-

ными отрогами Восточного Саяна [https://ru.wikipedia.org/wiki Красноярск#Физико-географическая_характеристика]. Строительство Красноярской ГЭС привело к незамерзанию реки в черте города в холодный период года. Температура воздуха зимой достигает значений ниже –30 °С. На формирование тепловых аномалий в городе оказывает влияние большая разница температур между незамерзающим Енисеем и окружающим пространством. В летний период температура воздуха поднимается выше 30 °С, а температура воды остается около 5–7 °С. Таким образом, взаимодействие двух эффектов тепловых аномалий в летний и зимний периоды негативно влияет на экологическую обстановку города [Хлебопрос и др., 2012].

Сеть наземных наблюдений недостаточная, так, на территории крупного промышленного города протяженностью более 30 км вдоль р. Енисей расположено всего семь государственных метеостанций, поэтому так важен поиск альтернативных методов получения информации, например, с использованием данных спутникового дистанционного зондирования для вычисления температуры поверхности земли.

Данные дистанционного зондирования Земли

Фонд материалов космической съемки в тепловом инфракрасном диапазоне накапливается с 1960-х гг. Американская программа Landsat начала свое существование в 1972 г., с этого времени было запущено семь спутников. Собранный архив снимков позволяет анализировать изменения, произошедшие на Земле на протяжении уже более 40 лет. Технологии получения информации дистанционными методами совершенствовались в качестве пространственного и температурного разрешения. В феврале 2013 г. состоялся запуск современного спутника Landsat-8, 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 ИК. В фокальной плоскости TIRS установлены фотодатчики Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) на базе GaAs [https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-8-ldcm]. 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.

Определение температуры поверхности земли

По значениям тепловых каналов можно определить температуру поверхности земли. Поверхность земли из-за своей неоднородности имеет разную излучательную способность, которая определяется коэффициентом эмиссии. Метеорологические станции измеряют температуру воздуха в 2 м над землей, а с помощью спутниковых систем вычисляется непосредственно температура поверхности. Теоретически точность оценки температуры около 0,5 °С, однако дымка в атмосфере занижает значения на несколько градусов [www.wiki.gis-lab.info/w/Коррекция_материалов_Landsat]. Исходными данными для определения температуры служат значения интенсивности излучения, пришедшего на сенсор спутника и зарегистрированного соответствующим тепловым каналом. На основе значений этих тепловых каналов вычисляем значение температуры поверхности земли, используя формулу [Weng et al., 2004].

$$T = \frac{T_B}{1 + (\lambda \frac{T_B}{C_2}) \ln(e)} \qquad (1)$$

T_B – температура спектральной яркости излучения (K);
λ – длина волны света, λ = 10,8 μm для 10-го канала Landsat-8;
c_2 = h*c/s = 1,4388*10^{-2}m K = 14388 μm K;
e – коэффициент эмиссии.

В настоящее время есть два основных метода для определения коэффициента эмиссии по спутниковым данным. В первом методе пользователь применяет классификацию объектов на изображении, где каждому классу присваивается конкретное значение коэффициента излучения. Во втором методе коэффициент эмиссии определяется на основе индекса NDVI. Первый метод более простой в использовании, но его точность ограничена и находится в прямой зависимости от эффективности результатов классификации снимка.

Рассмотрим первый метод подробнее. Первым шагом является определение типа поверхности, вся территория разделяется на четыре класса: вода, открытая почва, растительность и строения. После классификации изображения каждому классу соответствует значение коэффициента эмиссии, которое представлено в табл. 1 (используемые значения являются ориентировочными [Congedo, 2017, p. 278], поскольку коэффициент излучения каждого материала должен быть получен из полевого обследования).

Таблица 1. Значение коэффициента эмиссии для разных видов поверхности земли
Table 1. The value of the emission for different types of the Earth's surface

Тип поверхности	Открытая почва	Трава/растительность	Строения	Вода
Значение e	0,928	0,982	0,942	0,98

Второй метод имеет более высокую точность и позволяет вычислять коэффициент излучения поверхности по каждому пикселю изображения [Ле Хунг Чинь, 2015, с. 59]. Рассмотрим второй метод определения коэффициента излучения на основе нормализованного вегетационного индекса.

Правильное определение температуры поверхности ограничивается точным знанием коэффициента эмиссии. Взаимосвязь между температурой поверхности земли и NDVI учитывает, что растительность и почвы являются основным поверхностным покрытием [Giannini, 2015, p. 85].

$$\varepsilon = a + b \cdot \ln(\mathrm{NDVI}), \tag{2}$$

где a = 1,0094 и b = 0,04, значения получены регрессионным анализом [Brivio et al., 2006].

Для определения NDVI используются красные области спектра и ближние инфракрасные области спектра:

$$NDVI = \frac{\rho_{NR} - \rho_{RED}}{\rho_{NR} + \rho_{RED}}, \tag{3}$$

где ρ_{NIR} – отражение в ближней инфракрасной области спектра и ρ_{RED} – отражение в красной области спектра.

В нашей работе для определения температуры поверхности будет применяться первый метод вычисления коэффициента эмиссии. Для его реализации потребуется провести атмосферную коррекцию и классификацию поверхности земли. Этот метод учитывает разнообразие городских территорий и требует меньше операций, чем второй метод.

Исходные данные

Материалами для исследования тепловых особенностей территории города Красноярска является 10 сцен Landsat-8. Отобрано 10 безоблачных сцен в бесснежный период с 2013 по 2016 г.: 07.10.2016, 05.09.2016, 10.06.2016, 23.04.2016, 17.07.2015, 01.07.2015, 08.06.2015, 14.05.2015, 07.07.2014, 18.06.2013.

Температура поверхности земли вычисляется по данным спутникового дистанционного зондирования, с использованием значений 10-го канала Landsat-8, прошедших 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) [Congedo, 2017, p. 278].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температура поверхности земли вычисляется по формуле 1. Полученные значения температуры переведены в градусы Цельсия, и на основе этих значений для каждой даты съемки составлена температурная карта поверхности земли, например, 10 июня 2016 г. (рис. 1).

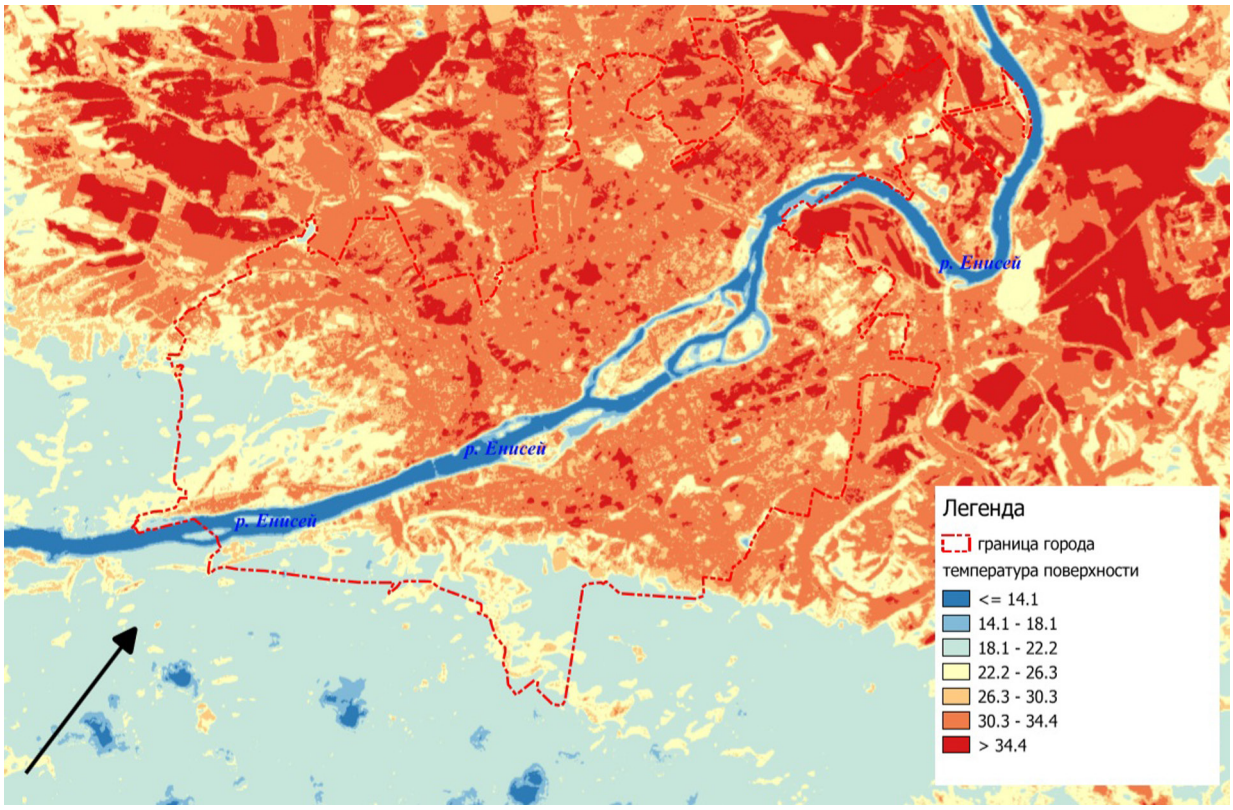

Рис. 1. Температура поверхности земли, г. Красноярск (10.06.2016)
Fig. 1. Surface Temperature of the Krasnoyarsk city (10.06.2016)

На рис. 1 видно, что температура реки значительно ниже, чем температура поверхности городских территорий, лесов и гор. Такая низкая температура воды обусловлена строительством гидроэлектростанции на р. Енисей, в 27 км от Красноярска, что оказало большое влияние на распределение сезонных температур в городе и его пригородах [Hrebtov, Hanjalić, 2017, p. 469].

Изменения теплового режима реки в результате строительства гидротехнических сооружений по сравнению с природными условиями влияют на работу не только самой гидроэлектростанции, но и объектов управления водными ресурсами, водного транспорта, а также качество воды и климат. Независимо от периода годового цикла характерные изменения температуры воды происходят ниже по течению. А именно, температура воды в Енисее в районе г. Красноярска летом на 8–10 °C ниже, чем до регуляции реки, и, наоборот, увеличивается на 4–5 °C в осенние месяцы, что создало определенные трудности в развитии прилегающей территории и оказало значительное влияние на климат Красноярска [Матузко, 2017, с. 272].

Для нахождения максимальных температурных значений в пределах города все снимки были распределены по трем сезонам: лето (10.06.2016, 17.07.2015, 01.07.2015, 08.06.2015, 07.07.2014, 18.06.2013), весна (23.04.2016, 14.05.2015) и осень (07.10.2016, 05.09.2016). Границы тепловых аномалий были сформированы для весенних, летних и осенних снимков, в данной работе будут описаны результаты обработки летних снимков, так как они составляют наиболее полный временной ряд, в отличие от единичных снимков за весенний и осенний сезоны. С целью оценки применения спутниковых снимков для определения температуры сравнивались значения температуры поверхности земли и температуры воздуха в трех точках города, где расположены автоматические метеостанции (АМС). Температура, представленная в таблице, зафиксирована на АМС в 12 часов дня, что максимально приближено ко времени пролета спутника Landsat-8 над г. Красноярском (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение значений, полученных по АМС и по спутниковым изображениям
Table 2. Comparison of data obtained on AWS and on the satellite image

Дата	По данным АМС в 12 часов, °С			На снимке, °С		
	Дудинская 4	Минусинская 14	Роев Ручей	Дудинская 4	Минусинская 14	Роев Ручей
10.06.16	25	23,4	26,1	33	25	28
17.07.15	24,6	23	26	34	24	29
01.07.15	30,4	28	30,9	34	29	29
08.06.15	24	22,6	24,9	30	25	27
07.07.14	29,1	27,3	30,3	32	27	31
18.06.13	29,9	27	21,1	33	34	21

Разница между значениями, полученными с АМС, и спутниковыми данными обусловлена тем, что на АМС измеряют значения температуры на высоте 2 м от поверхности земли, а в случае спутниковых данных вычисляется непосредственно температура поверхности земли.

Для каждого летнего снимка были сформированы тепловые аномалии. Далее, чтобы определить тепловые аномалии города, были найдены множественные пересечения аномалий по шести летним снимкам и сформирован полигональный слой аномалий.

Аномалии формировались из участков, где температура поверхности земли выше на 5–8°, чем средняя температура поверхности. При формировании границ тепловых аномалий аномалии размером до 100 × 100 м были удалены для устранения единичных артефактов при спутниковой съемке, например, небольшие строения с металлическими крышами могут создавать дополнительные тепловые аномалии. Полученные максимальные температурные значения представлены на рис. 2.

В полученной карте летних максимальных температурных значений на территории г. Красноярска можно выделить два типа тепловых аномалий – природные и антропогенные. Хорошо различимы аномалии на природных возвышенностях с южной и юго-западной экспозицией склона, например, в Железнодорожном районе г. Красноярска наибольшую температуру поверхности имеет Караульная гора с негустым покрытием склона растительностью.

Отдельно от природных стоит рассмотреть аномалии, которые возникают в результате антропогенного преобразования окружающей среды. Чаще всего они формируются возле торгово-развлекательных центров и в промышленных кварталах города. Рассмотрим некоторые из аномалий подробнее.

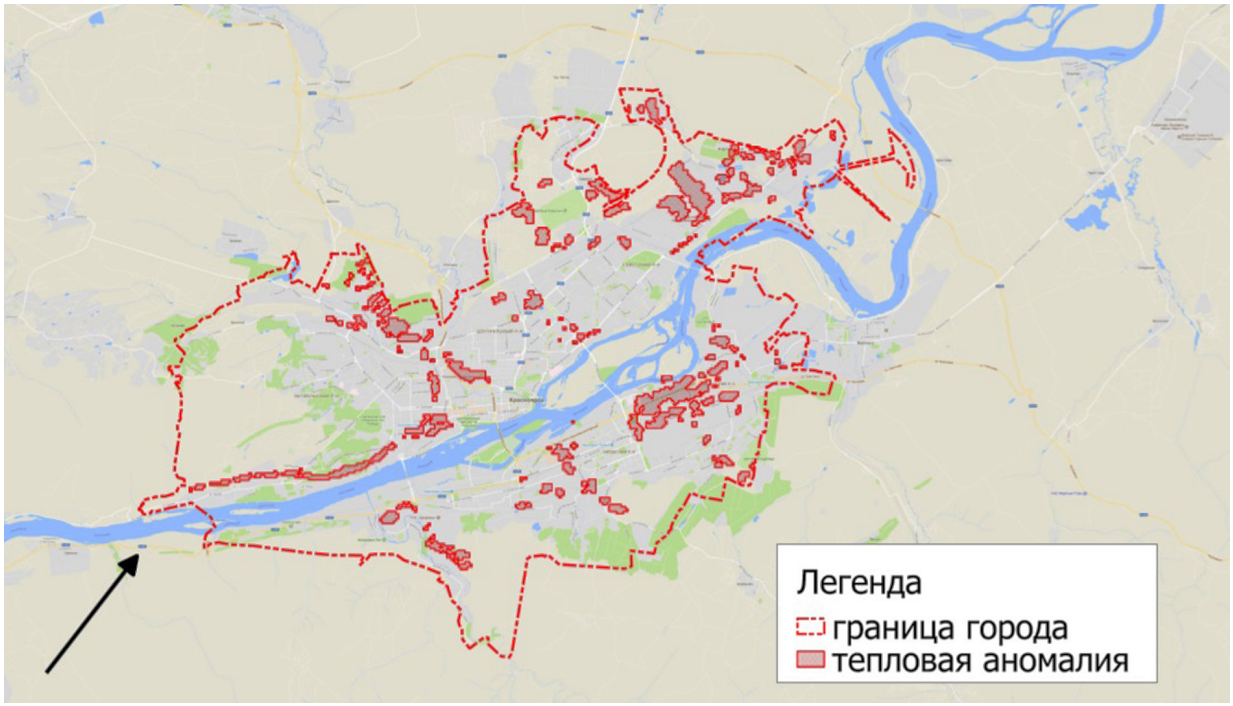

Рис. 2. Летнее распределение максимальных температурных значений
Fig. 2. Summer distribution of maximum temperature values

На рис. 3 показана территория возле Железнодорожного вокзала, где наблюдаются аномалии на железнодорожных путях и на территории неработающего Комбайнового завода.

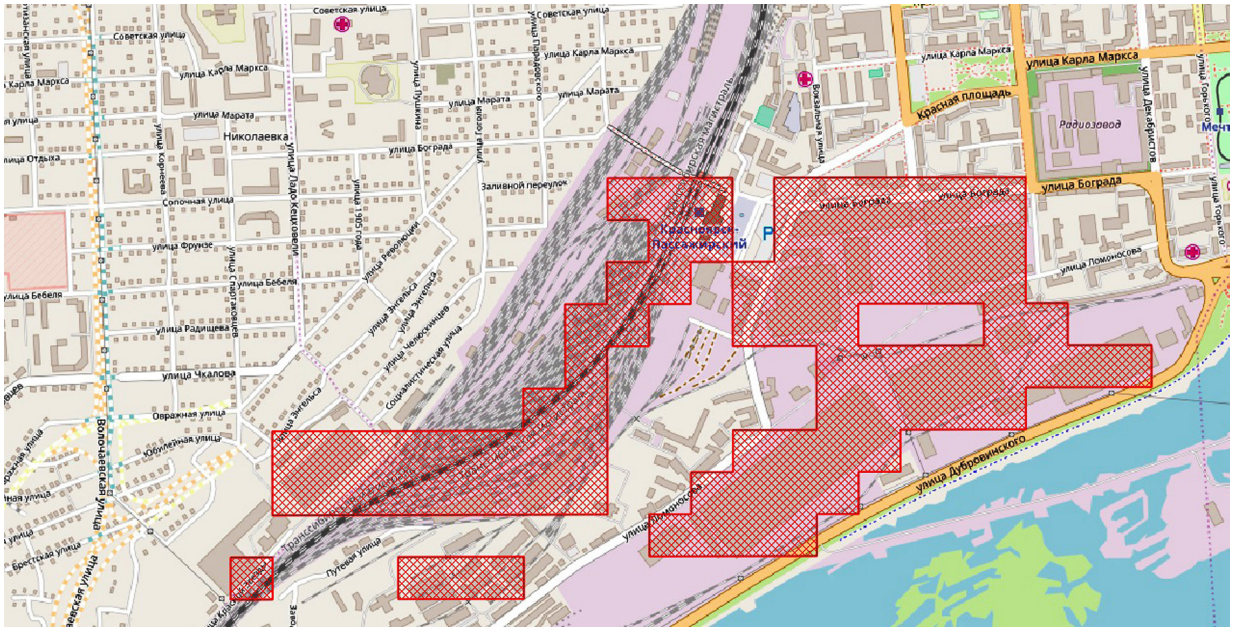

Рис. 3. Окрестности железнодорожного вокзала г. Красноярска
Fig. 3. Krasnoyarsk railway station and its surroundings

На рис. 4 изображены тепловые аномалии, наблюдаемые на правом берегу Енисея в г. Красноярске, они находятся там, где преобладает промышленная зона: Красноярский машиностроительный завод, ТЭЦ-1, Сибирский завод тяжелого машиностроения.

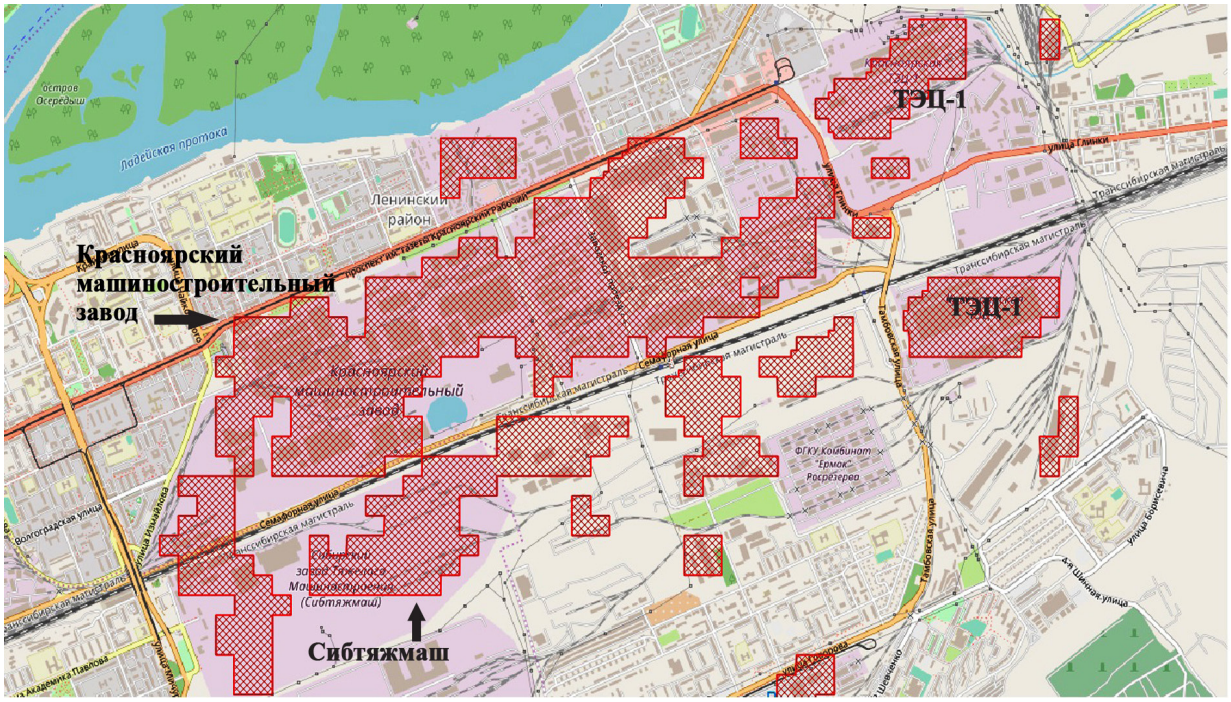

Рис. 4. Промышленная зона, правый берег Енисея, г. Красноярск
Fig. 4. Industrial zone on the right bank of Yenisei River

В Советском районе города, расположенном на левом берегу, максимальные температуры преобладают в промышленной зоне города, а также в местах скопления торгово-развлекательных центров. На рис. 5 отмечены тепловые аномалии, которые соответствуют торгово-развлекательным центрам: ТРЦ «Планета», Гипермаркет «Лента», ТРЦ «Июнь», Автосалоны (Тойота центр Красноярск, Порше центр Красноярск, Ауди центр Красноярск, Форд центр Красноярск), ТЦ «Авиатор», ТК «Командор».

Рис. 5. Советский район г. Красноярска
Fig. 5. Sovetsky district of the Krasnoyarsk city

Описанные тепловые аномалии указывают на тепловое загрязнение города, которое можно определить по данным спутникового дистанционного зондирования. Поэтому важно правильно выбрать методику для определения температуры поверхности земли, на основе которой выявляются тепловые аномалии. В работе описаны две методики определения коэффициента эмиссии, необходимого для вычисления температуры поверхности земли. Определение коэффициента эмиссии проводилось с использованием классификации изображения по типам поверхности земли.

Карты тепловых аномалий информативно составлять на территории с большим количеством объектов с интенсивным излучением тепла. В нашей работе такими объектами стали промышленные предприятия и торгово-развлекательные центры. Эти объекты состоят из плотных материалов с высокой теплоемкостью, таких как асфальт, бетон и железобетон, камень. Из таких материалов построена большая часть антропогенных объектов (жилые дома, производственные помещения, торгово-развлекательные центры), которые образуют тепловые аномалии. Чем больше площадь поверхности таких объектов, тем интенсивнее будет излучение и, следовательно, больше влияние на окружающую среду.

ВЫВОДЫ

В работе был произведен расчет температуры поверхности земли для 10 безоблачных сцен Landsat-8 с 2013 по 2016 г. Расчет производился в два шага, для определения коэффициента эмиссии выбран метод с определением типа поверхности пользователем при классификации изображения. На втором шаге вычислялась температура поверхности земли с использованием значений температуры спектральной яркости излучения и коэффициента эмиссии. Анализ полученных значений температуры поверхности земли позволил сформировать границы тепловых аномалий. Для дальнейшего анализа территории города были сформированы летние тепловые аномалии. Летние тепловые снимки отличаются наибольшей информативностью: по ним выявляются промышленные объекты, жилые кварталы, лесные массивы, водные объекты, участки открытого грунта.

При анализе снимков были найдены тепловые аномалии на территории промышленных зон, ландшафтных возвышенностей и аномалии, соответствующие расположению и форме торгово-развлекательных центров. Особый интерес в г. Красноярске, на левом и правом берегах Енисея, представляют промышленные зоны вследствие своей обширной площади. Сформированные тепловые аномалии являются ценным материалом для дальнейших эколого-географических исследований территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Асмус В.В., Дядюченко В.Н., Загребаев В.А. и др.* Наземный комплекс приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации // Тр. НИЦ «Планета». 2005. Вып. 1 (46). С. 3–21.
2. *Ле Хунг Чинь, Терехин Э.А., Зань Туен Ву.* Дистанционные методы в изучении коэффициента излучения поверхности по данным многозональной съемки LANDSAT (на примере района Бак Бинь провинции Бинь Тхуан, Вьетнам) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 6. С. 59–68.
3. *Матузко А.К.* Определение температуры поверхности воды по данным дистанционного зондирования Земли // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы IV Междунар. науч. конф. Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. 2017. С. 271–274.

4. *Хлебопрос Р.Г., Тасейко О.В., Иванова Ю.Д., Михайлюта С.В.* Красноярск. Экологические очерки. Сибирский федеральный университет. 2012. 130 с.
5. *Giannini M.B., Belfiore O.R., Parente C., Santamaria R.* Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images: comparison of different methods using airborne thermal data // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2015. V. 8, No 3. P. 83–90.
6. *Brivio P.A., Lechi G., Zilioli E.* Principi e metodi di telerilevamento, CittàStudi Edizioni. Torino, 2006. P. 449, 479.
7. *Congedo L.* Semi-Automatic Classification Plugin Documentation // Электронный ресурс: www.fromgistors.blogspot.com. 2017. 278 p.
8. *Hrebtov M., Hanjalić K.* Numerical study of winter diurnal convection over the city of Krasnoyarsk: Effects of non-freezing river, undulating fog and steam devils // Boundary Layer Meteorology. 2017. V. 163, issue 3. P. 469–495.
9. *Stone Jr., Rodgers M.O.* Urban Form and Thermal Efficiency: How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island Effect // APA Journal. 2001. V. 67, No 2. P. 186–198.
10. *Weng Q., Lu D., Schubrin J.* Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies // Remote Sensing of Environment, Elsevier Science Inc. 2004. V. 89. P. 467–483.

REFERENCES

1. *Asmus V.V., Dyadychenko V.N., Zagrebaev V.A. et al.* Surface complex for receiving, processing, archiving and distribution of satellite data. SIC "Planeta" works. 2005. V. 1(46). P. 3–21 (in Russian).
2. *Brivio P.A., Lechi G., Zilioli E.* Principi e metodi di telerilevamento, CittàStudi Edizioni. Torino, 2006. P. 449, 479.
3. *Congedo L.* Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. web resource: www.fromgistors.blogspot.com. 2017. 278 p.
4. *Hrebtov M., Hanjalić K.* Numerical study of winter diurnal convection over the city of Krasnoyarsk: Effects of non-freezing river, undulating fog and steam devils. Boundary Layer Meteorology. 2017. V. 163, issue 3. P. 469–495.
5. *Khlebopros R.G., Taseiko O.V., Ivanova Yu.D., Mykhaylyut S.V.* Krasnoyarsk. Ecological essays. Siberian Federal University, 2012. 130 p. (in Russian).
6. *Le Hung Trinh, Terekhin E.A., Danh Tuyen Vu.* Application of remote sensing in determining land surface emissivity using LANDSAT multispectral imagery (case study: Bac Binh district, Binh Thuan province, Vietnam). Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2015. V. 12, No 6. P. 59–68 (in Russian).
7. *Matuzko A.K.* Determining water surface temperature by Earth remote sensing data. Regional problems of Earth remote sensing, Materials of IV International Scientific Conference, SFU ISIT. 2017. P. 271–274 (in Russian).
8. *Giannini M.B., Belfiore O.R., Parente C., Santamaria R.* Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images: comparison of different methods using airborne thermal data. Journal of Engineering Science and Technology Review. 2015. V. 8, No 3. P. 83–90.
9. *Stone Jr., Rodgers M.O.* Urban Form and Thermal Efficiency: How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island Effect. APA Journal. 2001. V. 67, No 2. P. 186–198.
10. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment, Elsevier Science Inc. 2004. V. 89. P. 467–483.