

А.А. Гостева¹, А.К. Матушко², О.Э. Якубайлик³

ВЫЯВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА (НА ПРИМЕРЕ КРАСНОЯРСКА)

АННОТАЦИЯ

Большой город в современном мире оказывает сильное влияние на формирование климата; на отдельных улицах создаются специфические микроклиматические условия, определяемые городской застройкой, покрытием улиц, распределением зелёных зон. Город, особенно с сильно развитой промышленностью, загрязняет атмосферу над собой, увеличивает её мутность и тем самым уменьшает приток солнечной радиации. Снижение солнечной радиации дополнительно усиливается высокой застройкой в узких улицах. Вследствие той же пелены дыма и пыли на территории города снижено эффективное излучение, а значит, и ночное выхолаживание. В то же время в городе к рассеянной радиации присоединяется радиация, отражённая стенами и мостовыми.

Важной особенностью территории города является изменение микроклимата городской среды. Такие изменения часто возникают в результате изменений городской застройки, искусственного изменения рельефа, вырубки лесных насаждений. Вследствие изменений городской среды происходит изменение микроклимата города, что влечёт за собой непосредственное изменение температуры поверхности земли.

Изменение городской среды можно выявлять, используя космические снимки различного пространственного разрешения в видимом и дальнем инфракрасном диапазоне. Для изучения этих изменений наиболее доступными, полными и открытыми в настоящее время являются данные Landsat. Метод визуального анализа, проводимый по видимым спектральным каналам, затрудняет оценку изменений, особенно на больших территориях. Тепловая съёмка широко применяется для исследования и мониторинга антропогенных объектов, таких как трубопроводы, объекты городского хозяйства, промышленные объекты и загрязнения. Важно, что тепловые снимки содержат информацию, которую практически невозможно получить каким-либо иным способом, например, с помощью снимков в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Для улучшения пространственного разрешения Landsat 8 применяется синтез этого изображения со снимками более высокого пространственного разрешения Planet Scope, что позволяет увеличить пространственное разрешение карт температуры поверхности земли Landsat 8 с 30 до 3 метров.

Вследствие активной застройки территории города происходит изменение микроклимата, что влечёт за собой непосредственное изменение температуры поверхности земли. В работе представлены результаты оценки температуры поверхности земли в городе Красноярске за двухлетний период с сентября 2016 года по сентябрь 2018 года на основе анализа спутниковых снимков Landsat 8 и Planet Scope.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловые космические снимки, Landsat, Planet Scope, температура поверхности земли, климат городской среды

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. Gosteva¹, Aleksandra K. Matuzko², Oleg E. Yakubailik³

**IDENTIFICATION OF CHANGES IN URBAN ENVIRONMENT
ON THE BASIS OF THE SATELLITE DATA OF THE INFRARED RANGE
(ON THE EXAMPLE OF KRASNOYARSK)**

ABSTRACT

A big city in the modern world has a strong influence on climate formation; specific microclimatic conditions are created on certain streets, determined by urban development, street coverage, distribution of green areas. The city, especially with a highly developed industry, pollutes the atmosphere above itself, increases its turbidity and thereby reduces the influx of solar radiation. The decrease in solar radiation is further enhanced by high buildings in narrow streets. Due to the same shroud of smoke and dust in the city, reduced effective radiation, and hence night cooling. At the same time, radiation reflected by walls and pavements joins the scattered radiation in the city.

An important feature of the city is the change in the microclimate of the urban environment. Such changes often occur as a result of changes in urban development, artificial relief changes, and the cutting down of forest plantations. Due to changes in the urban environment, there is a change in the microclimate of the city, which entails a direct change in the temperature of the earth's surface.

Changes in the urban environment can be detected using space images of different spatial resolution in the visible and far infrared range. To study these changes, Landsat data is currently the most accessible, complete, and open. The method of visual analysis conducted on visible spectral channels makes it difficult to assess changes, especially in large areas. Thermal imaging is widely used for research and monitoring of man-made objects such as pipelines, urban facilities, industrial facilities and pollution. It is important that thermal images contain information that is almost impossible to obtain in any other way, for example, using images in the visible and near infrared range. In order to improve spatial resolution, Landsat 8 uses the synthesis of this image with images of a higher spatial resolution Planet Scope, which allows increasing the spatial resolution of Landsat 8 surface temperature maps from 30 to 3 meters.

Due to the active development of the city, there is a change in the microclimate of the city, which entails a direct change in the temperature of the earth's surface. The paper presents the results of the assessment of the temperature of the earth's surface in the city of Krasnoyarsk for a two-year period from September 2016 to September 2018 based on the analysis of Landsat 8 and Planet Scope satellite images.

KEYWORDS: thermal infrared imagery, Landsat, Planet Scope, land surface temperature, climate of the urban environment

ВВЕДЕНИЕ

Большой город в современном мире оказывает сильное влияние на формирование климата; на отдельных улицах создаются своеобразные микроклиматические условия, определяемые городской застройкой, покрытием улиц, распределением зелёных зон. Город, особенно с сильно развитой промышленностью, загрязняет атмосферу над собой,

¹ Siberian Federal University, Kirenskogo St. 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

увеличивает её мутность и тем самым уменьшает приток солнечной радиации. Снижение солнечной радиации ещё усиливается высокой застройкой в узких улицах. Вследствие той же пелены дыма и пыли на территории города снижено эффективное излучение, а значит, и ночное выхолаживание. В то же время в городе к рассеянной радиации присоединяется радиация, отражённая стенами и мостовыми.

Микроклимат территории в условиях естественного ландшафта формируется под влиянием местных природных факторов: рельефа, близости к водоёмам, характера подстилающей поверхности. Большое влияние оказывают антропогенные факторы, такие как городская застройка, искусственные потоки тепла, загрязнение воздуха, покрытие асфальтом растительного покрова и естественных почв.

Важной особенностью изменения микроклимата в городе и вследствие этого изменения температуры поверхности является влияние на экологическую обстановку. При устойчивой стратификации атмосферы, в особенности при инверсиях температуры, дым может накапливаться в приземном слое атмосферы в таком количестве, которое оказывает вредное физиологическое воздействие. Автомобильный транспорт также вносит вклад в загрязнение воздуха, являясь частой причиной смога [Хромов, Петросянц, 2006].

По причине изменений городской среды происходит изменение микроклимата города, что влечёт за собой непосредственное изменение температуры поверхности земли. Оценить эти изменения можно используя как натурные измерения, так и дистанционные методы. В качестве дистанционных методов исследования температуры применяются данные космической съёмки Земли в дальнем инфракрасном диапазоне. Такие снимки содержат информацию о температуре, которую практически невозможно получить каким-либо иным способом, например, с помощью снимков в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. [Merlin et al., 2010, p. 114]. Тепловая съёмка широко применяется для исследования и мониторинга антропогенных объектов, таких как трубопроводы, объекты городского хозяйства, промышленные объекты [Windahl, Veurs, 2016, p. 14]. В работе рассмотрены примеры изменений температуры поверхности земли в городе Красноярске за двухлетний период с сентября 2016 года по сентябрь 2018 года на основе анализа спутниковых снимков Landsat-8 и Planet Score. Выбор данного временного периода связан с активной застройкой города и с наличием самых ранних снимков на территорию города Красноярска группировки Planet Score. Применение спутниковых снимков высокого разрешения Planet Score позволяет увеличить точность тепловой съёмки Landsat 8, что важно, так как тепловые снимки содержат информацию, которую практически невозможно получить каким-либо другим способом (например, с помощью снимков в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне) [Лабутина, Хайбрахманов, 2010, с. 235]. В статье представлена методика для выявления изменений температуры в рамках одной территории за определённый временной интервал и показана её применимость для определения антропогенных изменений ландшафта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изменения микроклимата и температуры города

В целом микроклиматические изменения общеклиматических режимов могут быть разбиты на следующие категории:

– *Микроклиматическая изменчивость радиационного режима.* Величина поступающей солнечной радиации существенно зависит от орографии земной поверхности и от ориентации склонов по сторонам света: на юг, север, восток, запад и на промежуточные направления. Поступление солнечной радиации уменьшается при облачности и загрязнении. Поток солнечного излучения, достигающий земной поверхности, претерпевает изменения вследствие поглощения и отражения его земной поверхностью [Гарицкая и др., 2012, с. 217].

– **Микроклиматическая изменчивость температурного режима.** Для холмистого и горного рельефов наблюдается изменение температуры воздуха с высотой. Для рельефа с уклоном более 3 % характерно явление стока холодных воздушных масс.

– **Микроклиматическая изменчивость ветрового режима.** Под влиянием неоднородности земной поверхности происходит деформация воздушных потоков, изменение скорости и направления ветра. Основную роль при этом играют направление горных хребтов и ориентация речных долин. Изменение направления ветра под влиянием рельефа может достигать 60°. Наибольшее отклонение в направлении ветра наблюдается в речных долинах. На уровне микрорельефа также наблюдается изменение ветрового режима. Скорость ветра на вершине значительно больше скорости ветра в нижней части склона. Различают склоны наветренной и подветренной стороны.

Таким образом, микроклимат территории в условиях естественного ландшафта формируется под влиянием местных природных факторов: рельефа, близости к водоёмам, характера подстилающей поверхности. В городских условиях изменение климата происходит также под влиянием антропогенных факторов, таких как городская застройка, искусственные потоки тепла, загрязнение воздуха, покрытие асфальтом растительного покрова и естественных почв.

Данные дистанционного зондирования Земли

Фонд материалов космической съёмки в тепловом инфракрасном диапазоне накапливается с 1960-х годов. Собранный архив снимков позволяет анализировать изменения, происходившие на Земле на протяжении уже более 50 лет [Merlin et al., 2010]. Технологии получения информации дистанционными методами постоянно совершенствуются в качестве пространственного и температурного разрешения. В феврале 2013 года состоялся запуск современного спутника Landsat 8; его 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 теплового диапазона TIRS ведёт съёмку 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 [Frey, Parlow, 2012, p. 2650].

Снимки высокого разрешения Planet Scope представлены в онлайн-сервисе (<https://www.planet.com/products/explorer/>). Группировка Planet Scope насчитывает 120 спутников, равномерно распределённых по орбите, и предназначена для регулярного космического мониторинга любой территории в высоком пространственном разрешении. Работают четыре спектральных канала с разрешением 3,7 метра: синий (0,450 – 0,515 мкм), зелёный (0,515 – 0,595 мкм), красный (0,605 – 0,695 мкм), ближний инфракрасный (0,740 – 0,900 мкм). Использование снимка высокого разрешения Planet Scope совместно с Landsat 8 будет описано ниже.

Методика выявления изменений городской среды по температуре поверхности земли

Влияние большого современного города на формирование его микроклимата значительно; особенно это видно на отдельных кварталах, где изменяется городская застройка и вносятся существенные изменения в природный ландшафт. Одним из признаков изменения городского климата является изменение температуры относительно окружающей среды; заметно также загрязнение атмосферы, изменение её оптических характеристик, увеличение мутности, уменьшение притока солнечной радиации.

Методика выявления изменений городской среды основана на использовании температурных карт, полученных по спутниковым данным 10-го теплового канала Landsat 8 [Effat, Hassan, 2014, p. 171] и спутниковым данным Planet Scope видимого диапазона. Обязательным этапом является предварительная обработка спутниковых данных, которая включает проведение атмосферной коррекции, классификацию изображения Planet Scope по типу подстилающей поверхности, проведение оверлея по границам исследуемого

объекта (в нашем случае это границы города Красноярска). В работе применяется классификация изображения с обучением; подробнее метод описывается в предыдущих работах авторов [Matuzko, Yakubailik, 2018].

На следующем этапе происходит синтез космических изображений. Традиционно используется подход, основанный на улучшении пространственного разрешения одного изображения за счёт другого. Так, Landsat 8 позволяет получать цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением 30 м в видимом диапазоне и 100 м в дальнем инфракрасном диапазоне, а Planet Scope – изображения с пространственным разрешением 3,7 м в видимом диапазоне. Синтез этих изображений позволяет увеличить пространственное разрешение Landsat 8 до 3 метров и вычислить температуру поверхности земли по данным 10-го теплового канала Landsat 8 и итоговой классификации Planet Scope. Для каждой даты исследования необходимо составление своей карты температуры поверхности земли. Методика вычисления температуры поверхности земли подробно описана авторами в предыдущей работе [Гостева и др., 2018, с. 198–199].

Важным этапом является нормирование данных для возможности сравнения между собой полученных температурных карт. Используя статистические характеристики каждого изображения, а именно по среднестатистическому значению температуры карты, вычисляется добавочное значение для операции нормирования. После этого проводится математическая операция алгебры карт, позволяющая проводить вычитание одной карты из другой. В результате получается новое изображение, содержащее разницу между температурными значениями в каждом пикселе.

Для корректного выявления изменений по двум спутниковым снимкам необходимо использовать безоблачные односезонные космические снимки с максимально равнозначными метеорологическими условиями. Для апробации методики выявления изменений городской среды авторами были подобраны спутниковые снимки территории города Красноярска с идентичными метеоусловиями на сентябрь 2016 года и сентябрь 2018 года. Набор спутниковых изображений представлен на даты 20.09.2018 и 05.09.2016 со спутника Landsat 8 и снимками высокого разрешения Planet Scope на 20.09.2018 и 20.09.2016.

В таблице представлена температура воздуха на даты исследования и температура поверхности земли, полученная по космическим снимкам. Температура на снимке соответствует времени съёмки Landsat 8 в 12 часов дня.

Табл. 1. Данные о погоде на даты космической съёмки
Table 1. Weather data for satellite images

Дата	Температура воздуха, °С		Средняя температура на снимке, °С
20.09.2018	Днём +15	ночью +4	15.8686
05.09.2016	Днём +19	ночью +14	19.6880

Рассмотрим подробнее проведение нормирования для выявления изменений температуры за два года. Все вычисления проводятся в границах города Красноярска. Сравнивая средние значения температуры поверхности земли 20.09.2016 (ТПЗ2016) и 05.09.2018 (ТПЗ2018), указанные в таблице, получаем, что значение в 2016 году больше, чем в 2018. Поэтому вычитаем среднее значение температуры в 2018 году из среднего в 2016 году и получаем разницу, которую добавляем к карте ТПЗ2018; в результате получаем ТПЗ2018плюс. После нормирования средние значения ТПЗ2016 и ТПЗ2018плюс стали равными. Далее проводится математическая операция алгебры карт: из ТПЗ2016 вычитаем ТПЗ2018плюс.

В результате вычитания получается новое изображение, содержащее разницу между температурными значениями в каждом пикселе для исследуемых дат; из значений 2018 года вычитаются значения 2016 года. Полученные значения для наглядности разделяются на 3

класса: без изменений, с незначительными изменениями с разницей температур 1-3 градуса и со значительными изменениями с разницей температур более 4 градусов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате апробации методики выявления изменений городской среды по температуре поверхности земли выявлены участки со значительным изменением значений температуры в 2018 году относительно 2016 года. Рассмотрим подробнее эти участки.

Вначале рассмотрим два фрагмента спутникового изображения Planet Score; на рисунке 1а представлен 2016 год, а на рисунке 1б – 2018 год. На рисунках изображен участок теплотрассы; при визуальном анализе на изображениях нет видимых изменений, нет антропогенных вмешательств в природный ландшафт. Старт отопительного сезона в 2016 году состоялся 22 сентября, а в 2018 году начат 14 сентября; соответственно на рис. 1а представлен фрагмент до запуска отопления, а на рисунке 1б – после запуска отопления. На рис. 1в видно, что участки с изменившейся температурой соответствуют расположению теплотрассы, где цифрой 3 (красным цветом) обозначены участки с наибольшим изменением температуры на 4–7 °С, цифрой 2 (оранжевым цветом) – изменение на 1–3 °С; для участков без изменений заливка отсутствует.

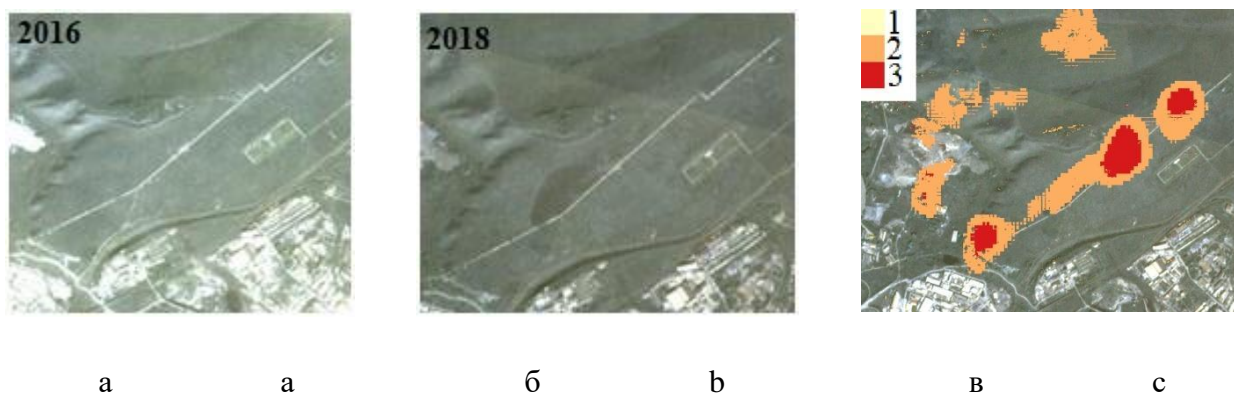


Рис. 1. Изменение температуры поверхности земли на участке городской теплотрассы с 2016 года до 2018 года
Fig. 1. The change the land surface temperature in the urban heating section from 2016 to 2018

На рис. 2 представлен новый строящийся микрорайон на Северном шоссе в городе Красноярске. В 2016 году стройка микрорайона ещё не началась, а к 2018 году уже закончено строительство нескольких жилых домов. Строительство новых домов привело к изменению температуры поверхности земли, что видно на рисунке 2в (цифрой 3 обозначены участки с изменением температуры на 4–7 °С, цифрой 2 – на 1–3 °С, без заливки – участки без изменения температуры). На изображении видно, что максимальная разница температур совпадает с местом возведения новых жилых домов.

Следующий пример также иллюстрирует начало строительства нового микрорайона в Академгородке в 2017 году, что тоже внесло изменение в температуру поверхности земли в городе Красноярске (рис. 3). На рис. 3а и 3б соответственно представлены фрагменты космических снимков Planet Score за 2018 и 2016 годы. На рисунке 3в показано увеличение температуры поверхности земли после начала строительства первого дома в микрорайоне (цифрой 3 (красным цветом) обозначены участки с изменением температуры поверхности земли на 4–7 °С, цифрой 2 (оранжевым цветом) – изменение на 1–3 °С, без заливки – участки без температурных изменений), на рисунке 3в показано наложение температуры на карту Google Планета Земля.

В связи с проведением в Красноярске XXIX Всемирной зимней универсиады 2019 года в лесных массивах в черте города велось активное сооружение горнолыжных трасс и были вырублены большие площади древесных насаждений. На рисунке 4 показано изменение температуры поверхности земли в зоне строительства объектов Универсиады в Кластере Сопка: на рисунке 4а – первоначальный лесной массив в 2016 году, на 4б представлен завершающий этап строительства в 2018 году. На рисунке 4в красным цветом (цифра 3 в легенде) обозначено изменение температуры на 4–7 °С, что соответствует контурам горнолыжных трасс, построенных для проведения соревнований в лесных массивах города во время проведения Универсиады.



Рис. 2. Изменение температуры поверхности земли в новом жилом микрорайоне города Красноярска
 Fig. 2. The change of the land surface temperature in a new residential microdistrict of Krasnoyarsk city



Рис. 3. Изменение температуры поверхности земли в строящемся жилом микрорайоне Академгородка в городе Красноярске
 Fig. 3. The change of the land surface temperature in the new microdistrict under construction of Akademgorodok in Krasnoyarsk city

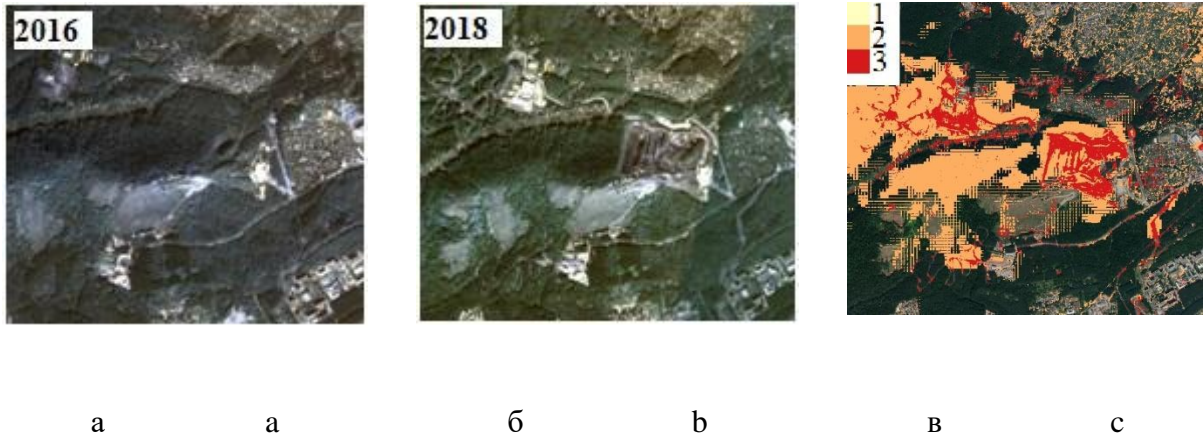


Рис. 4. Изменение температуры поверхности земли в лесном массиве города Красноярска с 2016 года до 2018 года
 Fig. 4. The change of the land surface temperature in the forest of Krasnoyarsk city from 2016 to 2018

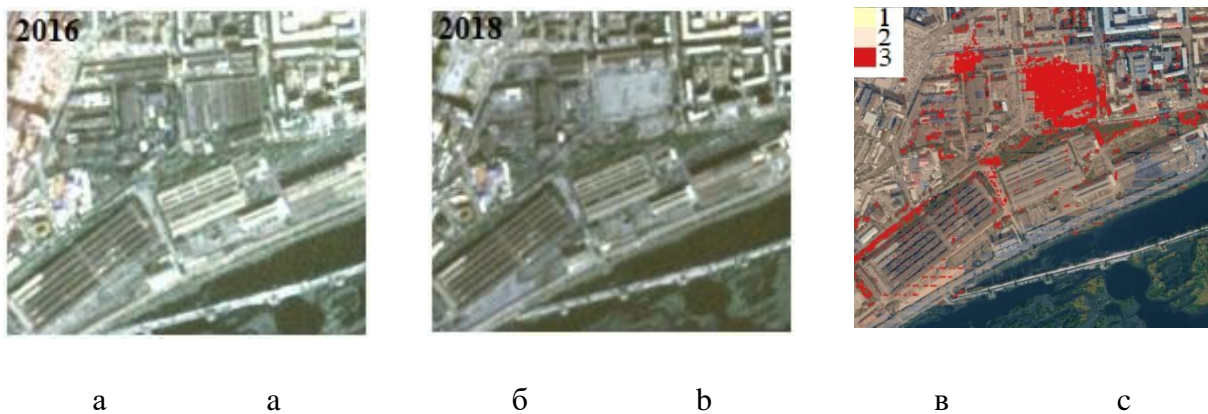


Рис. 5. Изменение температуры поверхности земли на месте бывшего Комбайнового завода в центре города Красноярска с 2016 года до 2018 года
 Fig. 5. The change of the land surface temperature on the site of the former Combine Plant in the center of Krasnoyarsk city from 2016 to 2018

На рис. 5 показана территория бывшего Комбайнового завода, где в 2017 году начался снос промышленных корпусов под строительство жилых домов. На рисунке 5а – изображение 2016 года до начала подготовки строительной площадки. На рис. 5б – результат съёмки в 2018 году, где уже завершён снос зданий в центре города и идёт подготовка строительной площадки. На рис. 5в – фрагмент карты изменений температуры поверхности земли за два года, в легенде обозначены цифрой 3 участки с изменением температуры на 4–7 °С, цифрой 2 – изменение на 1–3 °С, без заливки – участки с минимальным изменением температуры поверхности земли.

Следующий пример показывает результат изменения температуры поверхности земли после строительства гипермаркета «Леруа Мерлен» на ул. Калинина. На рисунке 6а – начальный этап строительства магазина, а на рисунке 6б изображён уже работающий

комплекс в 2018 году. На рисунке б в легенде цифрой 3 (красным цветом) обозначены участки с изменением температуры на 4–7 °С, цифрой 2 (оранжевым цветом) – изменение на 1–3 °С, без заливки – участки без изменения температуры; на фрагменте карты значительные изменения температуры за два года обозначены красным и оранжевым цветом, на рисунке б в видно, что контур изменения температуры поверхности земли соответствует контуру построенного торгового комплекса строительных материалов «Леруа Мерлен».

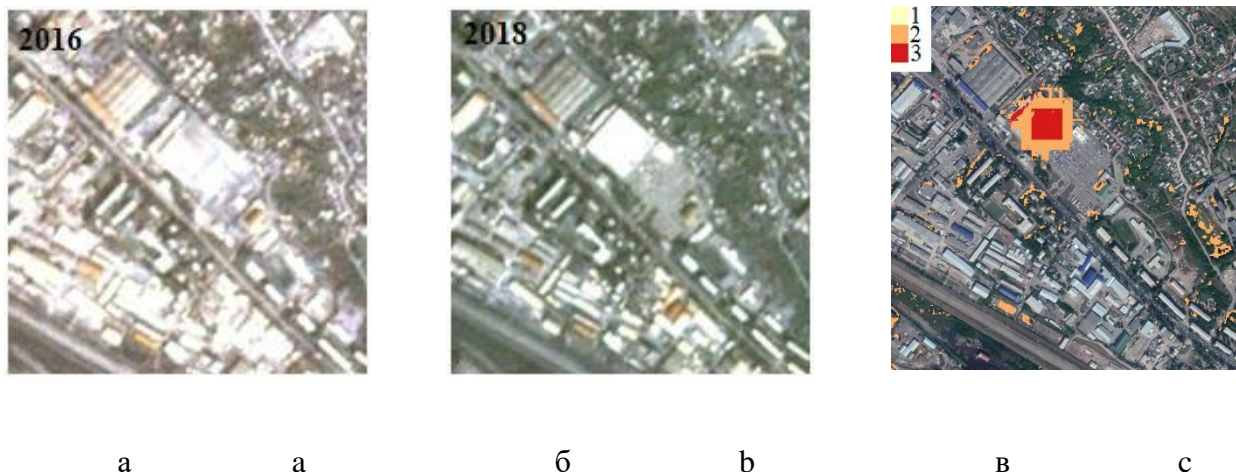


Рис. 6. Изменение температуры поверхности земли в окрестностях гипермаркета «Леруа Мерлен» на ул. Калинина с 2016 года до 2018 года
 Fig. 6. The change of the land surface temperature around the Leroy Merlin hypermarket on Kalinin street from 2016 to 2018

ВЫВОДЫ

Метод визуального анализа по видимым спектральным каналам не позволяет достоверно оценить изменения, особенно на больших территориях. Выявление изменений по видимым каналам ограничивает качество анализа человеческим фактором. Кроме того, визуальные изменения не дают понимания об их скрытых характеристиках.

В статье представлены результаты апробации методики выявления изменений городской среды по температуре поверхности земли на основе спутниковых данных инфракрасного диапазона. В результате выявлены участки со значительной разницей температур за два года – на даты 05.09.2016 и 20.09.2018. В тематической карте участки с изменением температуры разделяются на 3 класса: без изменений, с незначительными изменениями с разницей температур 1–3 градуса и со значительными изменениями с разницей температур более 4 градусов.

При анализе участков с максимальными изменениями температуры отмечено, что динамика изменений связана с изменением городской застройки, а именно со строительством новых микрорайонов, торговых центров. Помимо этого, изменение температуры поверхности связано с изменением лесных ландшафтов, например, в местах вырубki древесных насаждений. Выявление изменения температуры поверхности земли за указанный временной период отражает изменения в городской застройке, лесных массивах, ландшафтах, которые влияют на формирование климата. Данная методика подходит для решения задач дистанционного мониторинга изменения городской территории, легка в организации и хорошо автоматизируется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гарицкая М.Ю., Байтелова А.И., Чекмарёва О.В.* Экологические особенности городской среды: учеб. Пособие. Министерство образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос.

- бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Оренбург. гос. университет». Оренбург: Университет, 2012. 217 с.
2. *Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э.* Дистанционные методы в изучении температуры поверхности земли в городах (на примере г. Красноярска, Россия). ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 195–205. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-195-205.
 3. *Лабутина И.А., Хайбрахманов Т.С.* Функциональное зонирование территории ВАО г. Москвы для целей экологического мониторинга. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф. Ростов-на-Дону, 2010. Т. 16. С. 234–236.
 4. *Хромов С.П., Петросянц М.А.* Метеорология и климатология. Серия Классический университетский учебник. М.: Издательство Московского университета, 2006. 584 с.
 5. *Effat H., Hassan O.* Change detection of urban heat islands and some related parameters using multi-temporal Landsat images; a case study for Cairo city, Egypt. *Urban Climate*, 2014. V. 10. Part 1. P. 171–188. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.10.011.
 6. *Frey C.M., Parlow E.* Flux measurements in Cairo. Part 2: On the determination of the spatial radiation and energy balance using aster satellite data. *Remote Sensing*, 2012. V. 4. Iss. 9. P. 2635–2660. DOI: 10.3390/rs4092635.
 7. *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. V. 211. № 1. Art. № 012010. DOI: 10.1088/1755–1315/211/1/012010.
 8. *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. *Remote Sensing of Environment*, 2010. V. 114. Iss. 11. P. 2500–2512. DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.025.
 9. *Windahl E., Beurs K.* An intercomparison of Landsat land surface temperature retrieval methods under variable atmospheric conditions using in situ skin temperature. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016. V. 51. P. 11–27. DOI: 10.1016/j.jag.2016.04.003.

REFERENCES

1. *Effat H., Hassan O.* Change detection of urban heat islands and some related parameters using multi-temporal Landsat images; a case study for Cairo city, Egypt. *Urban Climate*, 2014. V. 10. Part 1. P. 171–188. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.10.011.
2. *Frey C.M., Parlow E.* Flux measurements in Cairo. Part 2: On the determination of the spatial radiation and energy balance using aster satellite data. *Remote Sensing*, 2012. V. 4. Iss. 9. P. 2635–2660. DOI: 10.3390/rs4092635.
3. *Garitskaya M.Yu., Baitelova A.I., Chekmareva O.V.* Ecological features of the urban environment: studies. Ministry of Education and Science of Russian Federation, Feder. state budget educate institution of higher prof. education “Orenburg State University”. Orenburg: University, 2012. 217 p. (in Russian).
4. *Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E.* Remote methods in studying the temperature of the earth’s surface in cities (on the example of the city of Krasnoyarsk, Russia). *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference.* Petrozavodsk: KRC RAS, 2018. V. 24. Part 2. P. 195–205. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-195-205 (in Russian, abs English).
5. *Khromov S.P., Petrosyants M.A.* Meteorology and climatology. Ser. Classic University Textbook. Moscow: Moscow University Press, 2006. 584 p. (in Russian).
6. *Labutina I.A., Khaibrakhmanov T.S.* Functional zoning of the HLW territory of Moscow for the purposes of environmental monitoring. *Intercarto. InterGIS. Proceedings of the International conference.* Rostov-on-Don, 2010. V. 16. P. 234–236 (in Russian, abs English).

7. *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. V. 211. No 1. Art. No 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012010.
 8. *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. Remote Sensing of Environment, 2010. V. 114. Iss. 11. P. 2500–2512. DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.025.
 9. *Windahl E., Beurs K.* An intercomparison of Landsat land surface temperature retrieval methods under variable atmospheric conditions using in situ skin temperature. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016. V. 51. P. 11–27. DOI: 10.1016/j.jag.2016.04.003.
-