

М.Ю. Грищенко¹, Л.С. Калитка²

ИЗУЧЕНИЕ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ КРАСНОДАРА ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ СО СПУТНИКА LANDSAT 8

АННОТАЦИЯ

Среди всех крупных городов России Краснодар находится в наиболее мягких и тёплых климатических условиях. В связи с этим интересно изучить особенности сезонной изменчивости теплового поля Краснодара, а также внутреннюю структуру поверхностного острова тепла, выявляемую по тепловым космическим снимкам. Для этого использованы разносезонные тепловые космические снимки со спутника Landsat 8 (съёмочная система TIRS), характеризующиеся пространственным разрешением 100 м. Выполнена неконтролируемая классификация созданного на их основе многовременного снимка. Из полученных вариантов неконтролируемой классификации выбран один оптимальный, в котором выделено 13 классов объектов, различных по сезонной изменчивости интенсивности теплового излучения и формирующих тепловую структуру анализируемой территории. Для выбора оптимального варианта результата неконтролируемой классификации разработан коэффициент различия графиков временных образов. На основе выбранного результата неконтролируемой классификации составлена карта тепловой структуры Краснодара. Информация, визуализированная на этой карте, может быть использована для оценки экологического состояния городской территории, в городском планировании, при оценке биоклиматической комфортности городской среды. Выявлены общие характерные особенности теплового поля Краснодара. Оно выделяется на фоне прилегающих территорий в связи с тем, что большее влияние на него оказывают, с одной стороны, промышленные зоны, образуя крупные по площади интенсивные положительные тепловые аномалии, а с другой стороны, большая по площади городская застройка с низкой озеленённостью с активным поглощением и излучением тепла. Вклад в тепловую структуру города вносят крупные рекреационные зелёные зоны, создающие отрицательные тепловые аномалии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловые космические снимки, географическое дешифрирование, тепловое поле, тепловая структура, Краснодар; Landsat

Mikhail Yu. Grishchenko³, Lev S. Kalitka⁴

STUDYING THE SEASONAL VARIABILITY OF THERMAL FIELD OF KRASNODAR USING LANDSAT 8 SATELLITE IMAGERY

ABSTRACT

Among all major cities of Russia Krasnodar is in the most mild and warm climatic conditions. In this regard, it is interesting to study the features of the seasonal variability of the Krasnodar thermal field, as well as the internal structure of the surface heat island, detected by thermal

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет; 119991, Россия, Москва, Ленинские Горы, 1, географический ф-т; *e-mail*: m.gri@geogr.msu.ru

² МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет; 119991, Россия, Москва, Ленинские Горы, 1, географический ф-т; *e-mail*: lev@kalitka.me

³ M.V. Lomonosov MSU, Faculty of Geography; 119991, Russia, Moscow, Leninskiye Gory, 1, Faculty of Geography; *e-mail*: m.gri@geogr.msu.ru

⁴ M.V. Lomonosov MSU, Faculty of Geography; 119991, Russia, Moscow, Leninskiye Gory, 1, Faculty of Geography; *e-mail*: lev@kalitka.me

infrared satellite images. For this purpose, Landsat 8 multiseasonal thermal infrared satellite images (TIRS sensor), characterized by a spatial resolution of 100 m, were used. An unsupervised classification of the multitemporal image was performed. Out of the variants of the unsupervised classification results, an optimal one has been chosen. There were identified 13 classes of objects, different in seasonal variability of the intensity of thermal radiation, and forming the thermal structure of the analyzed territory. To choose the optimal variant of the unsupervised classification result, the difference coefficient was developed. Based on the selected result of the unsupervised classification, the Krasnodar thermal structure map was compiled. The information visualized on this map can be used to assess the ecological state of the urban area, in urban planning, in assessing the bioclimatic comfort of the urban environment. The general characteristic features of the Krasnodar thermal field are revealed. It stands out against the backdrop of the adjacent territories due to the fact that on the one hand, industrial zones have a great influence on it, forming large positive thermal anomalies in the area; on the other hand, a large urban area with low greenery with active heat absorption and heat radiation. Contribution to the thermal structure of the city is made by large recreational green zones, creating negative thermal anomalies.

KEYWORDS: thermal infrared imagery, geographical image interpretation, thermal field, thermal structure, Krasnodar, Landsat

ВВЕДЕНИЕ

Тепловое поле любой территории формируется интенсивностью собственного излучения расположенных на ней природных и антропогенных объектов. В свою очередь, интенсивность собственного излучения объекта определяется рядом факторов, которые зависят от его физических и биохимических свойств. Источник собственного излучения объекта может быть как внутренним (проявления вулканической и поствулканической активности, промышленные предприятия, для которых характерно выделение тепла в ходе производственного процесса), так и внешним (солнечное излучение). В свою очередь, интенсивность нагрева объекта под действием солнечной радиации и интенсивность его излучения также определяются свойствами этого объекта. Таким образом, интенсивность теплового излучения может быть дешифровочным признаком объектов, явлений, процессов и их свойств.

Набор космических снимков более информативен, чем одиночные снимки. Для изучения теплового поля местности актуально использование космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне (тепловых снимков), причём наиболее информативными будут снимки, зарегистрированные в интервале длин волн, на который приходится максимум собственного излучения земной поверхности (10–12 мкм). В случае использования тепловых космических снимков высокой информативностью с точки зрения дешифрирования характеризуются разносезонные ряды снимков [Грищенко, Балдина, 2017].

Для городов характерно повышение интенсивности теплового излучения (и, следовательно, повышение температуры воздуха и поверхности) по сравнению с окружающими территориями. Городской остров тепла – явление, заключающееся в повышении температуры воздуха в городе по сравнению с окружающей местностью; поверхностный остров тепла – явление, заключающееся в повышении температуры земной поверхности в пределах города по сравнению с окружающими территориями. Именно поверхностный остров тепла хорошо фиксируется на космических снимках.

Многие исследователи используют в качестве источника информации снимки со спутников серии Landsat, что объясняется их высоким пространственным и спектральным разрешением. Как дополнительный, а иногда и как основной источник информации используют снимки со спутника Terra, съёмочные системы MODIS и ASTER [Hu, Brunsell, 2015; Schwarz et al., 2011] или со спутников серии NOAA [Klok et al., 2012]. Среди авторов, использующих космические снимки для изучения поверхностного острова тепла, заметно

деление на тех, кто использует преимущественно снимки за летний период [Shen et al., 2016] и тех, кто использует разносезонные снимки [Effat, Hassan, 2014].

С городским островом тепла связана проблема формирования городского местного и микроклимата, определяющего снижение комфортности условий для жизни и деятельности городского населения, а также влияющего на повышение энергозатрат на обеспечение комфортного проживания в городе. Эта проблема относительно широко рассматривается для городов, расположенных в низких широтах, в то время как острова тепла городов умеренного пояса и более высоких широт изучаются далеко не так активно. Краснодар – один из крупнейших городов России (занимает 16 место по численности населения), но в отличие от большинства других крупных городов, характеризуется климатом, близким к субтропическому. Общая характеристика теплового поля Краснодара и его поверхностного острова тепла по одиночным тепловым снимкам хорошо показана в статье [Погорелов, Липилин, 2016]; задача нашего исследования – провести дешифрирование теплового поля Краснодара на основе разносезонной серии тепловых космических снимков с выделением элементов тепловой структуры города.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для работы были использованы снимки со спутника Landsat 8 (съёмочная система TIRS). На каждый сезон отобрано по 2–3 снимка.

Отбор снимков произведён в соответствии со следующими критериями:

1. Снимки должны полностью покрывать исследуемую территорию.
2. Снимки должны удовлетворять временным рамкам исследования (2015–2016 годы).
3. На снимках должна отсутствовать облачность, так как облака перекрывают объекты земной поверхности и создают крупные тепловые аномалии.
4. Погодные условия дат съёмки должны быть схожи с усреднёнными показателями погодных условий для рассматриваемого промежутка времени.
5. Снимки должны показывать сезонный ход, следовательно, они должны быть максимально равномерно распределены по сезонам.

Изначально тепловые снимки съёмочной системы TIRS представлены в виде совокупности так называемых «сырых значений» яркости DN (digital number). Их необходимо перевести в физические единицы, а именно – в значения спектральной плотности излучения.

Для снимков съёмочной системы TIRS расчёт спектральной плотности излучения может быть произведён с использованием коэффициентов, полученных из их метаданных, и осуществляется по формуле: $L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L$, где M_L – мультипликативный коэффициент масштабирования метаданных канала, Q_{cal} – исходные значения яркости пикселей, A_L – коэффициент масштабирования приращения для конкретных диапазонов¹.

Разносезонные тепловые космические снимки могут быть объединены в один многовременной снимок (аналогично формированию многозонального снимка). Процесс создания многовременного теплового космического снимка происходит следующим образом. Разносезонные снимки располагаются в порядке смены сезонов без учёта года съёмки. Далее из снимков формируется «многослойный» файл в одном из растровых форматов, поддерживающих такую функцию, например, в формате *.tif.

Для выявления тепловой структуры территории удобно провести неконтролируемую классификацию полученного таким образом многовременного космического снимка [Грищенко, Балдина, 2017]. Неконтролируемая классификация проведена по алгоритму ISO-DATA со следующими параметрами: вариант инициализации – *along first eigenvector*; минимальный размер кластера – 50 пикселей; порядок сходимости – 99 %; количество классов – от 5 до 21.

¹ Using the USGS Landsat 8 Product / United States Geological Survey official website. Электронный ресурс: <https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product> (дата обращения 13.09.2018)

Далее из всех вариантов результатов неконтролируемой классификации необходимо выбрать один оптимальный. При выделении классов сезонная изменчивость интенсивности теплового излучения у них должна заметно различаться, в противном случае их выделение не имеет смысла; поэтому при определении оптимального количества классов мы ориентировались на различие графиков временных образов полученных классов и на возможность интерпретировать полученные классы, то есть определить, какие объекты им соответствуют.

Для всех полученных вариантов результатов неконтролируемой классификации вычислен коэффициент различия графиков временных образов, а именно – средние значения разностей между ближайшими по интенсивности излучения классами для каждого снимка. Для вычисления потребовалось упорядочить все значения интенсивности теплового излучения от большего к меньшему для каждого отдельного снимка в рамках многовременного. Далее для каждого снимка из больших значений отнимались меньшие (табл. 1).

Табл. 1. Результаты расчёта коэффициентов различия графиков временных образов
Table 1. The results of the calculation of the temporal graphs difference coefficients

Количество классов	Коэффициент различия графиков временных образов, Вт/(м²*srad*мкм)
5	0,26
7	0,21
8	0,18
11	0,13
12	0,13
13	0,13
15	0,10
17	0,09
19	0,10
20	0,10
21	0,09

Как видно из таблицы, при выделении количества классов от 15 до 21 коэффициент практически идентичен, так же, как и при выделении количества классов от 11 до 13. Иными словами, при выделении 15 классов общая информативность результата неконтролируемой классификации скачкообразно снижается, в дальнейшем не меняясь. Таким образом, при выделении 13 классов мы получаем большое количество классов, различающихся между собой более заметно, чем при выделении 15 классов. Для дальнейшей работы выбран вариант с выделением 13 классов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После выбора результата классификации с оптимальным количеством классов мы получили графики сезонной изменчивости интенсивности теплового излучения (графики временных образов) 13 классов. Каждый полученный класс интерпретирован, то есть определено, какие объекты земной поверхности ему соответствуют (рис. 1).

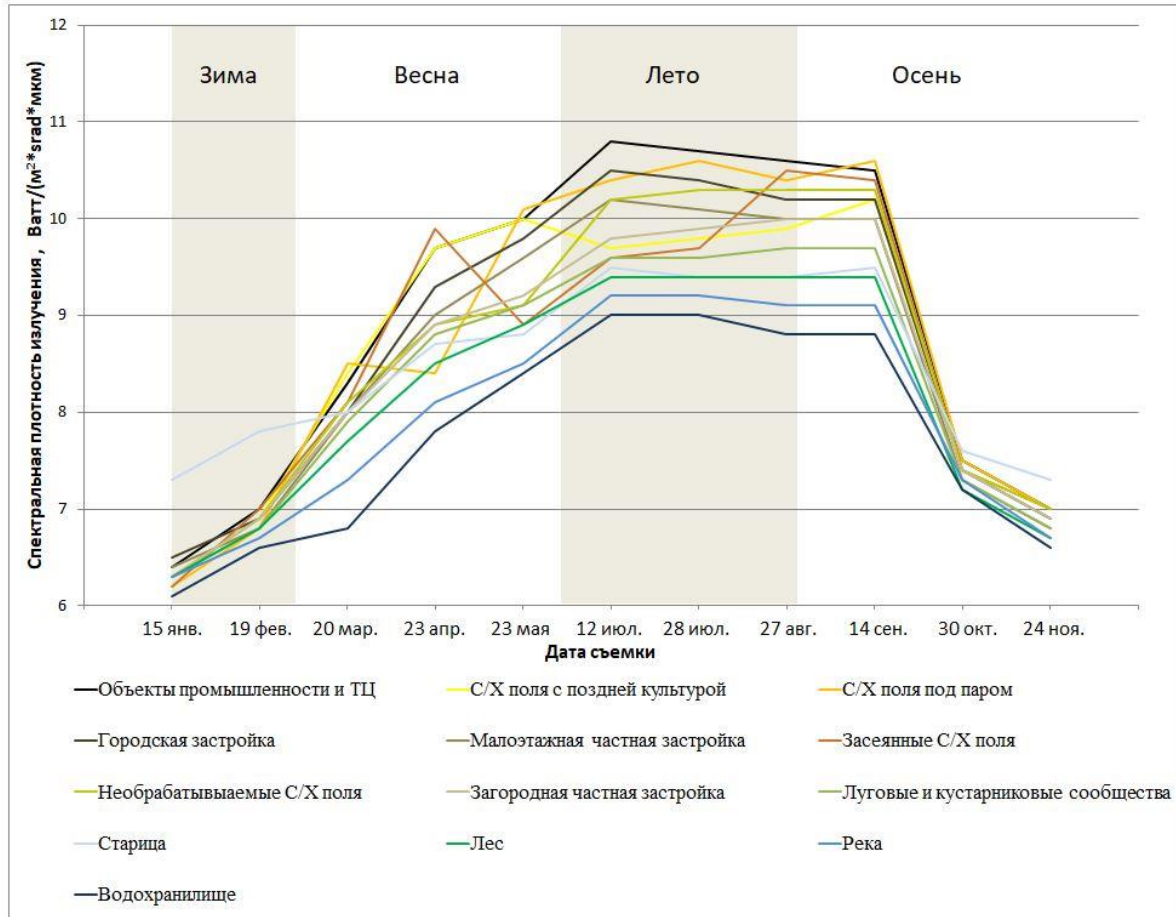


Рис. 1. Графики временных образов полученных 13 классов объектов земной поверхности
 Fig. 1. Graphs of temporary images for 13 received classes of objects of the land surface

Классы городской застройки являются наиболее «тёплыми». Изменения на графиках для всех классов городской застройки схожи, и различия заключаются только в числовых значениях, однако класс загородной частной малоэтажной застройки по сезонной изменчивости больше схож с классом луговых и кустарниковых сообществ, что обусловлено высокой степенью озеленённости такой застройки.

Классы водных объектов являются наиболее «холодными» по сравнению с другими. Графики акваторий реки Кубань и Краснодарского водохранилища имеют характерные для этого класса черты, связанные с повышенной теплоёмкостью водных объектов, однако график класса акватории озера Старая Кубань заметно отличается от них повышенной интенсивностью теплового излучения. Зимой этот класс является самым тёплым среди других классов, что обусловлено активной эксплуатацией озера Краснодарской ТЭЦ.

Классы сельскохозяйственных полей характеризуются резкими сменами значений интенсивности теплового излучения ввиду разных севооборотов на полях. Наиболее плавными изменениями характеризуется класс необрабатываемых сельскохозяйственных полей, который по изменчивости интенсивности теплового излучения схож с классом луговых и кустарниковых сообществ. Наиболее «тёплым» является класс полей под паром.

На основе полученных результатов дешифрирования космических снимков составлена карта тепловой структуры Краснодара, на которой визуализированы объекты земной поверхности, различающиеся по сезонной изменчивости теплового излучения, и вносящие различный вклад в формирование поверхностного острова тепла Краснодара (его усиление или смягчение) (рис. 2).

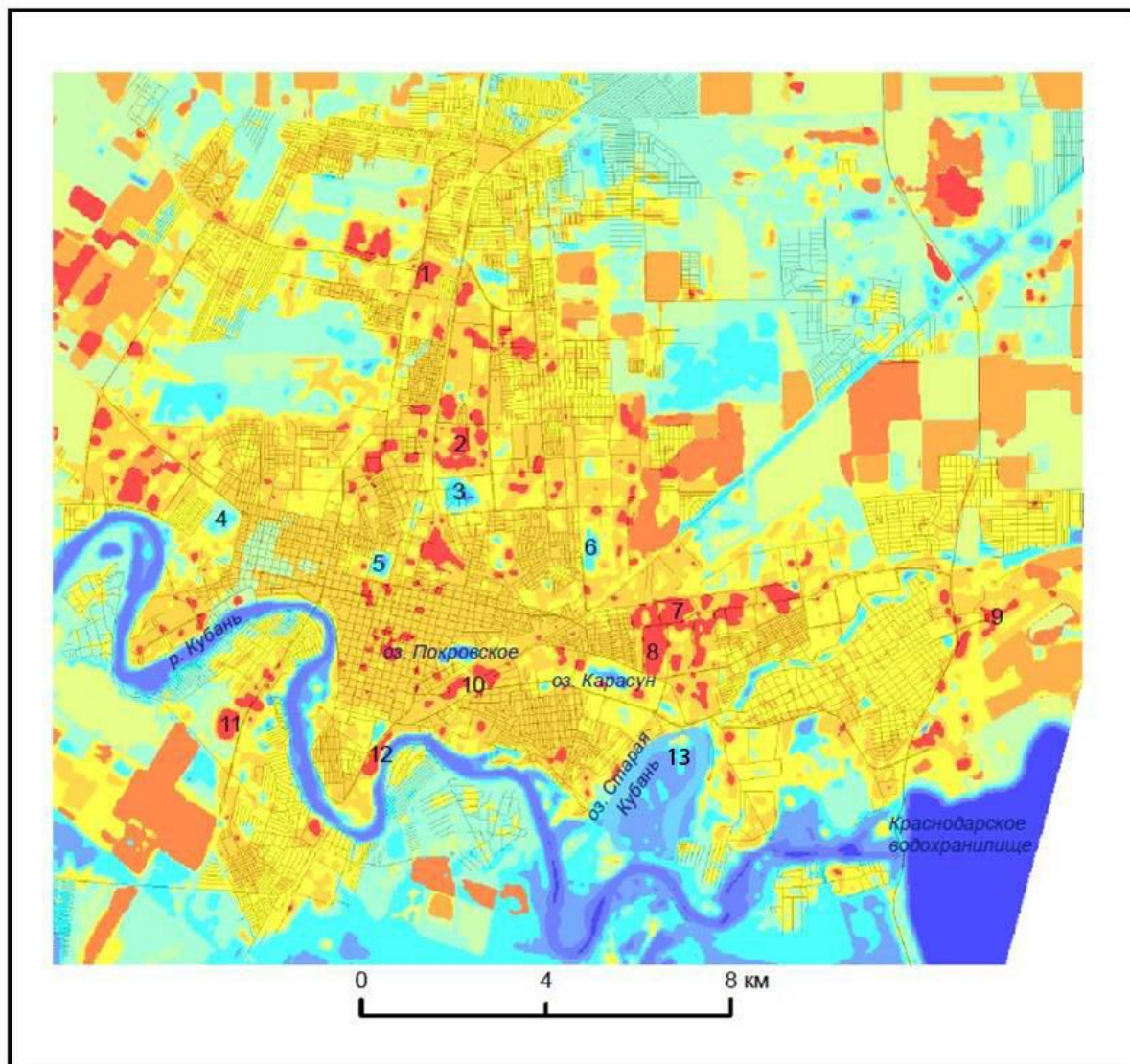


Рис. 2. Карта тепловой структуры Краснодара. Цифрами обозначены:

1. ТЦ «Красная Площадь»; 2. Завод «Очаково»; 3. Чистяковская роща; 4. Ботанический сад имени И.С. Косенко; 5. Всехсвятское кладбище; 6. Стадион ФК «Краснодар»; 7. ТРК «СБС Мегамолл»; 8. ТРК «Галактика»; 9. Международный аэропорт Краснодар; 10. Вокзал «Краснодар-1»;
11. ТЦ «МЕГА Адыгея»; 12. Краснодарский станкостроительный завод имени Г.М. Седина; 13. ПКиО «Солнечный Остров»

Fig. 2. Krasnodar thermal structure map. The numbers are:

1. Shopping center "Red Square"; 2. "Ochakovo" plant; 3. Chistyakovskaya grove; 4. I.S. Kosenko Botanical garden; 5. Vsesvyatskoye (All Saints) cemetery; 6. FC "Krasnodar" stadium; 7. Shopping center "SBS Megamall"; 8. Shopping center "Galaxy"; 9. Krasnodar international airport; 10. Krasnodar-1 railway station; 11. Shopping center "MEGA Adygeya"; 12. G.M. Sedin Krasnodar machine-tool plant; 13. "Solnechny Ostrov" ("Sunny Island") park

Типы объектов земной поверхности	Сезонная дифференциация теплового поля		Спектральное излучение, Ватт/(м ² *srad*мкм)	Стандартное отклонение
Объекты промышленности и ТЦ		Экстремально высокая интенсивность теплового излучения в течение всего года	8,95	0,22
Жилая застройка		Повышенная интенсивность теплового излучения в течение всего года (низкая озелененность)	8,74	0,11
		Низкая интенсивность теплового излучения в течение всего года (высокая озелененность)	8,56	0,12
		Низкая интенсивность теплового излучения за пределами городской застройки в течение всего года (высокая озелененность)	8,48	0,15
Лесные, кустарниковые и луговые сообщества		Не формирующие отрицательные тепловые аномалии в течение всего года	8,33	0,17
		Формирующие отрицательные тепловые аномалии в течение всего года	8,15	0,13
Водные объекты		Подверженные интенсивному тепловому загрязнению в течение всего года	8,48	0,25
		Характеризующиеся средней теплоемкостью	7,95	0,12
		Характеризующиеся повышенной теплоемкостью	7,74	0,04
Сельскохозяйственные поля		Повышенная интенсивность теплового излучения в течение всего года	8,77	0,21
		Повышенная интенсивность теплового излучения в течение весеннего сезона	8,66	0,23
		Повышенная интенсивность теплового излучения в течение осеннего сезона	8,61	0,21
		Пониженная интенсивность теплового излучения в течение всего года	8,62	0,21

Рис. 3. Легенда к карте тепловой структуры Краснодара
 Fig. 3. Legend for Krasnodar thermal structure map

Элементы легенды сгруппированы по следующим категориям (рис. 3):

- а) объекты промышленности и торговые центры;
- б) жилая застройка;
- в) лесные, кустарниковые и луговые сообщества;
- г) водные объекты;
- д) сельскохозяйственные поля.

Объекты промышленности и торговые центры определены только одним элементом тепловой структуры, для которого характерна экстремально высокая интенсивность теплового излучения в течение всего года. Он характеризуется крайне высокой степенью поглощения и излучения тепловой энергии в течение всего года. Этот элемент включает большинство промышленных объектов и складов, ТЭЦ и крупнейшие торговые центры города. Кроме того, сюда попадают городские кварталы с наиболее плотной застройкой, а также участки открытого грунта (например, строительные площадки).

Жилая застройка включает три элемента тепловой структуры. Первый элемент характеризуется повышенной интенсивностью теплового излучения в течение всего года (низкая озеленённость). Объекты этого элемента занимают большую часть площади города. Для них характерны высокая степень поглощения и излучения тепловой энергии и малая площадь зелёных насаждений. Для второго элемента характерна низкая интенсивность теплового излучения в течение всего года (высокая озеленённость). Объекты данного элемента в большей степени располагаются на периферии города. Они характеризуются большей площадью зелёных насаждений и сниженным влиянием городского острова тепла на эти объекты. Третий элемент характеризуется низкой интенсивностью теплового излучения за пределами городской застройки в течение всего года (высокая озеленённость). Объекты этого элемента находятся в основном за городской чертой, в северной и южной частях исследуемой зоны, что соответствует посёлкам Яблоновский и Северный. Для них характерна самая низкая степень поглощения и излучения тепловой энергии в течение всего года среди остальных элементов жилой застройки, а также большая площадь зелёных насаждений.

Лесные, кустарниковые и луговые сообщества включают два элемента тепловой структуры. Первый элемент не формирует отрицательные тепловые аномалии в течение всего года. Объекты этого элемента занимают большую часть площади крупных рекреационных зон внутри города, а также располагаются за чертой города в южной части исследуемой территории. Они характеризуются средней степенью излучения тепловой энергии. Второй элемент формирует отрицательные тепловые аномалии в течение всего года. Данный элемент по площади уступает предыдущему и чаще всего находится на его границах. Для них характерна пониженная интенсивность излучения тепловой энергии.

Водные объекты включают три элемента тепловой структуры. Первый элемент подвержен интенсивному тепловому загрязнению в течение всего года. Этот элемент определяется только акваторией старицы реки Кубань. Он характеризуется высокой интенсивностью теплового излучения, что не является характерным для объектов этой категории; при анализе установлено, что на этот элемент активно воздействует Краснодарская ТЭЦ, используя его для охлаждения. Второй элемент характеризуется средней теплоёмкостью. Этот элемент наблюдается в пределах акватории реки Кубань, а также внутри наиболее крупных озёр Покровское и Карасун. Он имеет уже более характерные для этой категории черты, характеризующиеся средним показателем теплоёмкости и низкой степенью излучения тепловой энергии. Третий элемент характеризуется повышенной теплоёмкостью. Территориально данный элемент покрывает площадь Краснодарского водохранилища, а также наиболее глубокие участки реки Кубань. Во многом он повторяет второй элемент, но характеризуется более высокой теплоёмкостью и более низкими показателями теплового излучения.

Сельскохозяйственные поля включают четыре элемента тепловой структуры. Все объекты земной поверхности этой категории характеризуются схожим пространственным распределением. Все они расположены за городской чертой и преимущественно характеризуются правильной геометрической формой. Первый элемент имеет повышенную интенсивность теплового излучения в течение весеннего сезона. Он включает сельскохозяйственные поля, которые, ввиду позднего времени засеивания, характеризуются высокой степенью поглощения и излучения тепловой энергии в течение весеннего сезона. Для второго элемента характерна повышенная интенсивность теплового излучения в течение весеннего, летнего и осеннего сезонов. Данный элемент включает сельскохозяйственные поля под паром, для которых характерны повышенные показатели поглощения и излучения тепловой энергии практически в течение всего года. Третий элемент имеет повышенную интенсивность теплового излучения в течение осеннего сезона. Данный элемент определяет засеянные сельскохозяйственные поля. Четвёртый элемент характеризуется пониженной интенсивностью теплового излучения в течение всего года. Данный элемент относится к территориям необрабатываемых сельскохозяйственных полей. Для него, в отличие от остальных, характерны более низкие показатели поглощения и излучения тепловой энергии в течение года, чем и обусловлена его схожесть с элементами из категории лесных, кустарниковых и луговых сообществ.

Каждому элементу соответствует свой цвет. Цвета меняются от красного (для экстремально высокой интенсивности теплового излучения у объектов промышленности) до синего (для водных объектов с высокой теплоёмкостью). Цветовая схема подбиралась экспериментальным путём таким образом, чтобы более тёплые цвета соответствовали объектам с более высокой интенсивностью теплового излучения, а более холодные – с более низкой.

Разработанная карта визуализирует особенности тепловой структуры города и различные тепловые аномалии. Таким образом, анализируя карту, можно выявить объекты с положительными или отрицательными тепловыми аномалиями, что является ценной информацией при оценке экологического состояния города. Так, например, по карте можно определить действующие объекты промышленности и оказываемое ими тепловое влияние, оценить влияние зелёных зон города на дифференциацию теплового поля.

Анализируя пространственное распределение внутри города, можно выделить два типа объектов: объекты, формирующие положительные аномалии, и объекты, формирующие отрицательные тепловые аномалии.

Такие объекты, как крупные склады, торговые центры и объекты промышленности относятся к объектам, формирующим положительные тепловые аномалии; большинство из них располагается внутри промышленных зон. Наиболее крупными среди них являются аэропорт «Краснодар», вокзал «Краснодар-1», торговые центры «Красная Площадь», «МЕГА Адыгея», торгово-развлекательные комплексы «СБС Мегамолл», «Галактика», а также завод «Очаково» и нефтеперерабатывающий завод «Краснодарэконнефт». В более прохладные сезоны мощные и интенсивные положительные тепловые аномалии создаёт старая (из-за эксплуатации ТЭЦ).

Такие объекты, как река Кубань, Краснодарское водохранилище, озёра Покровское и Карасун, а также крупные зелёные зоны внутри города (Чистяковская роща, стадион «ФК Краснодар», Всесвятское кладбище и ботанический сад имени И.С. Косенко) относятся к объектам, формирующим отрицательные тепловые аномалии. Большинство этих объектов используются как рекреационные зоны, так как они образуют крупные «острова прохлады» в тёплые сезоны.

Разработанная карта, помимо прочего, может быть использована для городского планирования, так как на ней хорошо различимы тепловые аномалии, связанные как с промышленными зонами, так и с крупными рекреационными объектами. Карту можно использовать как один из материалов для оценки комфортности проживания населения в городе.

ВЫВОДЫ

Тепловое поле Краснодара выделяется на фоне прилегающих территорий в связи с тем, что большое влияние на него оказывают, с одной стороны, промышленные зоны, образуя крупные по площади интенсивные положительные тепловые аномалии, а с другой стороны, большая по площади городская застройка с низкой озеленённостью с активным поглощением и излучением тепла. Вклад в тепловую структуру города вносят крупные рекреационные зелёные зоны, создающие отрицательные тепловые аномалии.

Использование коэффициента различия графиков временных образов при выборе результата неконтролируемой классификации позволяет получить оптимальное количество классов объектов земной поверхности.

Различия в сезонной изменчивости интенсивности теплового излучения городских объектов позволяют классифицировать их и связывать тип сезонной изменчивости интенсивности теплового излучения с их свойствами, что открывает новые возможности для дешифрирования и картографирования городских территорий.

Использованная в представленной работе методика имеет свои достоинства и недостатки. С одной стороны, космические снимки, используемые здесь в качестве исходных материалов, находятся в свободном доступе, а их детальность соответствует требуемой для изучения внутренней структуры теплового поля города. С другой стороны, методика накладывает определённые ограничения на исходные материалы: тепловые космические снимки должны быть получены одной съёмочной системой и отражать все сезоны в году – для регионов, для которых типична облачная погода, подобрать достаточное количество снимков может быть проблематично. Перед проведением неконтролируемой классификации необходимо внимательно изучить исследуемую территорию по снимкам в видимом диапазоне, чтобы в дальнейшем адекватно оценивать результаты неконтролируемой классификации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-05-00715 А.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, project 18-05-00715 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грищенко М.Ю., Балдина Е.А. Исследование возможностей применения снимков в тепловом инфракрасном диапазоне для создания тематических карт. Картография в цифровую эпоху. Вопросы географии. Т. 144. М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. С. 358–375.
2. Погорелов А.В., Липилин Д.А. Тепловой «портрет» города Краснодара. Поиск тепловых аномалий. Географические исследования Краснодарского края. Сборник научных трудов. Краснодар, 2016. С. 219–231.
3. Effat H.A., Hassan O.A.K. 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.
4. Hu L., Brunsell N.A. A new perspective to assess the urban heat island through remotely sensed atmospheric profiles. Remote Sensing of Environment, 2015. V. 158. P. 393–406. DOI: 10.1016/j.rse.2014.10.022.
5. Klok L., Zwart S., Verhagen H., Mauri E. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. Resources, Conservation and Recycling, 2012. V. 64. P. 23–29. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.01.009.
6. Schwarz N., Lautenbach S., Seppelt R. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. Remote Sensing of Environment, 2011. V. 115. P. 3175–3186.

7. Shen H., Huang L., Zhang L., Wu P., Zeng C. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: A 26-year case study of the city of Wuhan in China. *Remote Sensing of Environment*, 2016. V. 172. P. 109–125. DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.005.

REFERENCES

1. Effat H.A., Hassan O.A.K. 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.
 2. Grishchenko M.Y., Baldina E.A. Studying the possibilities of thermal space imagery application for thematic mapping. *Cartography in the digital age. Questions of geography*. V. 144. Moscow: Publishing house “Kodeks”, 2017. P. 358–375 (in Russian).
 3. Hu L., Brunsell N.A. A new perspective to assess the urban heat island through remotely sensed atmospheric profiles. *Remote Sensing of Environment*, 2015. V. 158. P. 393–406. DOI: 10.1016/j.rse.2014.10.022.
 4. Klok L., Zwart S., Verhagen H., Mauri E. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012. V. 64. P. 23–29. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.01.009.
 5. Pogorelov A.V., Lipilin D.A. Thermal “portrait” of Krasnodar. Looking for thermal anomalies. *Geographical researches of Krasnodar Krai. Collection of proceedings*. Krasnodar, 2016. P. 219–231 (in Russian).
 6. Schwarz N., Lautenbach S., Seppelt R. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sensing of Environment*, 2011. V. 115. P. 3175–3186.
 7. Shen H., Huang L., Zhang L., Wu P., Zeng C. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: A 26-year case study of the city of Wuhan in China. *Remote Sensing of Environment*, 2016. V. 172. P. 109–125. DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.005.
-