

Иванова А.А.<sup>1</sup>, Балдина Е.А.<sup>2</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

### АННОТАЦИЯ

Транспорт занимает одно из ведущих положений среди отраслей экономики страны, обеспечивая территориальную связность. Однако все возрастающее количество путей сообщения и перемещающихся по ним средств транспорта ведет к росту загрязнения прилегающих территорий. Воздействие транспорта на среду исследуется главным образом с позиции загрязнения атмосферы и почвы с применением наземных обследований, методов химического анализа проб почв и воды, моделирования распространения загрязняющих веществ и др., роль данных дистанционного зондирования невелика. Оценка возможностей регистрации тепловой космической съемкой исходящего длинноволнового излучения крупных транспортных узлов и выявления закономерностей пространственно-временных изменений теплового излучения на их территориях выполнена для нескольких железнодорожных транспортных узлов. Используются разносезонные снимки, полученные радиометром TIRS со спутника Landsat-8 в 2014–2017 гг. Обработка снимков проводилась в программном комплексе ArcGIS. Она включала предварительную обработку дистанционных данных теплового диапазона, вычисление по стандартной формуле температуры поверхности и создание растровых изображений теплового поля; совмещение полученных изображений пространственного распределения температуры поверхности со снимком высокого разрешения в оптическом диапазоне и создание на этой основе временных рядов изображений тепловых полей для нескольких транспортных, главным образом, железнодорожных узлов. Устойчивые тепловые аномалии оказалось возможным выявить при сложении разносезонных снимков с помощью инструмента Взвешенный оверлей (Weighted overlay). Получены и проанализированы разносезонные изображения железнодорожных транспортных узлов, представляющих пространственно-временную динамику интенсивности их теплового излучения. Тепловая аномалия железнодорожного узла составляет превышение поверхностной температуры на 2–5 °С относительно среднего фонового значения. При этом железнодорожные узлы заметно выделяются на фоне окружающих территорий при отсутствии рядом с узлом действующих промышленных предприятий (Ржев, Архангельск), плотной городской застройки (Москва, Архангельск) или выбросов теплых сточных вод (Брянск), тепловой фон которых иногда существенно превышает излучение железнодорожных объектов. Возможности применения тепловых космических снимков для выявления теплового загрязнения, создаваемого транспортными узлами, ограничены, поскольку пространственного разрешения 100 м (наиболее высокое для современных тепловых космических снимков) часто недостаточно для обнаружения тепловой аномалии.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** космические снимки, тепловой инфракрасный диапазон, железнодорожные узлы, сезонные изменения, тепловое загрязнение.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [ania.ivanova96@yandex.ru](mailto:ania.ivanova96@yandex.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: [baldina@geogr.msu.ru](mailto:baldina@geogr.msu.ru)

**Anna A. Ivanova<sup>1</sup>, Elena A. Baldina<sup>2</sup>**

## **THE RESEARCH AND MAPPING OF THE THERMAL IMPACT OF RAILWAY TRANSPORT NODES ON THE ENVIRONMENT FROM REMOTE SENSING DATA**

### **ABSTRACT**

Transport occupies one of the leading positions among the sectors of the country's economy, providing territorial connectivity. However, an increasing number of communication routes and vehicles moving along them, lead to an increase in pollution of adjacent territories. The impact of transport on the environment is mainly studied from the point of pollution of the atmosphere and soil with the use of ground surveys, methods of chemical analysis of soil and water samples, modeling the spread of pollutants, etc., the role of remote sensing data is low. The research aimed at an assessment of the possibilities for recording the outgoing long-wave radiation of large transport junctions by satellite thermal imagery and revealing the patterns of spatiotemporal changes in thermal radiation from their territories for several railway transport junctions. Images acquired at different seasons by the TIRS radiometer (Landsat-8) in 2014–2017 were used. The images were processed using the ArcGIS software package. The whole work flow chart included several stages, i.e. preliminary processing of thermal remote sensing data, calculation surface temperature for each pixel and the creation of raster images of the thermal field; the combination of the calculated images of the surface temperature spatial distribution with a high-resolution image in the optical range and the creation on this basis of time series images of thermal fields for several transport, mainly railway, nodes; the analysis of the resulting maps. It appeared that stable thermal anomalies can be revealed by combining the temperature images of different seasons using the Weighted overlay tool. Thus, the multi-season temperature images of railway transport nodes, representing the space-time dynamics of the of thermal radiation intensity, were obtained and analyzed. The thermal anomaly of the railway node is an excess of the surface temperature by 2–5 °C relative to the average background value. At the same time, the railway junctions are markedly distinguished against the background of the surrounding territories in the absence of existing industrial enterprises (Rzhev, Arkhangelsk), dense urban development (Moscow, Arkhangelsk) or warm wastewater discharges (Bryansk) near the node, whose thermal background sometimes significantly exceeds the radiation of railway facilities. The possibilities of using satellite thermal images to detect thermal pollution created by transport nodes are limited, since a spatial resolution of 100 m (the highest for modern satellite thermal images) is often not enough to detect a thermal anomaly.

**KEYWORDS:** satellite images, thermal infrared band, railway nodes, seasonal changes, thermal pollution.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Транспорт – одна из важнейших отраслей народного хозяйства и одно из необходимых условий производства, он является крупнейшей системообразующей отраслью, имеющей тесные связи со всеми элементами экономики и социальной сферы. По мере дальнейшего развития страны, расширения ее внутренних и внешних транспортно-

---

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* [ania.ivanova96@yandex.ru](mailto:ania.ivanova96@yandex.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* [baldina@geogr.msu.ru](mailto:baldina@geogr.msu.ru)

экономических связей, роста объемов производства и повышения уровня жизни населения значение транспорта и его роль как системообразующего фактора будут только возрастать. Протяженность путей сообщения транспортной системы России по состоянию на 2017 г. составляла 86 тыс. км железных дорог общего пользования, 42 тыс. км путей промышленного железнодорожного транспорта, 755 тыс. км автомобильных дорог с твердым покрытием, 102 тыс. км внутренних водных путей. Железнодорожный транспорт занимает важное место в транспортной системе, выполняет 62 % общего объема грузовых перевозок, осуществляемых транспортом общего пользования, или 84,3 % общего грузооборота, осуществляемого всеми видами транспорта (без учета трубопроводного)<sup>1</sup>. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. предусматривает рост объемов грузовых перевозок и значительное уменьшение вредного воздействия транспорта на окружающую среду: к 2030 г. предполагается сократить объем выбросов и сбросов загрязняющих вредных веществ от автотранспортного комплекса на 40 %, на железнодорожном транспорте – более чем в 3 раза.

Транспорт относится к важным загрязнителям: его воздействие на экосистемы выражается: в загрязнении атмосферы, водных объектов и земель, изменении химического состава почв и микрофлоры, образовании производственных отходов, в том числе токсичных и радиоактивных, шламов, замазученного грунта, котельных шлаков, золы и мусора [Павлова, 2006]. Под действием транспортных загрязнений происходят деградация и гибель экосистем, особенно на участках наиболее концентрированного воздействия, в первую очередь, на урбанизированных территориях. Остро стоит проблема утилизации и переработки отходов, возникающих при эксплуатации транспортных средств, в том числе и при завершении срока их службы. Для нужд транспорта в большом количестве потребляются природные ресурсы.

Железнодорожный транспорт имеет определенные преимущества с точки зрения воздействия на окружающую среду перед остальными его видами благодаря высокой эффективности использования энергоресурсов; меньшей потребности в занимаемых площадях; меньшем объеме выбросов вредных веществ [Пургина, Колькова, 2014; Пронин, 2016 и др.]. При этом объекты железнодорожного транспорта потребляют большое количество разнообразных видов топлива (угля, газа, дизельного топлива, бензина и др.), которое используется для обеспечения производственных процессов, отопления и работы подвижного состава. Строительство и эксплуатация железных дорог оказывают значительное влияние на экологическое состояние окружающей природной среды, сопровождающееся изменением геохимического, теплового и других полей, а также развитием или активизацией комплекса экзогенных геологических процессов, изменением подземной и поверхностной гидросферы, формированием техногенных форм рельефа [Киселёва, 1999]. Негативное воздействие транспорта на прилегающие территории широко исследуется в разных странах, поскольку железная дорога все же загрязняет окружающую среду в результате выбросов вредных химических веществ и пыли, а также шумом. Эти обстоятельства привлекают внимание к разработке подходов к решению экологических проблем в транспортном комплексе.

Помимо хорошо известных видов воздействия транспорта на окружающую среду необходимо отметить и тепловое загрязнение, когда температура поверхности территории увеличивается, по сравнению с прилегающей местностью. Тепловое загрязнение представляет собой повышенное выделение тепла в окружающую среду, вызванное

---

<sup>1</sup> Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г., [http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer\\_id=5104&S](http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&S)

сжиганием ископаемых углеводородов (нефть, газ, уголь, торф), тепла, выделяемого работающими механизмами, использованием материалов с высокой теплоемкостью, а также повышенным уровнем теплового излучения за счет нагрева солнечными лучами поверхности, лишенной растительного покрова. Транспорт вносит существенный вклад в формирование городского острова тепла на урбанизированных территориях. Тепло, выделяемое транспортными средствами, накапливается в плохо вентилируемых городских зонах, ухудшая состояние атмосферы [Mayer et al., 2012; Haddad, Aouachria, 2015].

Возможность выявления теплового загрязнения урбанизированных территорий и характеристики городских островов тепла по космическим снимкам в тепловом инфракрасном диапазоне известна несколько десятилетий [Voogt, Oke, 2003; Грищенко, 2013]. Однако исследование теплового воздействия именно транспортных систем на основе тепловых аэро- и космических съемок не проводилось.

Цель проведенного исследования состоит в оценке возможностей регистрации тепловой космической съемкой исходящего длинноволнового излучения крупных транспортных узлов и выявление закономерностей пространственно-временных изменений теплового излучения на их территориях.

## **ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Влияние железнодорожного транспорта на окружающую среду проявляется уже в момент начала строительства железной дороги. Факторами, влияющими на окружающую среду при сооружении земляного полотна, являются: нарушение занимаемых земель, загрязнение воздуха, загрязнение водоемов и строительных площадок. К числу основных составляющих воздействия железнодорожного транспорта на окружающую среду, которые исследуются наиболее часто, относятся ингредиентные загрязнители, формируемые как самим подвижным составом, так и перевозимыми грузами, электромагнитные поля и шум подвижного состава. Стационарные источники загрязнения – предприятия, обеспечивающие ремонт транспортных средств, вспомогательные производства, здания и сооружения хозяйственно-бытового назначения (котельные, вокзалы, топливные склады и т. д.), места стоянок транспорта. Среди стационарных объектов, больше всего влияющих на окружающую среду, авторы [Plakhotnik et al., 2005] выделяют такие предприятия как промывочно-пропарочные станции, локомотиво- и вагоноремонтные заводы, заводы по ремонту путевой техники, щебеночные заводы, шпалопропиточные заводы, грузовые и сортировочные станции, котельные, локомотивные и вагонные.

Наиболее распространенными загрязнителями территорий железнодорожных предприятий являются органические вещества и продукты их сгорания (нефть, нефтепродукты, мазут, топливо, смазочные материалы, полициклические ароматические углеводороды) и тяжелые металлы (железо, марганец, свинец, медь, цинк, кобальт и др.). Достаточно крупные и длительное время действующие железнодорожные узлы и их линейные подразделения оказывают влияние на относительно большие прилегающие территории, на расстоянии до 550–1000 м от железнодорожного полотна [Павлова, 2006].

Большое значение имеет определение пространственного распространения загрязнений, формируемое железнодорожными предприятиями, которое зависит от очень многих факторов. Наиболее точным методом является геохимический анализ проб почв, взятых на разном расстоянии от железнодорожного полотна. Авторами, проводившими исследования почвы в окрестностях железнодорожных объектов г. Москвы [Макаров и др., 2013], было установлено значительное повышение концентрации загрязняющих веществ – нефтепродуктов, бенз(а)пирена, свинца и меди – в почвах в ближней зоне

и ее понижение при отстоянии до 50 м. В исследованиях распространения загрязнения почв тяжелыми металлами в Сербии [Stojic et al., 2017] на основе химического анализа проб, отобранных на разном расстоянии от железнодорожного полотна, было установлено, что концентрация таких металлов как кобальт и никель уменьшается постепенно при удалении от железнодорожного полотна и присутствуют на расстоянии более 1 км. Исследование распространения угольной пыли при транспортировке угля [Акаока et al., 2017] показало присутствие частиц угольной пыли разного размера в прилегающей полосе шириной до 50 м.

В нашем исследовании сделана попытка определить степень распространения загрязнения на основе космических снимков в тепловом диапазоне, на которых возможно выделение участков повышенной относительно фона температуры поверхности, т. е. выявить тепловое загрязнение, формируемое железнодорожного транспорта, имеющими заметное для тепловых космических снимков площадное распространение. Собственно полотно железнодорожного пути занимает полосу обычно 10–30 м, но магистральная железнодорожная линия в зависимости от категории требует в пределах перегонов полосы отвода до 100–150 м шириной, а железнодорожные станции со всеми сооружениями в их границах и службами, занимают значительно большие площади. Так, крупные сортировочные станции размещаются на площадках шириной до 300–500 м и длиной 4–6 км. Необходимость сооружения пересечений (железнодорожных линий между собой и с другими путями сообщения) в разных уровнях с применением больших радиусов и малых уклонов на пересекающихся коммуникациях делает железнодорожные развязки весьма емкими по площади [Аксенов И.Я., Аксенов В.И., 1986].

На начальном этапе были проанализированы снимки с изображением наиболее крупных транспортных узлов, например, в пределах Москвы, однако мощный городской остров тепла большого города не позволил выявить в его пределах тепловую аномалию, создаваемую железнодорожным транспортом. В качестве территорий для исследования выбраны 8 транспортных узлов – Бекасово Троицкого округа Москвы; железнодорожные узлы городов: Рыбное (Рязанской обл.), Дружинино (Свердловской обл.), Ржев и Бологое (Тверской обл.), Архангельск, Брянск, Рузаевка (Мордовия). Выбор этих тестовых узлов был обусловлен их расположением в разных климатических и экономических условиях, за пределами крупных городов и наличием безоблачных снимков на несколько сезонов года. Выбранные узлы характеризуются большим грузо- и пассажирооборотом, что является признаком их высокой активности. Активность узлов в свою очередь свидетельствует о том, что они формируют тепловые аномалии.

## МАТЕРИАЛЫ

Для исследования теплового загрязнения транспортных узлов необходимы космические снимки наиболее высокого пространственного разрешения, ввиду того, что транспортные объекты, особенно железные дороги, имеют относительно небольшую ширину. В настоящее время наиболее высокое пространственное разрешение в тепловом диапазоне имеют снимки, получаемые радиометром TIRS в двух каналах (10,30–11,30 и 11,50–12,50 мкм) со спутника Landsat-8 – 100 м.

Для исследования были отобраны снимки из новой коллекции с портала Геологической службы США (U.S. Geological Survey), уровня обработки T1 с наивысшим доступным качеством данных [Earthexplorer.usgs.gov]. В отличие от других съемочных систем снимки TIRS/Landsat 8 не нуждаются в дополнительной калибровке, и их пространственное разрешение подходит для такой задачи, как определение яркостных температур поверхности транспортных узлов и прилегающих территорий. Для более детального изучения террито-



рий узлов и окружающих природных и городских территорий привлекались снимки высокого разрешения сервиса Google Earth. Данные этого уровня обработки радиометрически калиброваны и считаются пригодными для анализа временных рядов. Точность взаимной пространственной привязки разновременных данных, характеризуемая величиной круговой среднеквадратической ошибки, оценивается в  $\leq 12$  м (RMSE) для видимого диапазона и в 40 м для данных TIRS [<https://landsat.usgs.gov/landsat-collections>].

При подборе снимков предпочтение отдавалось изображениям, на которых в пределах рассматриваемых территорий отсутствовали облачность, туман, смог. Другим фактором отбора стал сезон года. Первостепенное значение придавалось зимним снимкам в предположении, что тепловое излучение, создаваемое работающими механизмами, и формируемое ими тепловое загрязнение, должны наиболее отчетливо проявиться зимой при низкой высоте солнца и минимальном влиянии теплового излучения, обусловленного нагревом солнечными лучами. Для выявления сезонной динамики дополнительно привлекались снимки других сезонов (табл.).

Даты и условия съемки выбранных территорий  
Dates and conditions of images acquirement for the selected territories

Дата съемки	Температура воздуха, °С	Высота Солнца, °	Дата съемки	Температура воздуха, °С	Высота Солнца, °
Бекасово			Ржев		
31.01.14	-15	15,4	17.02.2015	-5,8	30,2
29.03.14	-0,6	36,1	27.03.2014	+6,2	46,7
24.07.14	+25,9	56	21.05.2014	+20,2	52,9
21.09.14	+16,9	33,9			
Брянск			Рыбное		
08.02.17	-16,6	19,9	08.02.2016	-3,2	18,5
18.04.13	+17,7	46	27.03.2016	+5,9	36,5
05.06.13	+25,2	57,3	14.05.2016	+15,9	52,5
12.09.14	+21	39,5			
Рузаевка			Дружинино		
26.02.18	-18,3	16,5	13.02.2016	-4,7	12,4
11.03.17	+2,6	38	30.03.2015	+0,8	43,3
14.07.16	+26,2	54,4	03.05.2016	+16,3	47,3
21.09.15	+20	40,2			
Бологое			Архангельск		
17.02.17	-14,6	15,6	06.02.2017	-23,9	9,6
23.03.16	+4,5	35	06.04.2015	8,2	31,8
03.06.13	+22,4	50,3	29.05.2016	20,2	46,9
25.09.17	+19	38,6			

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Вычисление яркостных температур.* На первом этапе обработки создавались изображения распределения вычисленной температуры поверхности. Преобразование исходных числовых значений яркости снимка в яркостные температуры поверхности позволяет более обоснованно сравнивать различия в интенсивности теплового излучения компонентов

транспортных узлов и прилегающих к ним территорий, а также узлы между собой. Вычисления осуществлялись на основе стандартного приближенного метода с использованием одного канала (10 канал), который предлагается разработчиками [<https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>]:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)},$$

где все параметры, необходимые для расчета  $L_\lambda$  – спектральной плотности энергетической яркости на верхней границе атмосферы и радиояркостной температуры  $T$  (коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$ ), приводятся в метаданных каждого снимка. Для осуществления автоматизированного вычисления температур использовался программный продукт ArcGIS 10.5. Ввиду малых размеров исследуемых участков атмосферная коррекция результата вычисления температуры не проводилась. Некоторые результаты этого этапа – изображения распределения яркостных температур в градусах Цельсия на выбранные территории представлены на рис. 1. Нетрудно заметить превышение температуры поверхности всех этих железнодорожных узлов относительно фона, которое составляет не менее 2–5 °С.

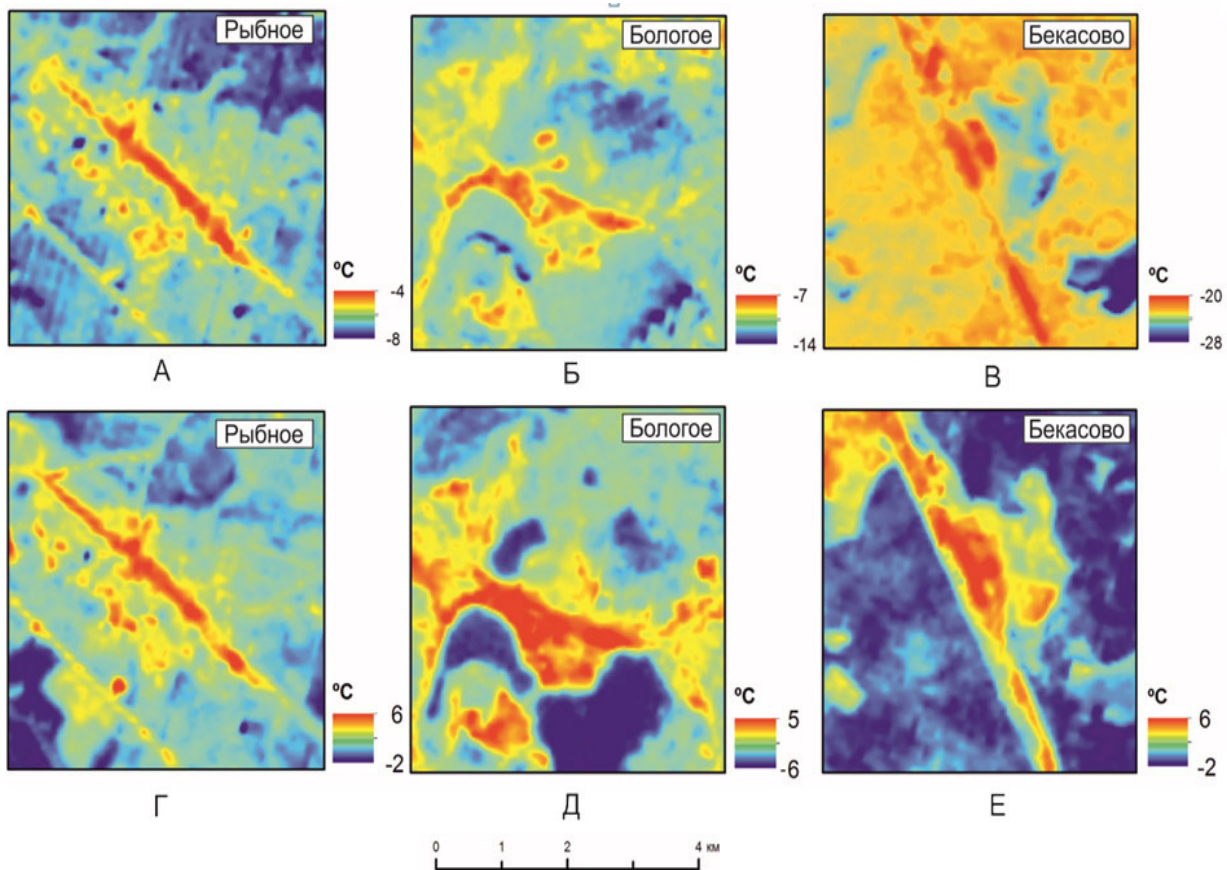


Рис. 1. Распределение яркостных температур на территории железнодорожных узлов Бекасово, Рыбное и Бологое в зимний (верхний ряд) и весенний (нижний ряд) периоды; А – 08.02.16, Б – 17.02.17, В – 31.01.14, Г – 27.03.16, Д – 23.03.16, Е – 29.03.14

Fig. 1. Distribution of brightness temperatures through the territory of the railway junctions Bekasovo, Rybnoye and Bologoe in the winter (upper row) and spring (lower row) seasons; А – 08.02.16, Б – 17.02.17, В – 31.01.14, Г – 27.03.16, Д – 23.03.16, Е – 29.03.14

*Оверлей изображений распределения яркостных температур.* Получение карт тепловых аномалий осуществлялось с помощью инструмента взвешенный оверлей (Weighted overlay), который позволит определить, обладают ли исследуемые транспортные узлы во все рассматриваемые сроки стабильно высокими температурами по сравнению с прилегающими территориями. Есть два основных требования при работе с данным инструментом: входные растровые изображения должны быть целочисленные и переклассифицированы по единой шкале для правильного сопоставления. Переклассификация производилась с помощью гистограмм яркостных температур на каждую исследуемую дату съемки. Всего было выделено 7 градаций температур: 1) минимальные температуры; 2) низкие температуры; 3) температуры ниже среднего; 4) средние температуры; 5) температуры выше среднего; 6) высокие температуры; 7) максимальные температуры.

Разбиение гистограммы производилось методом естественных интервалов (Natural Breaks), в котором границы классов определяются таким образом, чтобы сгруппировать схожие значения и максимально увеличить различия между классами. В ходе выделения указанных выше ступеней температур границам классов присваивались ближайшие целочисленные значения (рис. 2).

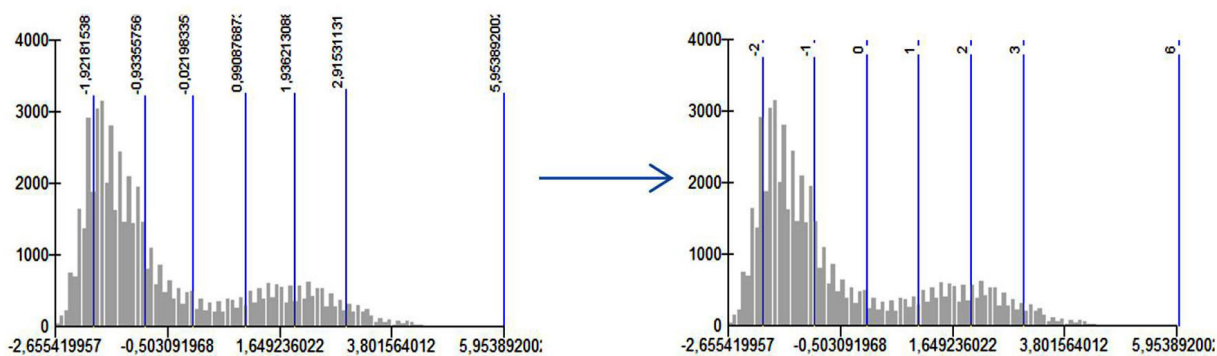


Рис. 2. Пример переклассификации изображения распределения температур территории Бекасово (дата съемки: 29.03.14)

Fig. 2. An example of the reclassification of the temperature image for the territory of Bekasovo (the image date: 29.03.14)

Следующим этапом стало суммирование полученных изображений, состоящих из целочисленных значений классов с помощью взвешенного оверлея. При использовании данного инструмента входным изображениям присваивается вес, который определяет вклад каждого снимка в итоговый растр. Опытным путем было проверено, что оптимальным вариантом является назначение разносезонным снимкам равного веса, тогда распределение суммы температур на результирующем изображении получается более достоверным. При использовании обратной зависимости (чем больше разброс температур на снимке, тем меньше его вес), происходит уменьшение относительных контрастов, а при прямой зависимости (чем больше разброс температур на снимке, тем больше его вес) наоборот контрасты увеличиваются. После процедуры наложения, для всех исследуемых территорий узлов были получены итоговые изображения, представляющие 7 классов суммарных температур (рис. 3).

На последнем этапе создавались карты теплового загрязнения железнодорожных узлов путем совмещения слоя изображений суммарных разносезонных температур и снимков высокого пространственного разрешения, позволяющих точно соотнести тепловые аномалии с хорошо различимыми объектами и постройками (рис. 4).



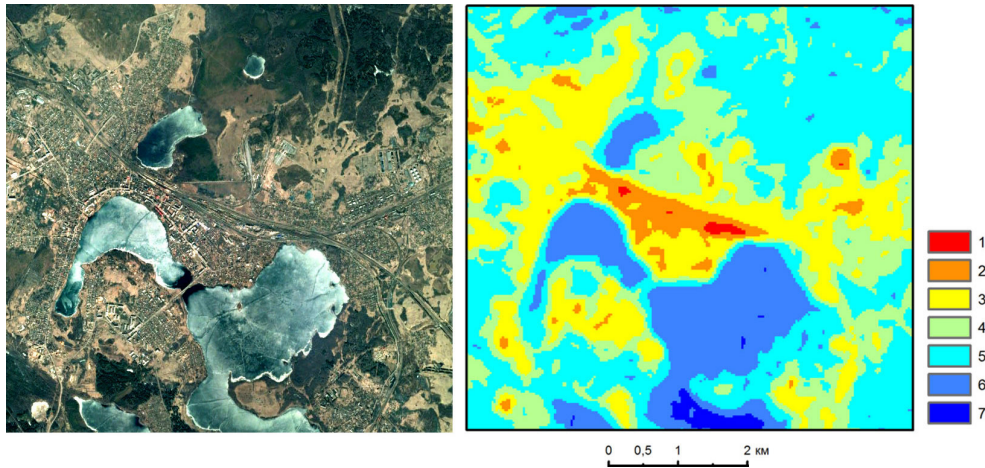


Рис. 3. Детальный снимок железнодорожного узла Бологое и результат взвешенного оверлея изображений температуры поверхности этой территории в разные сезоны: 1 – максимальные температуры, 2 – высокие температуры, 3 – температуры выше среднего, 4 – средние температуры, 5 – температуры ниже среднего, 6 – низкие температуры, 7 – минимальные температуры

Fig. 3. The Bologoye railway junction at the high resolution image (Google Earth) and the result of a weighted overlay of surface temperature multi-seasons images of the same territory: 1 – maximum temperatures, 2 – high temperatures, 3 – temperatures above average, 4 – average temperatures, 5 – temperatures below average, 6 – low temperatures, 7 – minimum temperatures

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные на рис. 4 итоговые изображения железнодорожных узлов позволяют сравнить и проанализировать степень выраженности тепловой аномалии и интенсивность теплового воздействия.

Так, на карте распределения температуры пос. *Дружинино* железнодорожный узел относится к объектам с высокими температурами в большую часть сроков. Максимальные температуры во все исследуемые сроки на территории узла приурочены к пунктам технического обслуживания подвижных составов, по причине теплоотдачи работающих механизмов. Относительно жилой застройки узел выделяется на 2–4 °С. Наибольшие различия наблюдаются зимой, а наименьшие – весной. Между участками территорий, не занятых лесным массивом и узлом, разница температур составляет 3–4 °С. Относительно лесной зоны узел отчетливо выделяется во все исследуемые сроки. Похожие ситуации характерны и для железнодорожных узлов городов *Рыбное* и *Бекасово*, где территории узлов относятся к объектам с высокими и максимальными температурами. Стабильно максимальными температурами обладают как пункты технического обслуживания подвижных составов и локомотивное депо, так и участки железнодорожных путей.

Железнодорожный узел г. *Рыбное* обладает высоким излучением на протяжении всего зимне-весеннего периода, особенно в зоне работающих механизмов. Таким образом, этот узел представляет отчетливо выраженную тепловую аномалию. Тепловая аномалия железнодорожного узла *Бекасово* хорошо выражена в большую часть сроков, поскольку на его территории присутствуют объекты с высокими температурами (путевая машинная станция, сортировочная горка, локомотивное депо). Стабильные максимальные температуры сортировочной горки связаны с теплоотдачей работающих механизмов подвижных составов постоянно перемещающихся по ней. Устойчивая тепловая аномалия этого узла обусловлена его расположением вне крупного города, отсутствием поблизости промышленных предприятий.

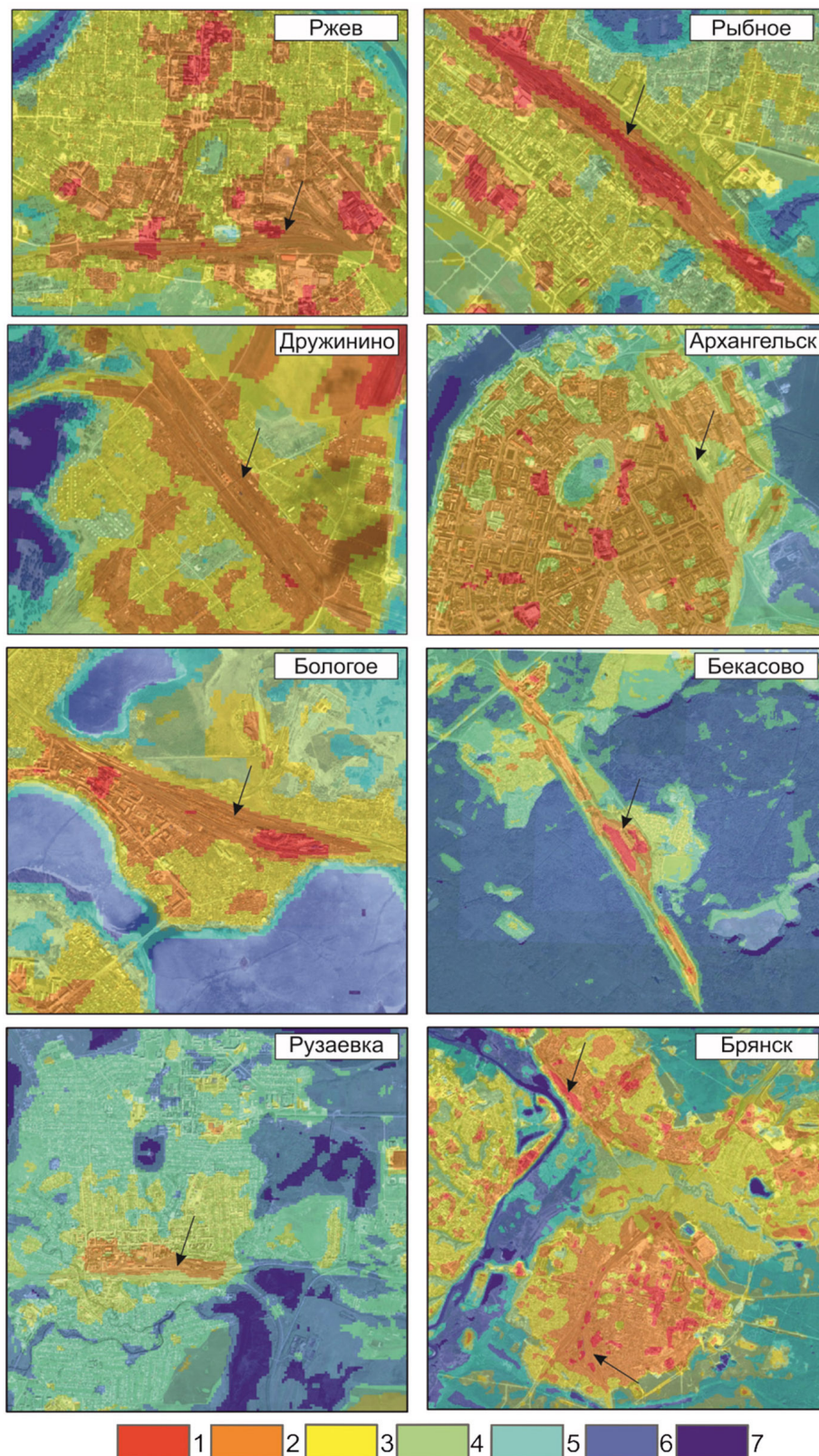


Рис. 4. Карты тепловых аномалий на территории исследованных железнодорожных узлов: 1 – максимальные температуры, 2 – высокие температуры, 3 – температуры выше среднего, 4 – средние температуры, 5 – температуры ниже среднего, 6 – низкие температуры, 7 – минимальные температуры

Fig. 4. The maps of the studied railway nodes thermal anomalies: 1 – maximum temperatures, 2 – high temperatures, 3 – temperatures above average, 4 – average temperatures, 5 – temperatures below average, 6 – low temperatures, 7 – minimum temperatures



Железнодорожный узел *Ржева* относится к объектам с высокими температурами в большую часть сроков, однако к тому же классу объектов относится и прилегающая городская застройка, а расположенные рядом промышленные объекты обладают стабильно максимальными температурами. Анализ разнотемпературных снимков позволяет сделать те же выводы, что железнодорожная станция Ржева выделяется относительно окружающих антропогенных объектов слабо, не только зимой, но и вначале весны. Во второй половине мая, когда уже стоит летняя погода и увеличивается инсоляция, наблюдается повышение излучения в местах работающих механизмов (например, в районе депо по ремонту подвижного состава), но железнодорожные пути все еще обладают небольшим уровнем излучения. Относительно природных объектов (лугов и леса) узел хорошо выявляется во все сезоны.

В *Архангельске* наблюдается та же ситуация, что и во Ржеве, железнодорожный узел вместе с прилегающей жилой застройкой относится к объектам с высокими температурами в большую часть сроков, тем самым не выделяясь относительно нее.

Железнодорожный узел *Брянска* не сконцентрирован в одном месте, а разделен на несколько частей, что обусловило в целом его слабую выраженность относительно городской застройки. Исключением являются одна из составляющих узла – станция Брянск-Орловский. К ней приурочены небольшие участки со стабильно максимальными температурами. Причиной этому может являться активное движение подвижных составов по его территории, а также высокая интенсивность излучения локомотивного депо.

Железнодорожный узел *Бологое* относится к объектам с высокими температурами в большую часть сроков. К объектам со стабильно максимальными температурами относятся локомотивное депо и примыкающие к нему здания по техническому обслуживанию составов, что обуславливает их тепловую аномалию. В целом можно отметить, что территория узла хорошо выделяется относительно малоэтажной жилой застройки. Относительно многоэтажной застройки, которая также относится к классу высоких температур, узел не выделяется.

В г. *Рузаявка* на территории железнодорожного узла присутствуют объекты с высокими температурами в большую часть сроков (железнодорожный вокзал, пункты технического обслуживания составов, веерное депо). В целом, можно сказать, что узел не отчетливо выделяется из-за прилегающей городской застройки, которая также обладает высокими температурами.

Практически для всех узлов тепловое воздействие не распространяется дальше территории узла. Помимо представленных на рис. 4 железнодорожных узлов нами были проанализированы еще несколько узлов, расположенных как на севере – Котлас и Коноша, так и на юге – Армавир, Невинномысск, которые не формировали выраженной тепловой аномалии на доступных снимках. Железнодорожные узлы Московской агломерации представляют сильно выраженную положительную тепловую аномалию, но она не отделима от плотной городской застройки.

## **ВЫВОДЫ**

По космическим снимкам TIRS/Landsat-8 можно выявить тепловое загрязнение, формируемое железнодорожными узлами. Тепловая аномалия железнодорожного узла составляет превышение поверхностной температуры на 2–5 °С относительно среднего фонового значения. Тепловое загрязнение территорий транспортных узлов формируют транспортные средства, находящиеся и передвигающиеся по их территории, а также логистические центры, которые включают в себя складские пункты, где хранятся и обрабатываются грузы, стоянки и пункты технологического обслуживания транспорта. При этом железнодорожные узлы заметно выделяются на фоне окружающих территорий

лишь при отсутствии рядом с узлом действующих промышленных предприятий (Ржев, Архангельск), плотной городской застройки (Архангельск, Рузаевка) или выбросов теплых сточных вод (Брянск), тепловой фон которых иногда существенно превышает излучение железнодорожных объектов. Возможности применения тепловых космических снимков для выявления теплового загрязнения, создаваемого транспортными узлами, ограничены, поскольку пространственного разрешения 100 м (наиболее высокое для современных тепловых космических снимков) часто недостаточно для обнаружения тепловой аномалии, имеющей незначительное превышение температуры поверхности над средними фоновыми значениями.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и РГО, проект № 17-05-41115.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research and Russian Geography Society, № 17-05-41115.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аксенов И.Я., Аксенов В.И.* Транспорт и охрана окружающей среды. М.: Транспорт, 1986. 176 с.
2. *Грищенко М.Ю.* Аэрокосмические исследования городского острова тепла. Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто/ИнтерГИС». 2013. 19(1). С. 22–28. DOI: 10.24057/2414-9179-2013-1-19-22-28.
3. *Киселева Л.В.* Экология железнодорожного транспорта. Учебное пособие. М.: МИИТ, 1999. 165 с.
4. *Макаров А.О., Яковлев А.С.* Оценка загрязненности почв на территории железнодорожных объектов Москвы // *Агрехимический вестник*. 2013. № 2. С. 29–32.
5. *Павлова Е.И.* Экология транспорта. Учебник для вузов. М.: Высш. школа, 2006. 344 с.
6. *Пронин А.П.* Влияние железнодорожного транспорта на окружающую природную среду // *Автоматика на транспорте*. 2016. Т. 2, № 4. С. 610–623.
7. *Пургина А., Королькова А.* Железнодорожный транспорт и окружающая среда // *Вестник Юридического института МИИТ*. 2014. № 3 (7). С. 75–87.
8. *Akaoka K., McKendry I., Saxton J., Cottle P.W.* Impact of coal-carrying trains on particulate matter concentrations in South Delta, British Columbia, Canada. *Environmental Pollution*. April 2017. V. 223. P. 376–383.
9. *Haddad L., Aouachria Z.* Impact of the transport on the urban heat island. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*. 2015. No 5(3). P. 252–263.
10. *Mayer R.M., Poulikakos L.D., Lees A.R., Heutschi K., Kalivoda M.T., Soltic P.* Reducing the environmental impact of road and rail vehicles. *Environmental Impact Assessment Review*. 2012. No 32. P. 25–32.
11. *Plakhotnik V.N., Onyshchenko Ju.V., Yaryshkina L.A.* The environmental impacts of railway transportation in the Ukraine. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2005. V. 10, No 3. P. 263–268.
12. *Stojic N., Puracevic M., Stojic G.* Railway transportation as a source of soil pollution. *Transportation Research Part D*. 2017. No 75. P. 124–129.
13. *Voogt J.A., Oke T.R.* Thermal remote sensing of urban climates // *Remote Sensing of Environment*. 2003. No 86. P. 370–384.



## REFERENCES

1. *Akaoka K., McKendry I., Saxton J., Cottle P.W.* Impact of coal-carrying trains on particulate matter concentrations in South Delta, British Columbia, Canada. *Environmental Pollution*. April 2017. V. 223. P. 376–383.
2. *Aksenov I.Ya., Aksenov V.I.* Transport and environmental protection. M.: Transport, 1986. 176 p. (in Russian).
3. *Grishchenko M.Yu.* Urban heat island aerospace studies. Proceedings of the International conference "InterCarto/InterGIS". 2013. 19 (1). P. 22–28 (in Russian).
4. *Haddad L., Aouachria Z.* Impact of the transport on the urban heat island. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*. 2015. No 5 (3). P. 252–263.
5. *Kiseleva L.V.* Ekologiya railway transport. Tutorial. M.: MIIT, 1999. 165 p. (in Russian).
6. *Makarov A.O., Yakovlev A.S.* Assessment of soil contamination in the territory of railway facilities in Moscow. *Agrochemical Bulletin*. 2013. No 2. P. 29–32 (in Russian).
7. *Mayer R.M., Poulikakos L.D., Lees A.R., Heutsch K., Kalivoda M.T., Soltic P.* Reducing the environmental impact of road and rail vehicles. *Environmental Impact Assessment Review*. 2012. No 32. P. 25–32.
8. *Pavlova E.I.* Ecology of transport. Textbook for high schools. M.: Higher education. school, 2006. 344 p. (in Russian).
9. *Pronin A.P.* The influence of railway transport on the surrounding environment. *Automation on transport*. 2016. T. 2, No 4. P. 610–623 (in Russian).
10. *Purgina A., Korolkova A.* Railway transport and the environment. *Herald of the Juridical Institute of MIIT*. 2014. No. 3 (7). P. 75–87 (in Russian).
11. *Plakhotnik V.N., Onyshchenko Ju.V., Yaryshkina L.A.* The environmental impacts of railway transportation in the Ukraine. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2005. V. 10, No 3. P. 263–268.
12. *Stojic N., Puracevic M., Stojic G.* Railway transportation as a source of soil pollution. *Transportation Research Part D*. 2017. No 75. P. 124–129.
13. *Voogt J.A., Oke T.R.* Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*. 2003. No 86. P. 370–384.