МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет географии, геоэкологии и туризма
Кафедра геоэкологии и мониторинга окружающей среды

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕПЛОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРОДА ВОРОНЕЖА

Бакалаврская работа
Направление: 05.03.06 Экология и природопользование
Профиль «Геоэкология»

Зав.кафедрой _____ д-р. геогр.наук, проф. С.А. Куролап
(подпись)
Обучающийся _____А.С. Клименкова
(подпись)
Руководитель _____ ст. преп. Д.В. Сарычев
(подпись)

Воронеж 2020

Оглавление

Введение 3

1 Исследуемая территория и проблема ее теплового загрязнения 5

1.1 Тепловое загрязнение в городах 5

1.2 Физико-географическая характеристика района исследований 8

1.3 Основные техногенные источники теплового загрязнения в Воронеже 10

2 Методы дистанционного исследования теплового загрязнения окружающей среды 13

2.1 Теоретические основы дистанционного зондирования 13

2.2 Космическая съемка в тепловом диапазоне 18

2.3 Методика выявления, картографирования и анализа тепловых аномалий по данным ДЗЗ 21

3 Космический мониторинг теплового острова города Воронежа 24

3.1 Источники теплового загрязнения зимой 24

3.2 Источники теплового загрязнения летом 29

3.3 Источники теплового загрязнения ночью 32

Заключение 37

Литература 39

Введение

Изучение городского острова тепла имеет большое значение в медицинской экологии, так как комфортность окружающей среды во многом зависит от температурного режима. Появление тепловых аномалий связывают не только с нерациональной планировкой городского пространства, но и с источниками антропогенного тепла: промышленные предприятия, транспорт, объекты жилищно-коммунального хозяйства [4,5]. Проблема теплового загрязнения приобретает все больший вес по мере роста и развития населенных пунктов и уже сейчас требует пристального изучения. Настоящая работа посвящена космическому мониторингу как одному из видов наблюдений, анализа и прогноза активности городских островов тепла.

Целью данной работы является выявление, картографирование, анализ и мониторинг теплового загрязнения окружающей среды в городе Воронеже по данным космической съемки в тепловом диапазоне.

В *задачи* работы входило:

1. Собрать серию разновременных тепловых космических снимков на район исследования.

2. Провести обработку полученных данных ДЗЗ в ГИС и картографировать на их основе вариации теплового поля в г. Воронеже и его окрестностях.

3. Выявить антропогенные тепловые аномалии и их источники в городе Воронеже, определить возможности их космического мониторинга.

Объектом исследования являлась территория города Воронежа. *Предметом исследования* выступали пространственные особенности теплового загрязнения окружающей среды от промышленных предприятий города.

Настоящая работа состоит из тех глав. В первой главе обосновывается проблема теплового загрязнения в городах, дается характеристика исследуемой территории и располагающихся на ней техногенных источников тепла, во второй – рассматриваются теоретические и методические вопросы изучения теплового поля по данным дистанционного зондирования Земли и приводится

описание использованных нами методов анализа тепловых космических снимков. В третьей, заключительной главе, обсуждаются полученные в ходе работы новые данные о тепловом загрязнении окружающей среды в городе Воронеже и возможности дальнейшего космического мониторинга выявленных техногенных источников теплового загрязнения.

1 Исследуемая территория и проблема ее теплового загрязнения

1.1 Тепловое загрязнение в городах

Городская среда многих крупных городов продолжает терять качество для жизни населения. Это связано с высоким уровнем физико-химического загрязнения атмосферы, шумовым, вибрационным, тепловым и другими видами техногенного воздействия [17]. Данная работа посвящена исследованию теплового загрязнения окружающей среды, которому обычно уделяется сравнительно мало внимания.

Тепло может рассматриваться как физическое загрязнение окружающей среды, если ее естественный температурный фон возрастает выше нормы вследствие природных процессов (вулканизм, перенос воздушных масс и др.) и антропогенных эмиссий тепла. Наиболее ярко это явление проявляется в городах – в виде устойчивых положительных аномалий температуры, называемых «островами тепла».

Под «островами тепла» подразумевают области городского ландшафта, характеризующиеся повышенными по сравнению с периферией температурами воздуха, которые можно обрисовывать замкнутыми изотермами [27]. Выраженность таких «островов» зависит от естественных природно-климатических условий, сезонности, но главным образом – от инфраструктурных особенностей городской среды: функциональной зоны, площади и плотности застройки [24].

Значительный рост численности населения, площади урбанизированных территорий, выделения и потери тепла при работе предприятий, автомобильного транспорта, эксплуатации жилищного фонда в совокупности создают своеобразный климат городов, формируя над ними «острова тепла» [21]. К источникам тепла в городах следует отнести дорожные покрытия и отапливаемые здания в холодный период года, от которых идёт излучение, однако, главными источниками техногенного тепла являются промышленные объекты. Так, например, для города Москвы по данным инфракрасного

теплового космического снимка системы NOAA отмечаются локальные тепловые аномалии, связанные с промышленными предприятиями, ТЭЦ и тепловыми сетями. Разница температуры над предприятиями и окружающей их застройкой достигает 10°С, над ТЭЦ - до 5 - 6°С [1].

Высоко урбанизированные территории характеризуются изменением температурного режима вследствие целого ряда факторов. К наиболее значимым из них, формирующим городской микроклимат можно отнести следующие факторы:

- уменьшение интегрального альбедо городских поверхностей, и, как следствие, увеличение доли поглощенной солнечной радиации по сравнению с естественными ландшафтами;
- снижение прозрачности атмосферы из-за загрязнения аэрозолями и различными твердыми примесями от производственных объектов, транспорта и других источников;
- снижение потерь тепла за счет длинноволновой радиации вследствие геометрии «каньона» застройки и многократного переотражения радиационных потоков;
- рассеяние тепловой энергии, образующейся от инфраструктуры теплоснабжения, из-за работы транспорта и различных промышленных процессов, в окружающее воздушное пространство и подстилающую поверхность, приводя к их нагреванию;
- накопление и хранение теплоты элементами застройки вследствие увеличения доли материалов с высокой удельной теплоемкостью в современном строительстве;
- снижение расхода тепла на испарение за счет сокращения площадей с естественным почвенным покровом и зелеными насаждениями, что приводит к росту теплового баланса;
- увеличение уровня шероховатости подстилающей поверхности и снижение скоростей ветра в городах приводят к формированию зон

застоя воздуха, препятствующих турбулентному перемешиванию приземного слоя атмосферы и выносу избыточного тепла в ее вышележащие слои [24].

С учетом приведенных факторов, техногенные эмиссии избыточного тепла в окружающую среду в условиях сложного городского ландшафта могут приводить к устойчивым локальным изменениям температурного режима геосфер: атмосферы, гидросферы и верхних слоев литосферы. Такие изменения, как правило, снижают качество городской среды для жизнедеятельности, приводя к ухудшению здоровья и благополучия населения.

Интенсивность «островов тепла» и их размер изменяются как в пространстве, так и во времени года под влиянием метеоусловий и местных особенностей города. Хорошо выражена суточная динамика: наибольших значений разница температур между городом и пригородом достигает вечером и ночью. Для сезонной динамики «тепловых остров» характерны экстремальные пики температур летом и повышенная влажность зимой, что в обоих случаях неблагоприятно влияет на здоровье горожан [16].

Выраженные изменения температуры наблюдаются при переходе от сельской местности к центральным районам городов [27]. На территории города наблюдается повышение температур воздуха в сравнении с фоновыми характеристиками, особенно в теплый период года, что способствует росту загрязнения воздуха, снижающего комфорт жизнеобеспечения; Воздух в городах с излишне чёткой планировкой прогревается сильнее, чем с хаотичной застройкой. Особенно интересно в этом плане плохо проветриваемые полузамкнутые дворы многоэтажных крупных строений: в зимнее время в этих дворах воздух застаивается, и температура может быть ниже, а в летнее время выше прилегающих территорий. Менее контрастная обстановка наблюдается для районов малоэтажной застройки [1].

Медико-экологические следствия развития городских островов тепла особенно остро проявляются на фоне продолжительных волн жары. В такие периоды организм испытывает напряжение, которое проявляется в обострении

многих хронических заболеваний, в первую очередь, сосудистой, респираторной, эндокринной патологии. Что приводит к росту преждевременной смертности населения, неоднократно отмечавшейся во многих регионах мира, в особенности в крупных городах Европы. Известны последствия аномальная жары 2010 года, которые в Воронежской области привели к атмосферной засухе, лесным пожарам и повышенной преждевременной смертности населения [19]. Еще одно негативное медико-экологическое следствие городских «островов тепла» связано с инфекционными заболеваниями, поскольку изменение температурного режима часто является пусковым механизмом развития локальных вспышек многих инфекций [23].

К сожалению, в обозримом будущем проблема городских островов тепла будет только усугубляться, так как повышение температуры от техногенных источников накладывается на глобальные тенденции потепления климата. Так, например, в Московской области, сравнение значений температуры воздуха по линии тренда в начале 1890 и в конце 2009 годов показало, что в холодный период года (с ноября по март), а также в апреле, отмечался значительный её рост на 2,5 - 4,5 градуса ^{o}C [21]. В то же время, на исследуемой нами территории г. Воронежа, за 20 лет (1990 – 2010 гг.) выросла среднегодовая температура воздуха (на 0,4°C по сравнению с климатической нормой), в большей степени также за счет повышения зимних температур [22].

1.2 Физико-географическая характеристика района исследований

Город Воронеж расположен в европейской части России на границе Среднерусской возвышенности и Окско-Донской равнины и является административным центром Воронежской области. Город расположен на берегах реки Воронеж, в 12 километрах от её впадения в Дон. Географические координаты - 51°40’ с. ш. 39°12’ (рис. 1). Население - 1 014 713 чел. (на 01.01.2014), площадь - 597 км^2 [8].

Рис.1. Исследуемая территория города Воронежа на карте Open Street Map

Территория города имеет контрастный рельеф, это объясняется расположением его на границе Среднерусской возвышенности и Окско-Донской равнины. Правобережная часть города находится на холмистом плато с абсолютными отметками от 100 до 160 м, а левая - в пониженной плоскоравнинной местности, которая постепенно переходит в речную террасу [18].

Воронеж расположен в зоне умеренного климата. Среднегодовая температура в Воронеже составляет +6,9°С. Зима умеренно - морозная с устойчивым снежным покровом. Лето тёплое, даже жаркое (особенно июль и первая половина августа), в отдельные годы – дождливое или засушливое. Осень мягкая и дождливая. Среднегодовое количество осадков от 520 до 550 мм. Заметное влияние на распределение осадков оказывает рельеф [7].

Поверхностные воды города представлены рекой Воронеж и Воронежским водохранилищем. Площадь водного зеркала Воронежского водохранилища составляет 70 км². Его длина – 35 км при ширине до 2 км.

Средняя глубина водоёма - 2,9 м, а общий объём - 204 млн м³ [8]. Также в черте города протекают реки Дон, Усманка.

В окрестностях Воронежа распространены серые лесные почвы, чернозёмы южные, обыкновенные, оподзоленные, типичные, выщелоченные, и лугово-чернозёмные почвы, а также пойменные, низко продуктивные песчаные почвы и солонцы. Открытые грунты в пределах города представлены в основном урбаземами.

Растительность города сосредоточена в парках и скверах, где обычны такие древесные породы как каштан конский, дуб черешчатый, ясень, клён остролистный, липа, лиственница, ель, сосна обыкновенная, плакучая ива, тополь пирамидальный, рябина и др. Животный мир: в парках можно встретить белок, мелких грызунов, летучих мышей. Наблюдается много видов птиц: воробьи, серые вороны, галки, грачи, скворцы, голубей и др. В Воронежском водохранилище обитают множество рыб, насекомых и ракообразных.

1.3 Основные техногенные источники теплового загрязнения в Воронеже

Анализ современного состояния промышлености города Воронежа показывает, что многие предприятия города в настоящее время могут являться источниками теплового загрязнения окружающей среды, так как в их технологических циклах возможны существенные эмиссии тепла.

Рассмотрим подробнее местоположения промышленных зон и сферу деятельности основных предприятий – потенциальных источников теплового загрязнения окружающей среды.

«Воронежский механический завод» - филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»

Предприятие расположено по адресу: г. Воронеж, ул. Ворошилова, 22. Координаты: 51°39’10’’ с.ш. 39°10’13’’ в.д. Основано в 1928 году. В настоящее время представляет собой широкопрофильное машиностроительное предприятие, производящее продукцию для различных отраслей

промышленности: нефтегазовое оборудование, авиационное оборудование, узлы и агрегаты для тепловозов, изготовление деталей для жидкостных ракетных двигателей [10].

«Воронежский шинный завод»

Предприятие расположено по адресу: г. Воронеж, ул. Ростовская, 41. Координаты: 51°36’23’’ с.ш. 39°14’42’’ в.д. С 29 февраля 2012 года Воронежский шинный завод входит в состав совместного предприятия международной компании Pirelli. Воронежский шинный завод нацелен на производство премиальных шин. В январе 2013 года была запущена новая линия полного производственного цикла. Объем производства – 2 млн. шин в год, при этом мощности завода позволяют увеличить объем производства при благоприятной рыночной конъюнктуре [11].

ПАО «Воронежское акционерное самолётостроительное общество»

Предприятие расположено по адресу: г. Воронеж, ул. Циолковского, 27. Координаты: 51°38’16’’ с.ш. 39°15’07’’ в.д. Основано в 1932 году. Завод производит воздушные суда: АН-148-100 – ближнемагистральный региональный самолет, ИЛ-112В – легкий военно-транспортный самолет, ИЛ-96-300, ИЛ-96-400М, ИЛ-96-400Т – дальне магистральные пассажирские самолеты, региональный пассажирский самолет SUKHOI SUPERJET 100, тяжелый транспортный самолет Ил-76, МД-90А, МС-21 - семейство пассажирских самолетов нового поколения, Ил-114-300 - пассажирский самолет [12].

АО «Воронежстальмост»

Предприятие расположено по адресу: г. Воронеж, ул. Волгоградская, 39. Координаты: 51°39’03’’ с.ш. 39°16’15’’ в.д. Основано в 1948 году. Предприятие специализируется на изготовлении металлических конструкций для железнодорожных, автодорожных, пешеходных и городских мостов. Кроме того, предприятие изготавливает металлические конструкции для промышленного и гражданского строительства, используя передовые технологии [13].

Воронежский вагоноремонтный завод филиал АО "ВАГОНРЕММАШ"

Предприятие расположено по адресу: г. Воронеж, пер. Богдана Хмельницкого,1. Координаты: 51°43’27’’ с.ш. 39°16’01’’ в.д. Основано в 1912 году, но с 2008 года является филиалом Открытого Акционерного Общества «ВАГОНРЕММАШ». Завод осуществляет ремонт и модернизацию пассажирских вагонов всех типов, новое формирование и ремонт со сменой элементов колёсных пар грузовых и пассажирских вагонов. Новое направление производственной деятельности завода - выпуск вагонов [9].

ООО ХК «Мебель Черноземья»

Предприятие расположено по адресу: г. Воронеж, ул. Богдана Хмельницкого, 51а. Координаты: Координаты: 51°43’17’’ с.ш. 39°15’54’’ в.д. предприятие основано в 1943 году, сегодня объединяет несколько производственных предприятий по производству различных видов мебельных изделий.

2 Методы дистанционного исследования теплового загрязнения окружающей среды

2.1 Теоретические основы дистанционного зондирования

Аэрокосмические методы исследования окружающей среды, в том числе дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), активно развиваются. В настоящее время мультиспектральные космические снимки получают посредством множества искусственных спутников Земли. Результаты ДЗЗ представленные цифровыми растровыми изображениями сегодня становятся одним из главных источников информации для изучения состояния окружающей среды, мониторинга опасных природных явлений, для оценки состояния водных ресурсов, почв, растительности и т. д. [37]. Аэрокосмические методы позволяют также исследовать термодинамические характеристики подстилающей поверхности ландшафтного покрова [3, 4, 5, 15].

Процесс получения данных ДЗЗ обусловлен источниками электромагнитного излучения, физическими свойствами атмосферы, объектом исследования и сенсором конкретного космического аппарата (КА).

Под э*лектромагнитным излучением* понимается энергия в диапазоне волн 10^{-10} мкм (космические лучи) до 10^{10} мкм (радиоволны). Существует три основных источника электромагнитных волн, воздействующих на объекты ДЗЗ: собственное излучение Земли, прямое и рассеянное излучение от Солнца и антропогенное излучение. Собственное излучение Земли связано с тепловым потоком из недр планеты, геохимическими и биохимическими процессами и состоит из гамма-лучей и теплового излучения. Излучение Солнца включает весь электромагнитный спектр. При распространении излучения через атмосферу, его интенсивность и спектральное распределение изменяется, далее оно взаимодействует с объектом и при этом в определенной степени отражается или поглощается им. Отраженная или излученная энергия проходит обратно через атмосферу и вновь претерпевает изменения в спектральном распределении и интенсивности. Наконец, излучение достигает сенсора КА, где

оно измеряется и переводится в двоичный код для последующей передачи и обработки. Таким образом, интенсивность исходящего от объекта электромагнитного излучения переводится в дискретные цифровые значения, соответствующие характеристикам отражательной способности [34].

Идеальная схема дистанционного зондирования показана на рисунке 2. В этой модели источник генерирует электромагнитное излучение с высоким уровнем энергии во всем диапазоне длин волн, при этом интенсивность излучения является известной величиной, которая не зависит от длины волны. Излучение не взаимодействует с атмосферой и распространяется через нее без потери энергии [37].

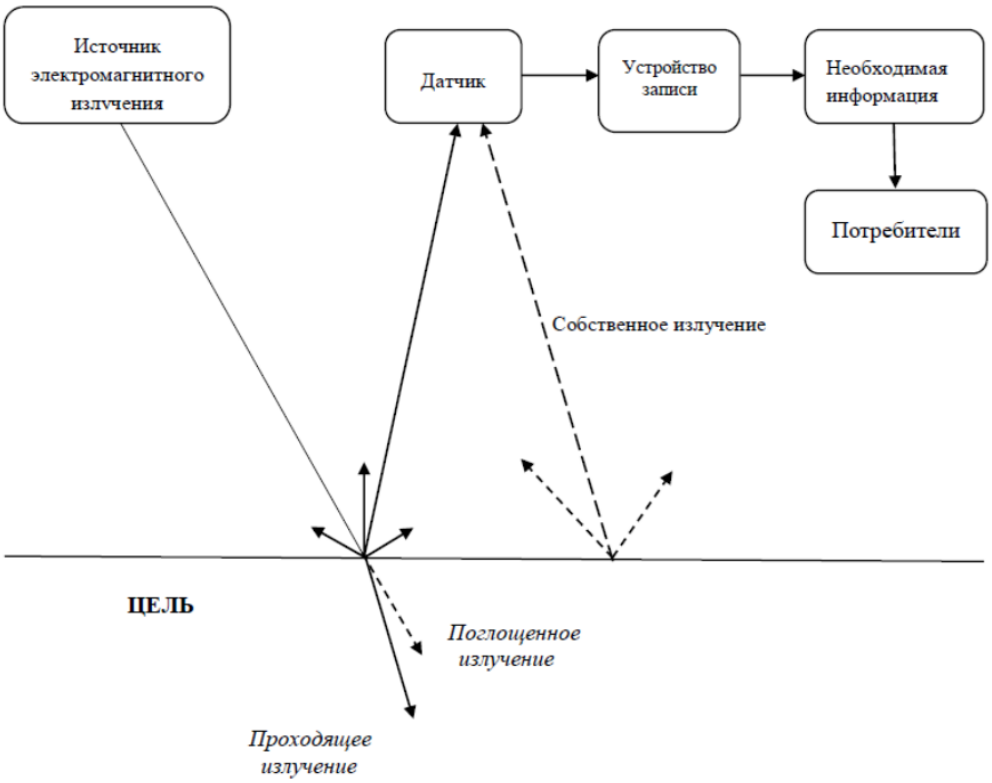

Рис. 2. Идеальная схема ДЗ

В реальности, влияние атмосферы на процесс ДЗЗ проявляется в рассеянии и поглощении энергии. Поглощение – это переход энергии падающего излучения в энергию движения молекул атмосферы. Рассеяние этой энергии происходит за счет наличия в атмосфере молекул газа, частиц пыли, водяных капель.

Преодолевшее атмосферу излучение взаимодействует с подстилающей поверхностью, в результате чего возникает отраженное либо собственное вторичное излучение. Для регистрации излучения земной поверхности на космических аппаратах устанавливают специальное оборудование - сенсоры. Сенсор должен иметь малогабаритную конструкцию и обладать высокой точностью. По источнику энергии все сенсоры можно разделить на активные и пассивные. Пассивные сенсоры служат для измерения характеристик излучения внешнего источника, в качестве которого обычно выступает Солнце. Активные сенсоры сами являются источником излучения.

Методы дистанционного зондирования основаны на использовании сенсоров, регистрирующих электромагнитное излучение в приспособленных для цифровой обработки форматах. Солнечное излучение, отраженное от земной поверхности, регистрируются в ближнем ультрафиолетовым, в видимом (0,38 - 0,72 мкм), ближнем (0,72 - 2,5 мкм), среднем (2,5 - 50 мкм) и дальнем (50 - 2000 мкм) инфракрасных (ИК) диапазонах спектра.

Данные, зарегистрированные сенсором, передаются на наземную станцию, где мгновенно преобразуются в интерпретируемую форму, которая позволяет идентифицировать все части изучаемого объекта по их физическим, химическим и биологическим свойствам [37]. Данные видимого спектра дают возможность количественно оценить цвета и текстуры изображений объектов по космическим снимкам в естественных цветах. Средний ИК диапазон чаще применяют при распознавании типов поверхности.

В ДЗЗ получение снимков основывается на регистрации яркости объектов, которая в разных спектральных зонах неодинакова. Для получения таких снимков применяют многозональную (или мультиспектральную) съемку. Такая съемка позволяет более эффективно дешифрировать объекты на основе их различия в спектральной яркости. Многозональный снимок представляет собой серию зональных изображений, которые различаются в соответствии с особенностями спектральной яркости объектов съемки.

Спектральные отражательные свойства природных объектов выражают в коэффициенте спектральной яркости (КСЯ). При определении коэффициента спектральной яркости применяют как абсолютные значения яркости, так и относительные, получаемые на основе сравнения яркости объекта и эталона. Зачастую значения коэффициентов спектральной яркости для различных длин волн представляют в форме графика - кривой спектральной яркости (рис.3).

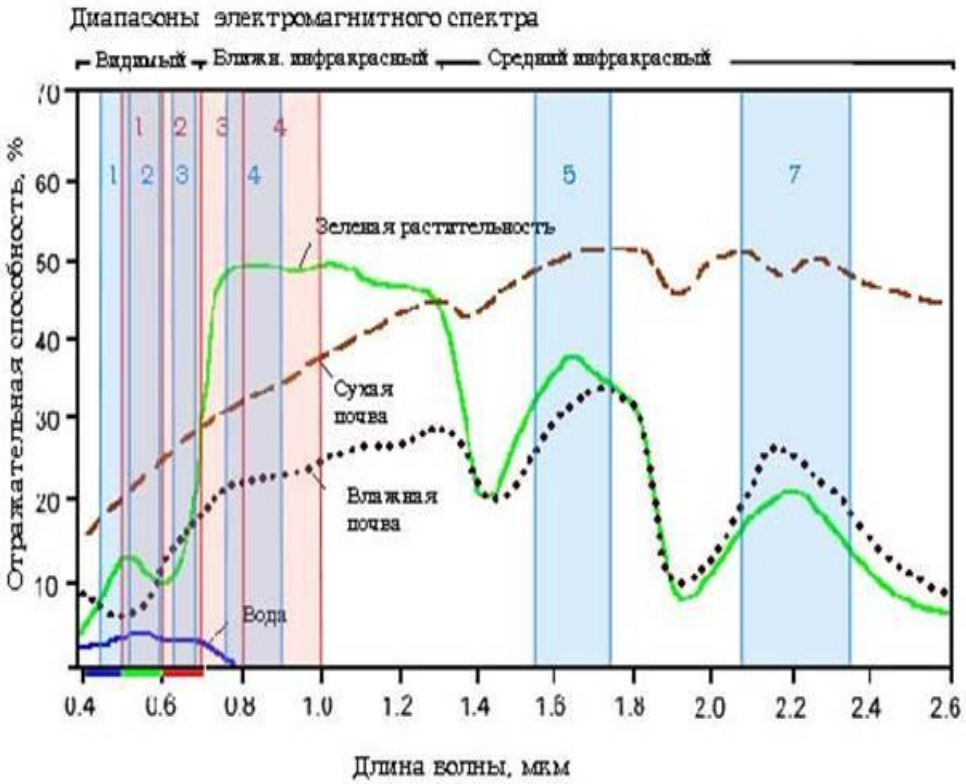

Рис. 3. Кривые спектральной яркости

Знания спектральной яркости объектов дают основу для получения различных способов обработки аэрокосмических снимков, в том числе и компьютерной классификации объектов.

По КСЯ все многообразие объектов земной поверхности отчетливо делится на несколько классов, каждый из которых отличается по характеру спектральной отражательной способности.

1. Горные породы и почвы характеризуются увеличением КСЯ по мере приближения к красной зоне спектра.

2. Растительный покров отличается характерным максимумом отражательной способности в зеленой (0,55 мкм), минимумом - в красной (0,66 мкм) и резким увеличением отражения в ближней ИК- зоне.

3. Водные поверхности характеризуются самыми низкими значениями и монотонным уменьшением отражательной способности от сине - фиолетовой к красной зоне спектра, поскольку длинноволновое излучение сильнее поглощается водой.

4. Снежный покров обладает наиболее высокими значениями КСЯ с небольшим их понижением в ближней ИК - зоне спектра. Близки к этому классу по характеру отражения облачные образования, которые имеют несколько узких полос поглощения в длинноволновой части спектра [6].

В последнее десятилетие в области дистанционных исследований Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра исключительно широкое применение нашли спектрометры с различным, заранее определенным числом и шириной спектральных интервалов чувствительности [2]. Особое внимание уделялось инструментальному обеспечению спектрометрических измерений, так как от этого зависит методика получения коэффициентов спектральной яркости изучаемых объектов. Приборы для измерения КСЯ разрабатывались не только для лабораторных, полевых измерений, но и для измерений КСЯ с борта летательных аппаратов.

К преимуществам спутниковой съемки можно отнести систематичное, оперативное получение информации об обширных участках поверхности Земли в различных спектральных диапазонах. Сохранение в цифровом виде и использование компьютеров для их обработки и анализа этой информации обеспечивают быстрое получение результатов. Благодаря космической съемке можно получить данные о труднодоступных областях. Так как космические снимки охватывают большие области, их можно применять для региональных исследований. Регулярность съемки позволяет проводить мониторинг сельскохозяйственных культур, водных ресурсов, объектов, которые изменяются под воздействием природных и антропогенных факторов.

2.2 Космическая съемка в тепловом диапазоне

Съемка в тепловом диапазоне ИК-спектра основана на регистрации суммарного эффекта собственного излучения Земли, отраженного солнечного излучения, поглощенного и трансформированного солнечного излучения, а также техногенного излучения. Тепловое излучение, может быть обнаружено приёмниками теплового излучения и преобразовано в видимое изображение, при этом такая съемка может осуществляться как в дневное, так и в ночное время.

История развития ДЗЗ в тепловом диапазоне началась в прошлом столетии, во время второй мировой войны, когда были разработаны чувствительные к ИК-излучению приборы. В 1950 году цветную инфракрасную пленку начали применять для составления карт растительности. Следующим шагом была установка датчиков на космические аппараты: первые мультиспектральные снимки были получены американцами с борта КА Apollon 6 в ходе военной разведки 1960-х годов.

В настоящее время, по данным ДЗЗ доступно изучение суточной динамики тепловых характеристик различных объектов земной поверхности, позволяющее оценивать изменение амплитуды их температур, выявлять объекты, формирующие тепловые аномалии. При этом сегодня основными «поставщиками» космической съемки в тепловом диапазоне являются Landsat 7, 8, Terra ASTER/MODIS, Sentinel 3, Канопус-В и др. К важным характеристикам съемочной аппаратуры этих КА относят пространственное, радиометрическое, спектральное и временное разрешение.

Пространственное разрешение характеризует линейные размеры пикселя на местности, в метрах. *Радиометрическое разрешение* – число градаций яркости, которое способен зарегистрировать сенсор для отдельного пикселя снимка (измеряется в битах). *Спектральное разрешение* определяется количеством каналов съемки и их спектральными диапазонами в нм (10^{-9} м)

или мкм (10^{-6} м). *Временное разрешение* – это периодичность повторения съемки одной и той же территории, в сутках.

Рассмотрим подробнее характеристики основных съемочных систем, поставляющих данные ДЗЗ в тепловом диапазоне.

Космический аппарат **Landsat 5** производил съемку с 1984 по 2011 года. Он был оснащен двумя оптико-механическими сканерами – MSS (Multispectral Scanner) и TM (Thematic Mapper). Последний производил съемку в 7 спектральных диапазонах с пространственным разрешением 30 метров для каналов 1 - 5, 7 и 120 м – для теплового канала (№ 6). Ширина полосы обзора составляла 185 км. Временное разрешение – 16 дней. Радиометрическое разрешение – 8 бит [28].

Космический аппарат **Landsat 7**, запущенный 15 апреля 1999 г., снабжен аппаратурой ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus – усовершенствованный тематический картограф), которая обеспечивает съемку земной поверхности в четырех режимах: VNIR (Visible and Near Infrared – мультиспектральный видимый и ближний инфракрасный диапазон), SWIR (Shortwave Infrared - средний инфракрасный диапазон), PAN (panchromatic - панхроматический диапазон), TIR (thermal infrared - тепловой инфракрасный диапазон). Съемка земной поверхности происходит в 6 каналах, пространственное разрешение – 30 м, в тепловом инфракрасным (ИК) канале пространственное разрешение составляет 60 м. Ширина полосы обзора для всех каналов - 185 км. Временное разрешение - 16 дней. Радиометрическое разрешение - 8 бит [29].

Космический аппарат **Landsat 8** продолжил выполнение программы Landsat с апреля 2013 г. На его борту установлены два сенсора: оптико-электронный OLI (Operational Land Imager) и тепловой TIRS (Thermal InfraRed Sensor). Радиометр OLI позволяет получать изображения земной поверхности с максимальным разрешением 15 м. ИК - радиометр TIRS предназначен для получения «теплового» изображения земной поверхности с разрешением 100 м. Ширина полосы обзора для всех каналов – 185 км. Временное разрешение - 16 дней. Радиометрическое разрешение - 8 бит [30].

Радиометр ***ASTER*** установлен на борту КА Terra, серии EOS, запущенного в 2000 г. Этот прибор позволяет проводить съемку земной поверхности в 14 каналах, с пространственным разрешением от 15 до 90 м. Космические снимки, получаемые аппаратурой ASTER, имеют 14 спектральных диапазонов: 3 – в видимом и ближнем ИК-излучении, 6 – в среднем ИК и 5 – в тепловом излучении, с пространственным разрешением соответственно 15, 30 и 90 метров на пиксель. Ширина полосы обзора для всех каналов составляет 60 км. Временное разрешение – 16 дней. Радиометрическое разрешение – 8 бит [32].

Sentinel-3 - космический аппарат, основной целью которого является наблюдение за топографией поверхности океана, температурой поверхности моря и суши с высокой степенью точности. Его инновационное оборудование включает в себя три сенсора: OLCI, позволяющий производить съемку в видимом и ближнем ИК спектрах; двухчастотный радар SRAL и радиометр SLSTR, наиболее интересный с точки зрения данной работы. SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) производит измерения в 9 спектральных каналах и 2 дополнительных каналах, оптимизированных для мониторинга пожаров. Пространственное разрешение в видимой и инфракрасной коротковолновой зоне спектра – 500 м, а в тепловых инфракрасных каналах – 1 км. Измерения температуры происходит с высокой точностью (± 0,3 К), в том числе с учетом атмосферной коррекции [31].

Канопус-В осуществляет ДЗЗ в высоком разрешении, предназначенный для оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций. Запуск спутника был осуществлен 22 июля 2012 г. В 2017 г. был запущен еще один спутник серии - «Канопус-В-ИК». Особенностью этого спутника является дополнительный прибор – многоканальный радиометр среднего (3,5-4,1мкм) и дальнего (8,4-9,4 мкм) инфракрасных диапазонов с полосой захвата в 2000 км. Главным достоинством прибора является его способность обнаруживать малоразмерные очаги пожаров площадью от 25 м^2. Канопусы поставляют снимки в 6 спектральных диапазонах с пространственным 10,5 метров на пиксель.

Временное разрешение съемки - 4-16 дней. Радиометрическое разрешение - 2 бит [33].

2.3 Методика выявления, картографирования и анализа тепловых аномалий по данным ДЗЗ

Тепловые характеристики ландшафтных комплексов определяются внутренними и внешними факторами: 1) эндогенное тепло земли; 2) общие особенности циркуляции воздушных масс; 3) региональные и локальные условиях инсоляции; 4) циркуляции подземных вод; 5) тепловые свойства литогенной основы ландшафта; 6) химические и биологические процессы [15].

Тепловые характеристики ландшафтных комплексов могут являться индикаторами различных процессов и явлений на территории исследования. Одним из дистанционных методов геотермического картографирования является аэрокосмическая съемка в инфракрасной (ИК) области спектра. Как правило, съемка производится в средней (SWIR) и дальней (TIR) частях (ИК) области спектра (1,5-3,0 и более 3,0 мкм, соответственно). Интенсивность излучения в основном обусловлена тепловым состоянием излучающей поверхности. Температура поверхности, характеризует пространственную дифференциацию теплового поля и является достаточно информативной при решении широкого спектра задач. На основании данных ДЗЗ могут быть также рассчитаны разновременные геотермические показатели, такие как температурный контраст [15].

На основе анализа характеристик открытых тепловых космических снимков, приведенных нами в предыдущем разделе, можно заключить, что для выявления и мониторинга источников теплового загрязнения в городе Воронеже наиболее подходят данные с КА Landsat 8, сенсор TIRS. Эта съемочная система обладает сравнительно высоким пространственным и временным разрешением, а также максимальным радиометрическом разрешением среди представленных источников. Кроме того, она является наиболее актуальной по дате ввода в эксплуатацию и, следовательно, обладает

более высоким потенциалом для проведения дальнейших мониторинговых исследований. Мы выбрали Landsat 8 TIRS в качестве основного источника для исследования теплового острова Воронежа в летний и зимний сезоны. Съемка исследуемой территории данным КА производится регулярно один раз в 16 дней приблизительно в 11 часов 20 минут по местному времени, независимо от погодных условий.

Данный факт ограничивает число максимально возможных снимков до 5-6 за интересующий сезон одного года, что с учетом редких безоблачных дней сокращает до единиц число подходящих по качеству снимков. Ввиду этого, мы использовали снимки за разные годы, выполненные в рамках интересующих сезонов. Исключение составляет лето 2015 года, за которое, по уникальному стечению обстоятельств, КА Landsat 8 сделал пять безоблачных снимков интересующей территории (таблица 3). Это послужило поводом для проведения ряда исследований территории Воронежа с применением серии этих снимков, в том числе и исследование теплового острова, в результате которого была разработана авторская методика выявления и анализа источников теплового загрязнения [25, 38]. В частности, было выполнено картографирование структуры теплового острова города Воронежа, выявлены тепловые аномалии и оценена их стабильность в ходе летнего сезона 2015 года [25, 38]. В рамках данной выпускной квалификационной работы предпринята попытка дополнить эти исследования: мы провели аналогичную работу по анализу теплового острова по данным Landsat 8 TIRS, но за зимний период, а также исследовали тепловые аномалии в ночное время летом по данным Terra Aster.

В целом, методика выполненных работ полностью базируется на ранее указанных публикациях - [25, 38]. Так, исходные данные - сцены мультиспектральной космической съемки с КА Landsat 8 и Terra ASTER - мы отбирали и загружали с помощью сервиса EarthExplorer из архива Геологической службы США [14]. Загруженные данные обрабатывали следующим образом: для отдельных каналов сцен съемки производили перевод

условных единиц спектральной яркости пикселей (Digital Number) в физические единицы в (градусы Цельсия) посредством Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) в открытой геоинформационной среде QGIS 3.10. Далее с помощью калькулятора растров, производили усреднение значений температур между каналами на каждую дату, а затем вычисление средних температур за весь сезон и определение коэффициентов ее вариации попиксельно. По полученным слоям выявляли тепловые аномалии исследуемой территории визуально и количественно: по выбранной пороговой изотерме с учетом коэффициента вариации температуры для оконтуренных аномально теплых областей.

Отличия от методики [25, 38] связаны с тем, что мы были вынуждены использовать данные за разные годы, отличавшиеся меньшей надежностью вследствие изменений ландшафта во времени. Кроме того, анализ снимков за зимний период, а также анализ данных другой съемочной системы (Terra Aster) за ночное время, также внесли определенные изменения в методику работ. В следующей главе мы детально рассмотрим особенности методик и полученные результаты в рамках каждого конкретного случая.

3 Космический мониторинг теплового острова города Воронежа

3.1 Источники теплового загрязнения зимой

Для исследования и мониторинга тепловых загрязнений окружающей среды от промышленных предприятий г. Воронежа (рис.1) в холодный сезон, путем сравнения открытых источников космических снимков, было установлено, что наиболее подходящие данные с космического аппарата Landsat 8 TIRS (Thermal Infrared Sensor) Level - 1, в частности, тепловые каналы № 10 (10.30 - 11.30 нм) и №11 (11.50 - 12.50 нм) с разрешением 100 м на пиксель.

Из архива геологической службы США были выбраны все снимки для города Воронеж и его окрестностей, сделанные спутником Landsat 8 за холодный сезон – в период с 2014 по 2018 гг. [14]. Важнейшим критерием при отборе снимков было отсутствие облачности над исследуемой территорией, так как облака способны сильно занижать значения температуры для закрытого участка подстилающей поверхности. Отбор снимков производился с помощью соответствующих фильтров сервиса по облачности в информационной системе архива (допускалось до 20% проективного покрытия облаками по периферии изображения) и последующим визуальным осмотром выборки снимков на предмет отсутствия облачности над исследуемой областью.

Снимки отбирались за период с начала работы спутника – с апреля 2013 по февраль 2020 годов включительно. Для исследуемой территории в итоге были отобраны 5 снимков за холодный сезон (январь – март), идентификаторы сцен приведены в таблице 1. Съемки производилась приблизительно в 11:20 утра по местному времени. На качество снимков сильно влияют метеорологические параметры на момент съемки. Основными таким параметрами являются: температура воздуха, скорость ветра. Данные о погодных условиях были взяты с сайта rp5.ru по метеостанции в городе Воронеже (таблица 1).

Таблица 1. Идентификаторы сцен

№	Идентификатор сцены	Дата съемки	Метеорологические параметры*	
			Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с
1	LC81760242018053LGN00	22.02.2018	- 8	2
2	LC81760242014058LGN01	27.02.2014	+3	5
3	LC81760242018085LGN00	26.03.2018	+3	4
4	LC81760242017034LGN00	03.02.2017	- 11	2
5	LC81760242014026LGN02	26.01.2014	- 14	2

* - *данные метеостанции 34123 «Воронеж» на 12:00 по местному времени*

Обработка данных выполнялась в среде QGIS 3.10 с применением модуля SCP. Сначала была произведена радиометрическая калибровка тепловых каналов (№ 10 и № 11) отобранных сцен, а затем усреднение значений по этим каналам.

В результате радиометрической калибровки - значения переводятся в физические единицы, тем самым устраняется влияние различий освещенности, обусловленной геометрией съемки, атмосферой, рельефом, дефектами изображения.

В результате были получены пять растровых слоев, отображающих распределение температур подстилающей поверхности города Воронежа и его окрестностей по состоянию на 26.01.2014г., 27.02.2014 г., 03.02.2017 г., 22.02.2018 г. и 26.03.2018 г.

Обработанные таким образом снимки были обрезаны по границе исследуемой территории. Следующий этап: растровые слои были объединены в мультивременной композитный слой, и с помощью калькулятора растров для каждого пикселя рассчитано среднее значение температуры за холодный период (рис.4) и коэффициент ее вариации (рис.5). Это позволило, выявить тепловые аномалии, произвести их детальное картографирование с

использованием дополнительных картографических ресурсов (данные OpenStreetMap).

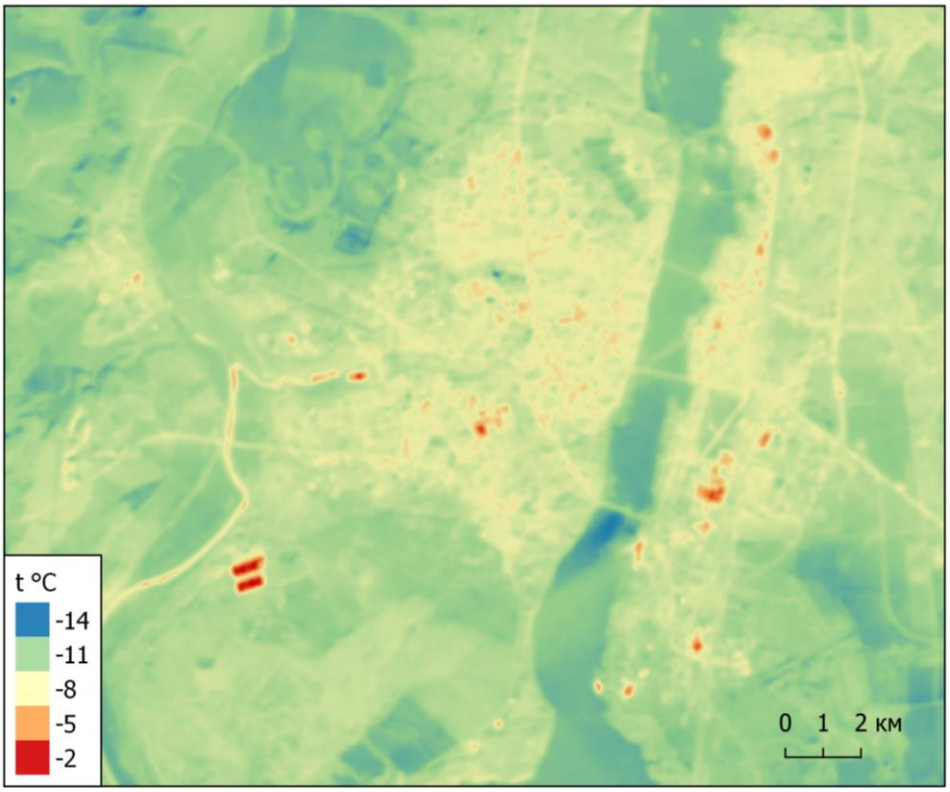

Рис. 4. Карта распределения значений температур

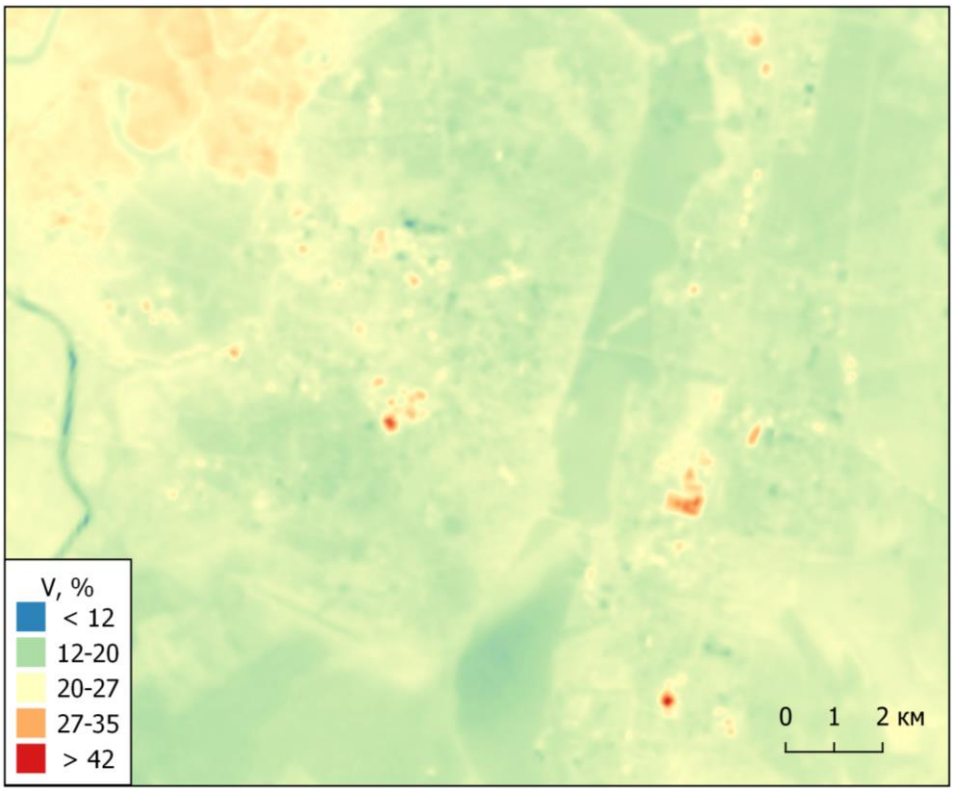

Рис. 5. Карта коэффициента вариаций температур подстилающей поверхности

Оранжевые пятна с красными вкраплениями на рисунке 4 отображают источники теплового загрязнения от промышленных зон, причем красные пятна - это в основном отдельные сооружения, где происходят постоянные эмиссии тепла. Поверхностные температуры в холодный сезон для данных объектов могут составлять в среднем на 7-9 градусов С° выше средней температуры непромышленной городской застройки.

Карта коэффициентов вариации температур (рис. 5) рассчитана по тем же снимкам и показывает относительную стабильность распределения температур в рассматриваемый сезон для города Воронежа на моменты съемки.

На основе слоя средних температурных значений и плагина QuickMapServices, который предоставляет базовые карты местности, были выявлены источники теплового загрязнения г. Воронежа в холодный период по условно выбранной изотерме в -6 °С (рис. 6).

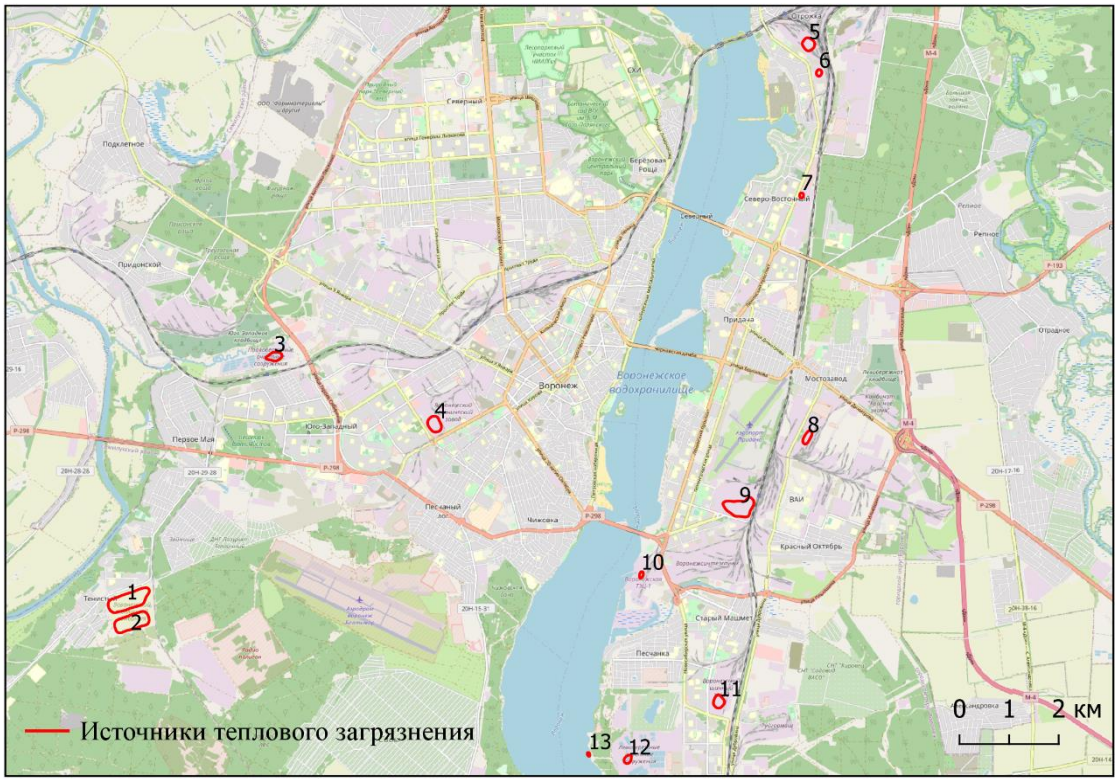

Рис. 6. Карта расположения источников теплового загрязнения в холодный период, по изотерме -6°С. Номера объектов на карте соответствуют номерам строк с их описанием в таблице 2

Выделенные стабильные источники теплового загрязнения с температурой не больше -6°С, совпали с местоположением строений, отдельных цехов или объектов инфраструктуры. Для обеспечения мониторинга были получены координаты выявленных источников теплового загрязнения, данные по ним представлены в таблице 2.

Таблица 2. Источники теплового загрязнения г. Воронеже зимой

№	Адрес	Координаты		Источник теплового загрязнения
		X	Y	
1	ул. Тепличная, 1	51.6211	39.0752	Здания Воронежского тепличного комбината
2	ул. Тепличная, 1	51.6173	39.0761	Здания Воронежского тепличного комбината
3	ул. Антакольского	51.6659	39.1173	Правобережные очистные сооружения
4	ул. Ворошилова, 22	51.6533	39.1645	Воронежский механический завод
5	пер. Богдана Хмельницкого, 1	51.7231	39.2738	Воронежский вагоноремонтный завод
6	ул. Богдана Хмельницкого, 51А	51.7177	39.2771	Здания «Мебель Черноземья»
7	Ленинский пр-т., 172	51.6952	39.2716	Стеклотарный завод «Раско»
8	ул. Волгоградская, 39	51.6508	39.2733	Воронежстальмост
9	ул. Циолковского, 27	51.6381	39.2543	ВАСО Корпус № 43,45
10	ул. Лебедева, 2	51.6257	39.2247	Воронежская ТЭЦ- 1
11	ул. Ростовская, 41	51.6026	39.2474	Промзона Воронежского шинного завода
12	ул. Балашовская, 29	51.5928	39.2093	Левобережные очистные сооружения
13	Левобережный район	51.5928	39.2098	Места сброса воды с Левобережных очистных сооружений

Из полученной таблицы видно, что предполагаемые объекты промышленных предприятий, перечисленные в разделе 1.3 относятся к

источником теплового загрязнения. Особенно стоит выделить: Воронежский механический завод, Воронежский шинный завод, корпуса ВАСО № 43,45 – так как на территории этих предприятий по данным ДЗЗ наблюдаются стабильные эмиссии тепла.

Зимой и весной повышенные температуры в городе, возможно, связаны не только с отоплением, но и вывозом снега. Это значительно уменьшает затраты тепла на таяние снега, испарение и способствует раннему прогреву покрытий дорог и тротуаров. Также весной солнечные лучи освещают стены зданий под большим углом, чем горизонтальные поверхности. Поскольку здания строятся с учетом оптимальной освещенности, то они как большие батареи, способствуют конвекции. Кроме того, солнечные лучи, отражаясь от стёкол, вызывают дополнительное освещение и нагрев подстилающей поверхности [21].

3.1 Источники теплового загрязнения летом

Анализ теплового острова за летний сезон, как уже отмечалось, был выполнен ранее [25, 38] и здесь мы цитируем данные этих исследований для полноты картины сезонной динамики теплового острова города Воронежа. Сведения по использованным снимкам приведены в таблице 3.

После объединения слоев в мультивременной композитный слой была получена карта с распределением средних температур подстилающей поверхности (рис.7). На ее основе и подгруженной с помощью модуля QuickMapServices карты города, мы получили месторасположение объектов температурных аномалий (рис.8).

Анализ полученных изображений позволяет определить местоположение источников теплового загрязнения с высокой температурой поверхности от +35°С и выше в Воронеже в течение всего сезона (таблица 4).

Таблица 3. Идентификаторы сцен за теплый сезон 2015 г. (табл. по [35])

№	Идентификатор сцены	Дата съемки	Метеорологические параметры*	
			Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с
1	LC81760242015141LGN00	21.05	+22,5	2
2	LC81760242015157LGN00	06.06	+19,8	5
3	LC81760242015189LGN00	08.07	+25,1	5
4	LC81760242015221LGN00	09.08	+29,5	2
5	LC81760242015237LGN00	25.08	+20,5	3

** - съемка в указанные даты производилась приблизительно в 11:17 утра по местному времени.*

***- данные метеостанции 34123 «Воронеж» на 12:00 по местному времени*

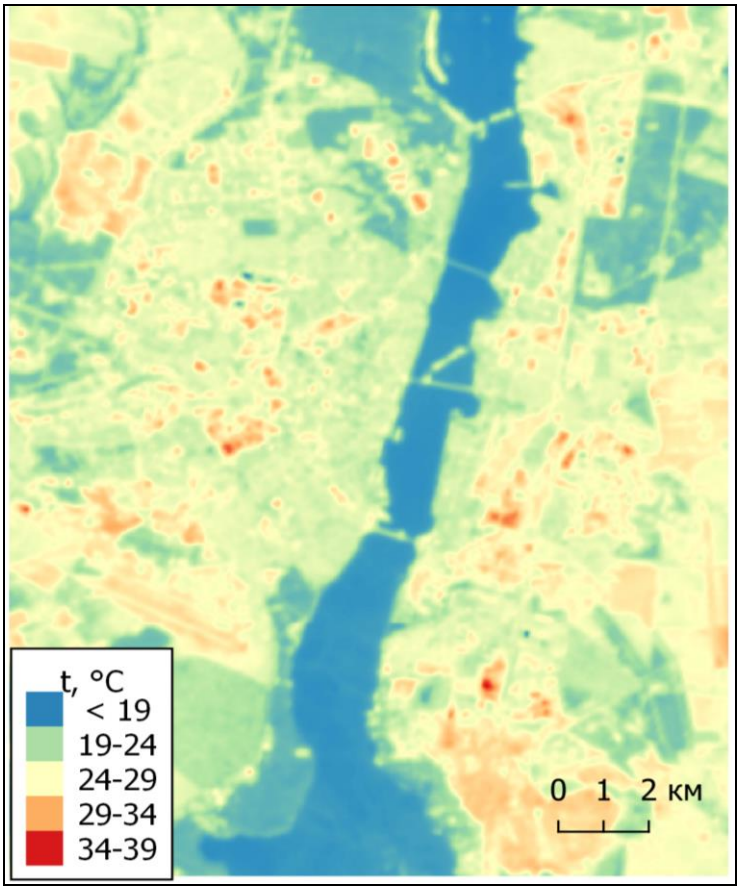

Рис. 7. Карта средних температур подстилающей поверхности в летний период (рис. по [35])

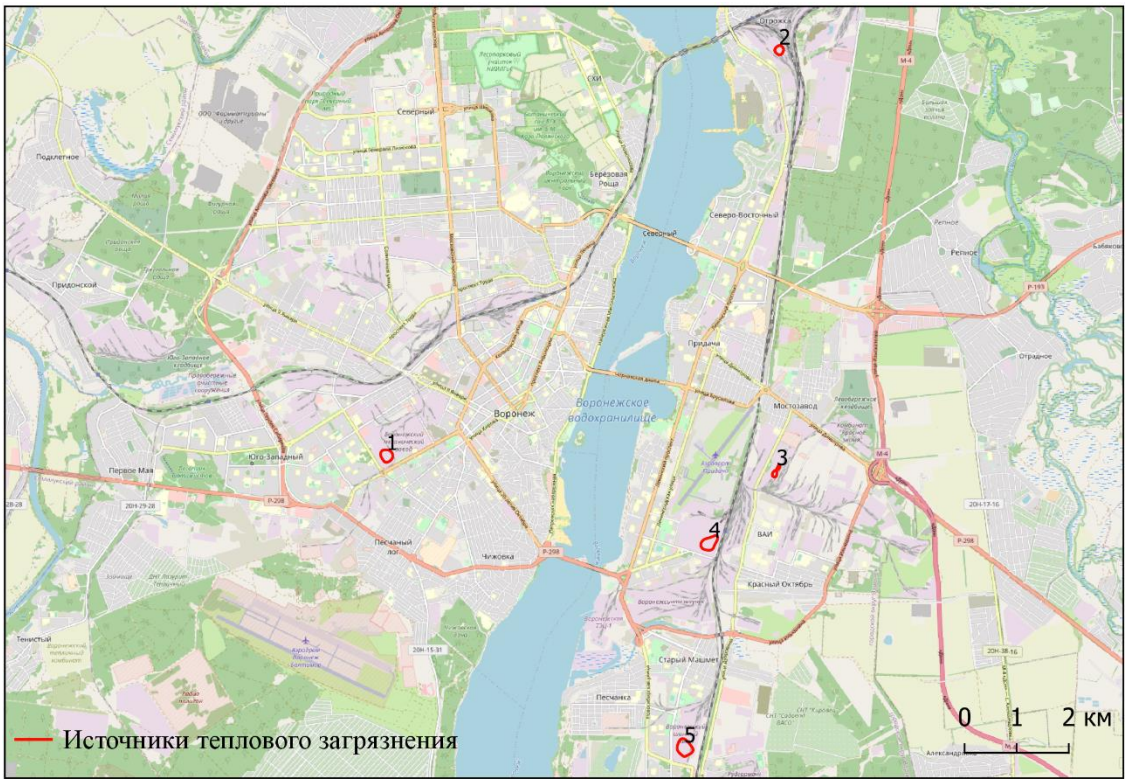

Рис. 8. Карта расположения источников теплового загрязнения летом, по изотерме +35°С. Номера объектов на карте соответствуют таблице 4

Таблица 4. Координаты источников теплового загрязнения г. Воронежа в летнее время

№	Адрес	Координаты X	Координаты Y	Источник теплового загрязнения
1	ул. Ворошилова, 22	51.6533	39.1645	Воронежский механический завод
2	пер. Богдана Хмельницкого, 1	51.7231	39.2738	Воронежский вагоноремонтный завод
3	ул. Волгоградская, 39	51.6508	39.2733	Воронежстальмост
4	ул. Циолковского, 27	51.6381	39.2543	ВАСО Корпус № 45
5	ул. Ростовская, 41	51.6026	39.2474	Промзона Воронежского шинного завода

Проведенный анализ полученного картографического материала также показал, что в летний период температура воздуха в условиях городской застройки отличается от фоновых характеристик в среднем на 4,5-5°С; причем, наименьшие вариации температуры наблюдаются в «частном секторе» и на территории застройки средней плотности с достаточным озеленением, а наиболее высокие – на открытых пространствах, вблизи проезжей части крупных дорог, либо на участках плотной высокоэтажной застройки, где минимально внутриквартальное озеленение [26].

3.3 Источники теплового загрязнения ночью

Из архива геологической службы США были также выбраны все снимки для города Воронежа и его окрестностей, сделанные спутником Terra Aster в ночное время за теплый сезон – в период с 2011 по 2017 гг., уровня обработки 1T (радиометрическая и геометрическая коррекция) [14]. С помощью сервисных фильтров были отобраны только ночные снимки с облачностью менее 10%, которые были сняты в летние месяцы.

Таким образом, 5 снимков были выбраны для исследуемой территории. Метеорологические параметры, такие как температура воздуха, скорость ветра, влажность и осадки за 2 дня до съемки, сильно влияют на качество и свойства снимков. Идентификаторы выбранных сцен, даты их создания, а также данные о погодных условиях представлены в таблице 5.

По методике [25, 38], были созданы растровые слои с пространственным разрешением 90 м, отображающие распределение температур подстилающей поверхности города Воронежа и его окрестностей по состоянию на 13.06.2015, 02.07.2017, 15.07.2016, 14.08.2015, 28.08.2011 приблизительно в 22:15 по местному времени. Эти слои были объединены в мультивременной композитный слой, после чего были созданы слои средних температур подстилающей поверхности в ночное время и коэффициент вариации температур. Фрагменты этих слоев представлены на рисунках 9 и 10.

Таблица 5. Сцены космической съемки Terra Aster и метеорологические условия съемки

№	Идентификатор сцены	Дата съемки*	Метеорологические параметры**			
			Температура воздуха, °C	Скорость ветра, м/с	Влажность воздуха, %	Осадки за 48 ч до съемки, мм
1	AST_L1T_00306132015190437_20150615203154_13854	13.06.2015	+23,6	1	39	нет
2	AST_L1T_00307022017191602_20170804160901_10534	02.07.2017	+15	4	60	8
3	AST_L1T_00307152016191651_20160716070719_873	15.07.2016	+26,7	штиль	61	нет
4	AST_L1T_00308142015191702_20150815144243_9557	14.08.2015	+21,4	1	65	нет
5	AST_L1T_00308282011190921_20150607094707_6520	28.08.2011	18,9	1	55	нет

** - съемка в указанные даты производилась приблизительно в 22:09 вечера по местному времени.*

*** - данные метеостанции 34123 «Воронеж» на 21:00 по местному времени (за исключением осадков, наличие которых определялось за 24 - часовой период, предшествующий съемке), данные получены с веб - сервиса rp5.ru*

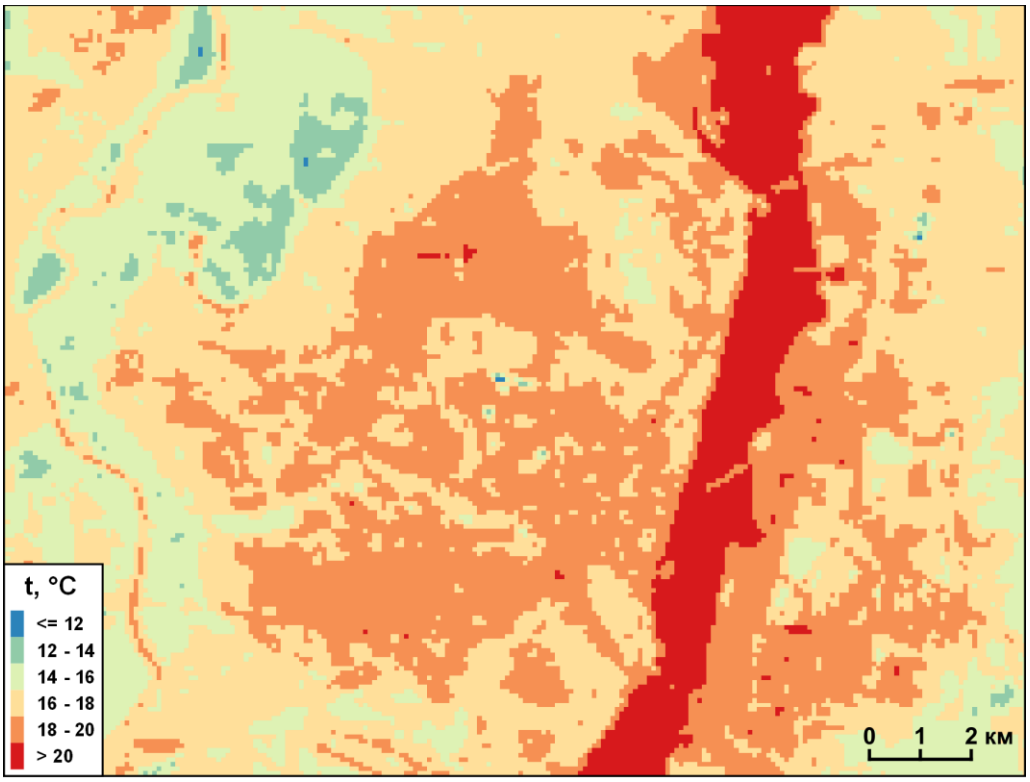

Рис. 9. Карта средних температур подстилающей поверхности города Воронежа в ночное время

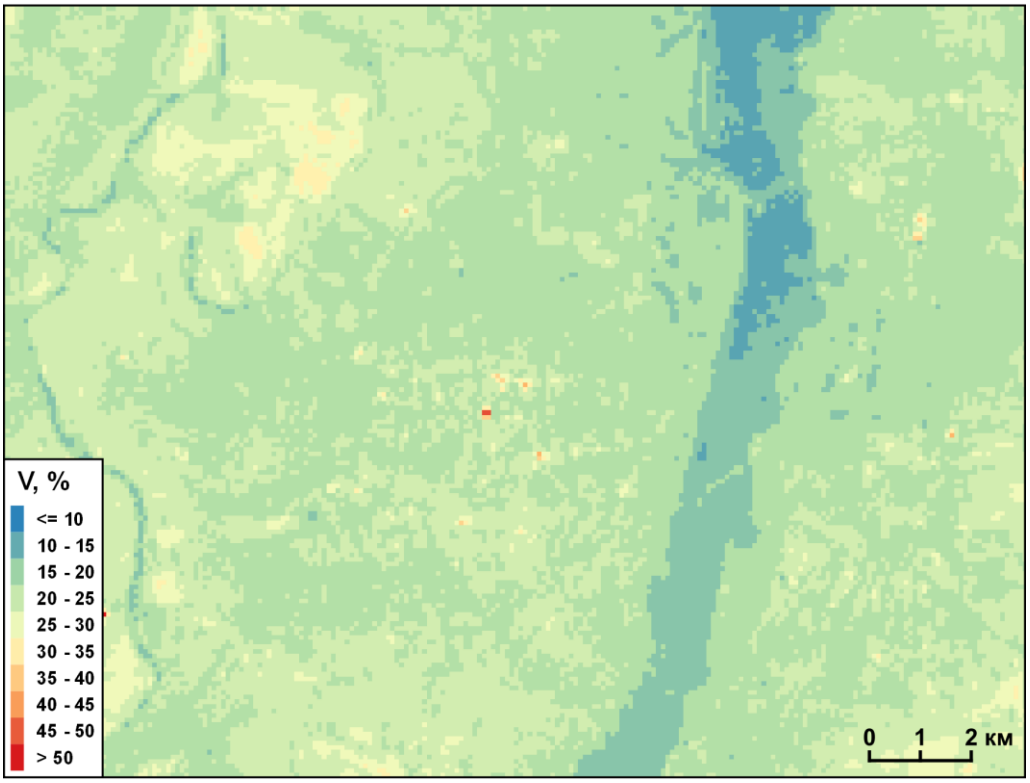

Рис. 10. Карта стабильности теплового острова по коэффициенту вариации температур

Поверхностные температуры в летние вечера для промышленных источников теплового загрязнения, по полученным данным, начинаются приблизительно от +19°С. Кроме того акватория Воронежского водохранилища является заметным источником тепла, вследствие более медленного процесса остывания поверхностных вод чем у других объектов, аккумулировавших тепло в течение предшествующего светового периода.

По полученному слою средних температур выявили промышленные источники теплового загрязнения (рис.11) и установили их координаты (таблице 6). В целом, полученные данные соответствуют картине распределения источников теплового загрязнения, выявленной для летних и зимних периодов.

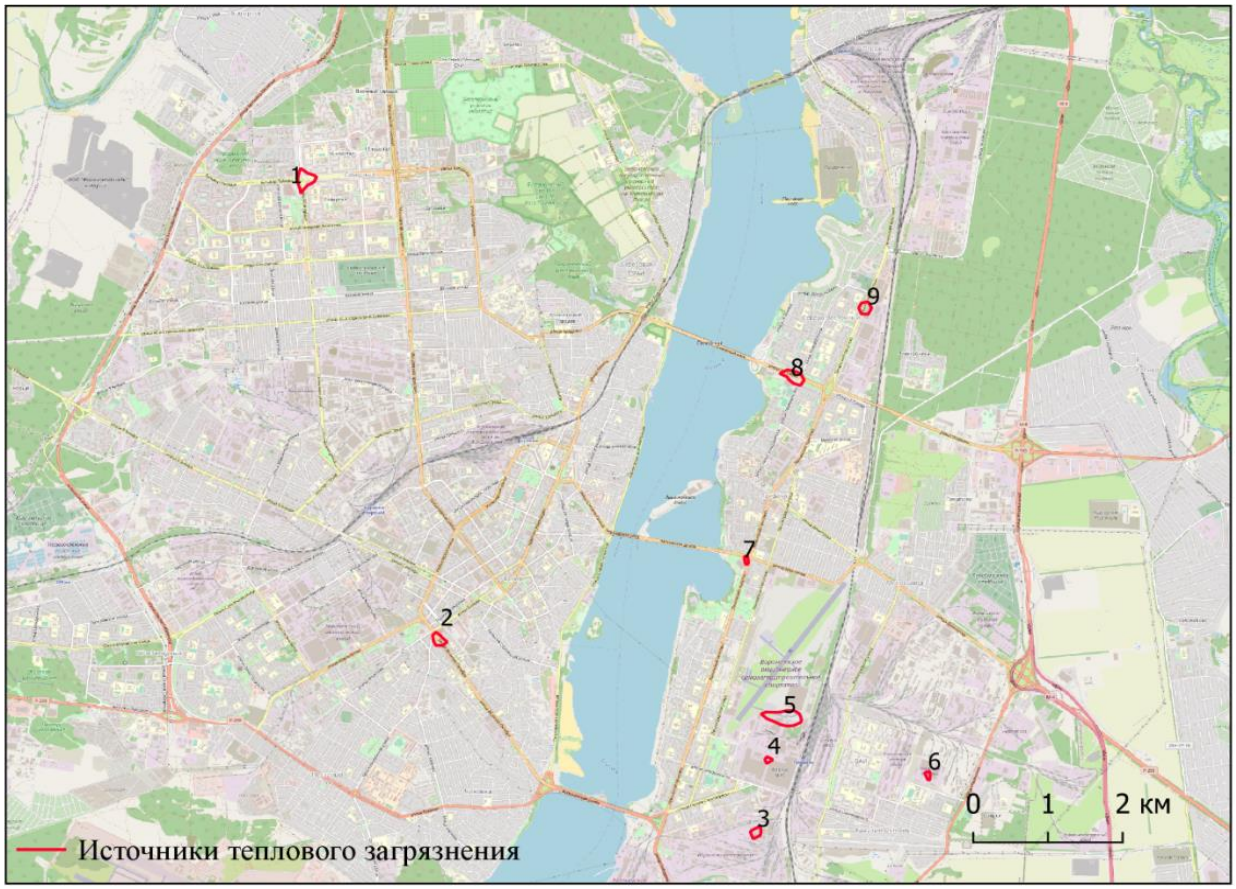

Рис. 11. Карта расположения источников теплового загрязнения в теплый период ночью. Номера объектов на карте соответствуют номерам строк с их описанием в таблице 6

Таблица 6. Координаты ночных источников теплового загрязнения за теплый сезон

№	Адрес	Координаты X	Координаты Y	Источник теплового загрязнения
1	ул, б-р Победы, 23Б	51.7111	39.1604	Вентиляционная система ТРК «Арена»
2	ул. 20-летия Октября, 90	51.6555	39.1883	Вентиляционная система ТЦ «Солнечный рай»
3	Левобережный район	51.6307	39.2496	Воронежсинтезкаучук цеха ДК-2А, ДК- 1.4
4	ул. Циолковского, 27	51.6381	39.2543	ВАСО Корпус № 45
5	ул. Циолковского, 27	51.6450	39.2550	ВАСО
6	ул. Иркутская, 1Б	51.6380	39.2831	Склад Ален-Агро
7	Ленинский пр-т., 95б	51.6641	39.2468	Вентиляционная система ТЦ «Европа»
8	ул. Переверткина, 7	51.6866	39.2568	Вентиляционная система гипермаркета «Линия»
9	Ленинский пр-т., 174П	51.6962	39.2720	Вентиляционная система ТРЦ «Максимир»

Заключение

В результате проведенного исследования, на основе серий разновременных космических снимков Landsat 8 TIRS и Terra Aster выполнено детальное геоинформационное картографирование источников теплового антропогенного загрязнения окружающей среды в городе Воронеже за теплый, холодный период, а также выполнено картографирование источников теплового антропогенного загрязнения в ночное время теплого сезона.

Полученные данные позволили выявить круглогодично стабильные источники теплового загрязнения, характерные для промышленных зон предприятий: «Воронежский механический завод» - филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», «Воронежский шинный завод», ПАО «Воронежское акционерное самолётостроительное общество», АО «Воронежстальмост», Воронежский вагоноремонтный завод филиал АО "ВАГОНРЕММАШ".

Данные промышленные предприятия вносят основной вклад в формирование «теплового острова» города Воронежа, они оказывают негативное антропогенное воздействие на окружающую среду города, так как именно в их промышленных зонах происходят постоянные эмиссии тепла.

В целом по тепловому острову города Воронежа можно сделать следующие выводы:

1. Сильнее прогревается правобережье города на водоразделах, где отклонение от значений стационарных метеостанций достигает от 3,5 до 8°С.

2. Наиболее высокие температуры характерны для исторического центра города (до 37°С), юго-восточной части Северного района ранней застройки (до 33°С), для района Берёзовой рощи (до 27°С).

3. Общее увеличение температуры воздуха левобережья днем направлено от водохранилища в сторону террас, в ночное время – в обратном направлении.

4. Наиболее прохладными участками территории города являются парки, пляжи, балки с древесным покрытием, массивы малоэтажной и среднеэтажной

застройки с системой индивидуального и внутриквартального озеленения [35, 36].

По результатам работы можно заключить, что космический мониторинг является эффективным средством обнаружения и оценки теплового загрязнения окружающей среды. Несмотря на сильную зависимость от качества тепловых снимков, подверженное множеству факторов, оперативность такого мониторинга компенсирует его минусы. Данные ДЗЗ в тепловом диапазоне также пригодны и для иных видов наблюдений: мониторинга тепловых природных явлений и антропогенных процессов, мониторинга опасных атмосферных явлений, оперативного автоматизированного выявления очагов пожаров, выявления мест сжигания попутного газа и ряда других задач.

Литература

1. Авессаломова И.С. Городские ландшафты / И.А. Авессаломова, В.А. Николаев, В. П. Чижова // Природно-антропогенные ландшафты: городские, рекреационные, садово- парковые. – М.: Географический факультет МГУ, 2011. - С. 4-50.

2. Алтынов А.Е. Спектрометрирование ландшафтов / А.Е. Алтынов, В.А. Малинников, С.М. Попов, А.Ф. Стеценко. - М.: «Репрография», 2010. - 20 с.

3. Балдина Е.А. Использование космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне для географических исследований / Е.А. Балдина, М.Ю. Грищенко, Ю.В. Федоркова. - М.: Мысль, 2012. - 120 с.

4. Балдина Е.А. Исследования городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном диапазоне / Е.А. Балдина, П.И. Константинов, М.Ю. Грищенко, М.И. Варенцов // Земля из космоса - наиболее эффективные решения. - 2015. - 26. - С. 38 - 42.

5. Балдина Е.А. Методика дешифрирования разновременных космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне / Е.А. Балдина, М.Ю. Грищенко. - М.: Мысль, 2014. - 42 с.

6. Владимиров В.М. Дистанционное зондирование Земли / В.М. Владимиров, Д.Д. Дмитриев. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. - 196 с.

7. Воробьёв С. Н. География Воронежской области / [Под ред. А. Б. Васильева] С. Н. Воробьёв, Ю. А. Нестеров, В. В. Подколзин, З. В. Пономарёва, В. Н. Сушков // Пособие для учителей и учащихся. - Воронеж: Воронежский Государственный Педагогический университет, 2007. - 127 с.

8. Воронеж: официальный сайт администрации городского округа. - Режим доступа: http://www.voronezh - city.ru/city/history/ (дата обращения 13.12.2019)

9. Воронежский вагоноремонтный завод филиал АО «ВАГОНРЕММАШ». - Режим доступа: http://www.vwrz.ru/about.html (дата обращения 13.12.2019)

10. Воронежский механический завод. - Режим доступа: http://vmzvrn.ru/o - predpriyatii/ (дата обращения 13.12.2019)

11.Воронежский шинный завод. - Режим доступа: https://www.pirelli.ru/tyres/ru - ru/company/about (дата обращения 13.12.2019)

12. Воронежское акционерное самолётостроительное общество. - Режим доступа: http://www.vaso.ru/index.php (дата обращения 13.12.2019)

13. Воронежстальмост. - Режим доступа: http://www.stalmost.ru/production/ (дата обращения 13.12.2019)

14. Геологическая служба США. - Режим доступа: https://earthexplorer.usgs.gov/ (дата обращения 17.10.2019)

15. Глотов А.А Геотермическое картографирвание долинно-речных ландшафтов Воронежской области / А.А. Глотов // Региональные эффект глобальных изменений климата (причины, последствия, прогнозы): Материалы международной научной конференции (г. Воронеж, 26-27 июня 2012 г.). - Воронеж: 2012. - С. 286-288.

16. Горный В. И. Космические измерительные методы инфракрасного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов / И.В. Горный // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. - 2004. - Т. 2. № 1. - С. 10-16.

17. Григорьева Е.А. Комфорт и здоровье человека в климатических условиях городской среды / Е.А. Григорьева // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогноза. Материалы международной научно- практической конференции (г. Воронеж, 3-5 октября 2019 г.) том 2. - Воронеж: 2019. - С. 320-322.

18. Гришин Г.Т. Воронеж: экономико-географическое исследование / Г.Т. Гришин, М. В. Гончаров, И. С. Шевцов и др. - Воронеж: Воронежский Государственный Университет, 1986. - 224 с.

19. Куролап С.А. Экологическая оценка микроклимата и риска для здоровья населения, связанный с изменением воздушного бассейна промышленного развития городов России и Германии / С.А. Куролап, Л.

Катишнер, О.В. Клепиков, И.В. Добрынина // Региональные эффект глобальных изменений климата (причины, последствия, прогнозы): Материалы международной научной конференции (г. Воронеж, 26-27 июня 2012г.). - Воронеж: 2012. - С. 409-414.

20. Ландсберг Г.Е. Климат города / Г.Е Ландсберг. - Ленинград: Гидрометеоиздат, 1983. - 248 с.

21. Литвиненко Л.Н. Сезонные различия в росте средней месячной температуры воздуха в малых и крупных городах / Л.Н. Литвиненко // Региональные эффект глобальных изменений климата (причины, последствия, прогнозы): Материалы международной научной конференции (г. Воронеж, 26 - 27 июня 2012 г.). - Воронеж: 2012. - С. 70-74.

22. Матвеев С.М. Динамика основных климатичесих показателей по данным наблюдения метеостанции «Воронеж» / С.М. Матвеев // Региональные эффект глобальных изменений климата (причины, последствия, прогнозы): Материалы международной научной конференции (г. Воронеж, 26-27 июня 2012 г.). - Воронеж: 2012. - С. 150-152.

23. Миронова В.А. Влияние региональных изменений климата и городского острова тепла на восстановление передачи трехдневной малярии в московском регионе 1999-2010 гг. / В.А. Миронова, Н.В. Шартова, М.И. Варенцов, Ф.И. Коренной, М.Ю. Грищенко // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогноза. Материалы международной научно - практической конференции (г. Воронеж, 3-5 октября 2019 г.) том 2. - Воронеж: 2019. - С. 260-263.

24. Попова И.В. Изучение городского «острова тепла» с помощью геоинформационного моделирования и дистанционного зондирования / И.В. Попова, Д.В. Сарычев, С.А. Куролап // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогноза. Материалы международной научно-практической конференции (г. Воронеж, 3-5 октября 2019 г.) том 2. - Воронеж: 2019. - С. 270-275.

25. Сарычев Д.В. Применение тепловых космических снимков для оценки моделей городского острова тепла / Д. В. Сарычев, И. В. Попова, С. А. Куролап // Геоинформационное картографирование в регионах России: материалы X Всероссийской научно-практической конференции (Воронеж, 14 - 16.11.2018). - Воронеж, 2018. - С. 142 - 150.

26. Скосарь А.Е. Экологические риски для населения города Воронежа, связанные с автотранспортным шумом и термическим комфортом / А.Е. Скосарь, С.А. Куролап, С.Н. Полякова, И.В. Попова // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогноза. Материалы международной научно-практической конференции (г. Воронеж, 3-5 октября 2019 г.) том 2. - Воронеж: 2019. - С. 295-298.

27. Стольберг Ф.В. Экология города / Ф.В. Стольберг. - Киев: Либра, 2000. – 464 с.

28. Технические характеристики КА Landsat-5. - Режим доступа: https://innoter.com/sputniki/landsat - 5/ (дата обращения 21.02.2020)

29. Технические характеристики КА Landsat-7. - Режим доступа: https://innoter.com/sputniki/landsat - 7/ (дата обращения 21.02.2020)

30. Технические характеристики КА Landsat-8. - Режим доступа: https://innoter.com/sputniki/landsat - 8/ (дата обращения 21.02.2020)

31. Технические характеристики КА Sentinel-3. - Режим доступа: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home (дата обращения 21.02.2020)

32. Технические характеристики КА Terra ASTER. - Режим доступа: http://www.scanex.ru/data/satellites/terra - aster/ (дата обращения 21.02.2020)

33. Технические характеристики КА Канопус-В и Канопус-В-ИК. - Режим доступа: https://innoter.com/sputniki/kanopus - v/ (дата обращения 21.02.2020)

34. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования земли / О.С. Токарев. - Томск: 2010. - 148 с.

35. Хрипякова В.Я. Микроклимат большого города / В.Я Хрипякова // Экологические проблемы крупного города. - Воронеж, 1999. - вып.7. - С. 81-98.

36. Хрипякова В.Я. Особенности термического режима больших городов (на примере г. Воронежа) // Я.В. Хрипякова, А.С.Гобунов / Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогноза. Материалы международной научно - практической конференции (г. Воронеж, 3-5 октября 2019 г.) том 2. - Воронеж: 2019. - С. 302-306.

37. Чандра А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош. - М.: Мысль, 2008. - 308 с.

38. Sarychev D.V. Verification of Urban Heat Island Microclimatic Model by Using Thermal Remote Sensing Data / D.V. Sarychev, S.A. Kurolap, I.V. Popova // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. - 272. - 2019. - P. 1-7

39. Schowenger R. Remote Sensing, Third Edition: Models and Methods for Image Processing / R. Schowenger - Academic Press, 2006. - 560 c.