

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Молоко Анна Сергеевна**

**Выпускная квалификационная работа**

**ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ  
ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ОСТРОВОВ ТЕПЛА НА  
УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

Основная образовательная программа бакалавриата:

Направление 05.04.03 «Картография и геоинформатика»

СВ.5020 «Картография и геоинформатика»

Профиль «Геоинформатика»

Научный руководитель:

к.г.н., доцент СПбГУ

Паниди Евгений Александрович

Рецензент: руководитель группы

геоинформационных технологий, ФГБУ

"Государственный гидрологический институт"

Казаков Эдуард Эдуардович

Санкт-Петербург

2020

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТРОВОВ ТЕПЛА НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ .....	5
1.1. Понятие урбанизированных территорий .....	5
1.2. Описание и характеристика островов тепла .....	7
1.3. Обзор ранее проведенных исследований .....	15
2. ОПИСАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	17
2.1. Обоснование выбора территорий для исследования .....	17
2.2. Физико-географическое описание территорий .....	18
2.2.1. Краснодар .....	18
2.2.2. Рязань .....	19
2.2.3. Москва .....	20
2.2.4. Санкт-Петербург .....	21
2.2.5. Казань .....	22
3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ .....	24
3.1. Характеристика материалов, использованных в исследовании .....	24
3.2. Методика проведения исследования .....	26
3.2.1. Выбор исходных данных .....	27
3.2.2. Радиометрическая коррекция .....	27
3.2.3. Атмосферная коррекция .....	29
3.2.4. Расчет температуры поверхности (Land Surface Temperature) .....	31
3.2.5. Обнаружение островов тепла .....	33
4. ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	37
4.1. Карта островов тепла города Краснодар .....	37
4.2. Карта островов тепла города Рязань .....	38
4.3. Карта островов тепла города Москва .....	39
4.4. Карта островов тепла города Санкт-Петербурга .....	42
4.5. Карта островов тепла города Казань .....	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	46
ЛИТЕРАТУРА .....	47

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день вопросы изменения климата и глобального потепления вызывают множество дискуссий, как у обычных людей, так и у научного сообщества. По данным Международной Метеорологической Организации каждое из последних трех десятилетий характеризовалось последовательно более высокой температурой поверхности Земли по сравнению с любым из предыдущих десятилетий, начиная с 1850 года (Стоккер, 2013). Одной из причин повышения температур является урбанизация, которая провоцирует антропогенное преобразование земной поверхности, а вследствие и изменения микроклимата городов и мегаполисов. Любая территория или участок территории, характеризующийся более высокой, в сравнении с окружающей местностью, температурой земной поверхности или воздуха называется «островом тепла». Анализ городских островов тепла - один из самых простых способов увидеть, как человеческое воздействие может изменить нашу планету.

Для наблюдения за островами тепла и их поведением, исследователи обычно пользуются двумя способами: измеряют температуры воздуха и поверхности. С помощью данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ), в частности, съемки в тепловом инфракрасном диапазоне появляется возможность оценить внутреннюю пространственную структуру городских островов тепла и проследить динамику во времени и пространстве локальных тепловых аномалий.

Цель работы состоит в выявлении остров городского тепла по данным дистанционного зондирования на отобранных территориях исследования.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

- изучить современные подходы обнаружения и анализа городских островов тепла;
- провести анализ основных физико-географических свойств объектов исследования;

- формализовать методику создания карт островов тепла с помощью данных спутниковой съемки;

- создать карты островов городского тепла и на их основе провести оценку распространения тепловых аномалий, а также проследить их динамику.

Объектом исследования работы являются территории пяти самых быстрорастущих городов России за 2019 год, по версии исследования аналитической группы «РБК»: Краснодар, Рязань, Москва, Санкт-Петербург и Казань.

Предметом исследования являются показатели динамики радиационных температур поверхности земли.

Также выражаю благодарность за неоценимую помощь в подготовке выпускной классификационной работы своему научному консультанту ст. преп. Поздняковой Н.А.

# 1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТРОВОВ ТЕПЛА НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

## 1.1. *Понятие урбанизированных территорий*

Урбанизация - многогранный глобальный социально-экономический процесс, связанный с научно-техническим развитием и концентрацией производительных сил и форм социального общения, повышением роли городов и распространением городского образа жизни. Поэтому уровень урбанизации является важнейшим фактором, определяющим характер расселения и структуру населенных пунктов. Повышение роли городов наблюдалось на всем протяжении истории человечества, но с 20 века начинается усиленная концентрация людей в городах, которая продолжается и сейчас. Исходя из данных отдела народонаселения Департамента по экономическим и социальным вопросам ООН, в 1900 г. Городское население составляло 13%, в 2000 г. – 47%, в 2014 г. – 54%, а к 2030 году будут проживать около 60% жителей Земли. В России данный показатель на 2014 год равен 74%, поскольку доля городского населения в экономически развитых странах выше.

Под урбанизацией понимают не только процесс появления крупных городов, но и их объединение – агломераций. Они являются важным этапом урбанизации, их скопления территориально сближаются и образуют урбанизированные районы, зоны и мегалополисы. Наибольшими в мире из них являются Токио – Иокогама (Япония), Джакарта (Индонезия) и Дели (Индия), а в России – Москва и Санкт-Петербург.

Пивоваров (1994), для современной урбанизации отметил следующие особенности:

- Концентрация, интенсификация, дифференциация и разнообразие городских видов деятельности в городах и агломерациях;
- Распространение вне центров и урбанизированных ареалов городского образа жизни;

- Развитие крупных городских агломераций;
- Усложнение форм и систем урбанизированного расселения: переход от точечных агломераций к линейным, к узловым, полосовым;
- Увеличение радиусов расселения в пределах агломераций и урбанизированных районов, связанных с местами приложения труда, зонами отдыха и т. д.

Территории городов называют урбанизированными, поскольку они занимают небольшую часть территории Земли, но концентрируют большую долю населения.

Урбанизированная территория – это участок суши, занятый поселением городского типа и связанный с ним производственными, транспортными и инженерными сооружениями. По типу планировочной структуры различают центрические, линейные и рассредоточенные территории. По территориальным особенностям – компактные, расчлененные и разобщенные. По численности населения – малые (до 50 тыс. жителей), средние (50–100), большие (100–250), крупные (250–500) и крупнейшие (более 500 тыс. жителей) города.

Вместе с этим формирование урбанизированных территорий сопровождается глубокими нарушениями в экологии. Эти участки представляют результат взаимодействия биотических и абиотических природных компонентов, техносферы и населения (Ситаров, Пустовойтов, 2000).

Если ранее крупные города были точками прогресса, индустриального развития, важнейшими экономическими и социальными центрами, то в наше время большая часть мегаполисов находится в развивающихся странах, которые не могут справиться с проблемами перенаселения.

## *1.2. Описание и характеристика островов тепла*

В границах городских поселений природные условия значительно отличаются от условий окружающей местности, там формируется особый микроклимат - климат приземного слоя воздуха отдельных участков городской территории. На этих участках уменьшается площадь зеленых насаждений, за счет увеличения площадей, покрытых асфальтом и другими покрытиями, и сооружениями. Это ведет к уменьшению испарения и увеличению температуры в центре городов. Также поднятию температуры способствует нагревание воздуха за счет тепловых выбросов от фабрик и заводов, иных предприятий, автотранспорта, несовершенства инженерных коммуникаций и теплопотери при отоплении учреждений и жилых зданий. Первые исследования теплового режима городов датируются еще в XIX в. тогда в науку было введено понятие «городского острова тепла» (Urban Heat Island, UHI) как температурной аномалии над центральной частью города, характеризуется повышенной по сравнению с периферией температурой воздуха. Этот термин в основном используется в отношении относительной теплоты температуры воздуха у поверхности земли или слою воздуха над ней (Howard, 1818).

Аномалии возникают из-за взаимодействия человека и природных систем, увеличения площади темных поверхностей и недостатка растительности.

Основными причинами изменения термического режима являются:

1. Диссипация в городское пространство тепловой энергии, вырабатываемой для теплоснабжения и производственных процессов;
2. Изменение интегрального альbedo поверхности города и увеличение поглощенной солнечной радиации в сравнении с фоновыми показателями;
3. Снижение затрат тепла на испарение воды с деятельной поверхности за счет сокращения площадей с открытым почвенным и растительным покровом и, как следствие, рост величин теплового баланса;
4. Сравнительно небольшие участки зеленых насаждений, оказывающих охлаждающее воздействие на поле температуры. Солнечная энергия

поглощается растениями и на фоне активной транспирации и преобразуется в живое вещество;

5. Снижение прозрачности атмосферы за счет техногенных примесей, уменьшение доли прямой и увеличение доли рассеянной солнечной радиации;

6. Ухудшение условий циркуляции приземного воздуха, турбулентности и, как следствие, уменьшение теплоотдачи городских поверхностей (Погорелов, 2016).

## Факторы, влияющие на образование островов тепла



Рис.1. Факторы, влияющие на образования островов тепла.

Эти факторы влияют на микроклимат города в одно и тоже время, но их вклад в разное время года и в различных климатических условиях различен. Они вызывают изменение естественного радиационного баланса, условий теплообмена, нарушение естественного круговорота воды. Все это определяет микроклиматическую изменчивость общеклиматических режимов в отдельных районах крупного города. Интенсивность острова тепла строго коррелирует с плотностью жителей, в основном потому, что человеческая деятельность потребляет энергию, которая затем выделяется в виде тепла в

атмосферу. Темные поверхности сохраняют энергию из-за низкого альбедо, повышая температуру здания и увеличивая потребность в охлаждении. Вечером то же тепло выделяется в воздух.

«Остров тепла» разрушается ветром или другими атмосферными осадками, но устойчив в безветрие. На высоте до нескольких сот метров по границам «острова» происходит циркуляция масс теплого и холодного воздуха. Вертикальная скорость воздушных потоков сравнительно небольшая. Например, у «острова» диаметром 10 км при скорости ветра 1 м/с в слое толщиной 500 м она составляет около 10 см/с (Луканин, Трофименко, 2001). В «острове тепла» давление атмосферного воздуха понижено. Это способствует притягиванию облаков верхних слоев атмосферы. Поэтому облака над городом расположены значительно ниже, чем над открытой местностью. Восходящие потоки воздуха образуют кучевую облачность. Образование «острова тепла» вызывает уменьшение притока солнечной радиации на территорию крупного города, увеличение количества атмосферных осадков, увеличение повторяемости туманов.

В США, Канаде и некоторых странах Европы были созданы специальные лаборатории или исследовательские группы, занимающиеся исключительно вопросами теплового загрязнения и эффекта УНІ. Это, например, Heat Island Group Lawrence Berkeley Laboratory (Беркли, Калифорния), пилотный проект УНІ стран Центральной Европы и ряд других.

На сегодняшний день было выделено 3 типа городских островов тепла по методу наблюдения или определению поверхности:

## Виды островов тепла

	Зона формирования	Методы измерения
Пограничные острова тепла (BLUHI)	Формирует тепловой «Шлейф» над городом	Датчики на высоких зданиях Шары и профили температуры
Навесной слой (CLUHI)	Формируется ниже линии крыш, включает антропогенное тепло	Сеть датчиков на разных уровнях
Наземные острова тепла (SUHI)	Формируется в наземном слое	Тепловые спутниковые данные

Рис.2. Основные виды островов тепла на урбанизированных территориях (Branea, 2016).

- 1) Пограничные острова тепла (BLUHI) полностью зависят от погоды, они выглядят как «шлейф» над городом, ориентированные по характеру ветра и находятся под его влиянием. В «шлейф» также входит тепло от крыш, вентиляционных отверстий и дымоходов. Существует всего девять обычных методов измерения этого типа городского острова тепла. Наиболее распространенный метод измерения - датчики температуры, установленные на самых высоких зданиях в городских и сельских районах. Второй метод - привязные шары и профили температуры, однако их функционал ограничен из-за авиации, штормов и ветров.

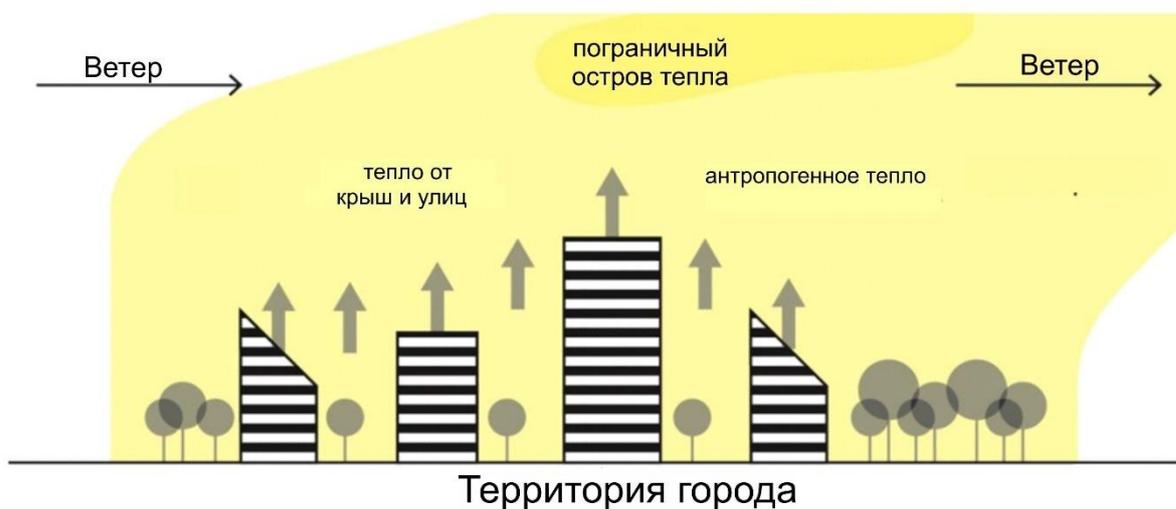


Рис.3. Схема размещения пограничных островов тепла (BLUHI) над территорией города (Branea, 2016).

- 2) Навесной слой (CLUHI) формируется под линией, проходящую через верхнюю часть каждого здания в городе, особенно через многоэтажки. Он образуется в результате поглощения солнечного излучения от поверхностей с низкой отражательной способностью и изолированных поверхностей, которые приводят к высокой дневной температуре. В этот вид также включают антропогенное тепло, влажность и загрязняющие вещества, но там практически отсутствует влияние местных ветров и турбулентности. CLUHI измеряется с помощью сети датчиков на стандартном или экранном уровне (Mills, 2004) (примерно 1-1,5 м). В общем в навесном слое остров тепла регистрирует свой максимум ночью при этом может быть небольшим или даже ниже нуля в течении дня.

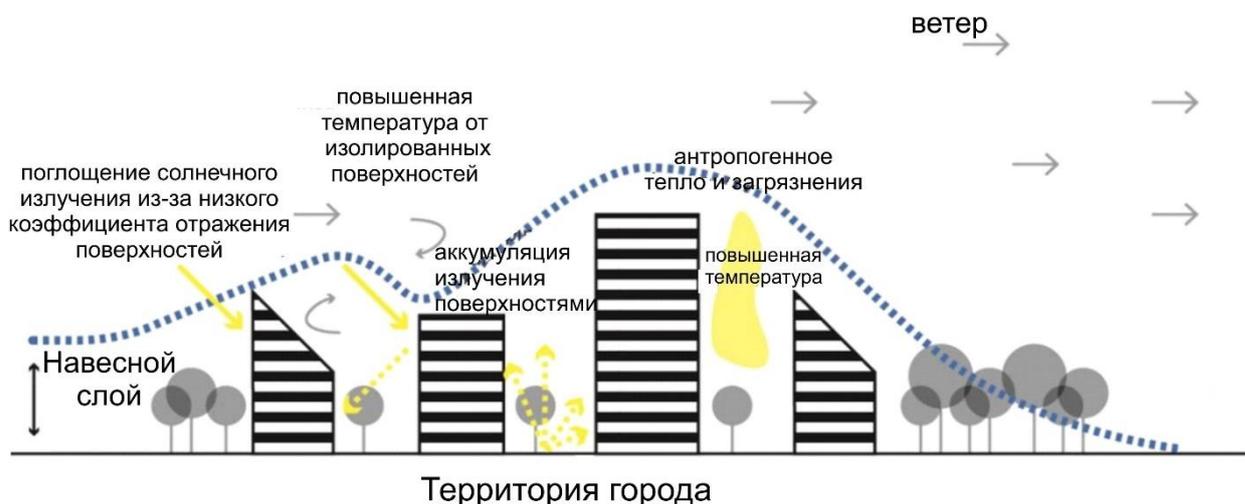


Рис.4. Схема размещения навесного слоя теплового острова (CLUHI) над урбанизированной территорией (Branea, 2016).

3) Температура поверхности строго связана с энергетическим балансом, который определяется ее свойствами:

- Влияние и ориентация солнца, ветра и неба;
- Способность излучать и отражать солнечные и инфракрасные волны;
- Влажность поверхности и ее способность испаряться;
- Относительная шероховатость поверхности;
- Проводимость и распространение тепла.

Измерение наземных островов тепла (SUHI) выполняется с помощью космических снимков или аэрофотосъемки. Однако он имеет явные погодные ограничения, а также ряд атмосферных и поверхностных эффектов, которые требуют коррекции. Наиболее распространенным методом оценки городских островов тепла является использование тепловых инфракрасных спутниковых данных, которые не всегда передают точную информацию, поскольку данные собираются в дневное время. Кроме того, спутник измеряет температуру уровня яркости крыши, не привязываясь к температуре воздуха.

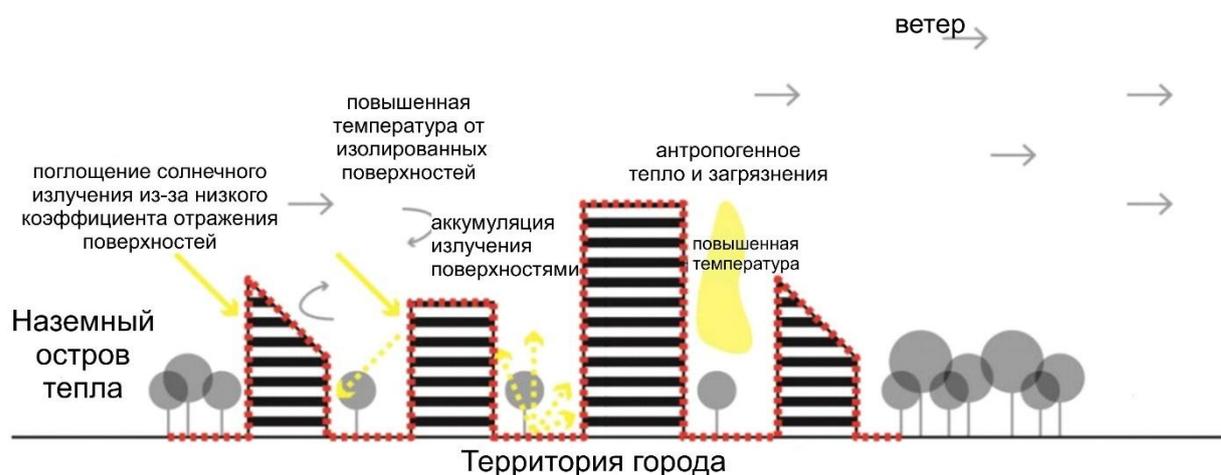


Рис.5. Схема размещения наземного острова тепла (SUNI) над городской территорией (Branea, 2016).

Тепловое загрязнение является одним из самых масштабных и самых распространенных видов физических загрязнений, созданных человеком. По данным ИЕА, ежегодное мировое производство энергии от сжигания ископаемого топлива составляет около  $5,86 \times 10^{11}$  ГДж. Не менее четверти этого количества возвращается в окружающую среду тепловыми потоками. И хотя в планетарном масштабе это пока составляет менее 0,1% от суммарного поступления энергии от Солнца, локально тепловое загрязнение приобретает критических значений.

Кроме непосредственного воздействия на физические характеристики воздуха, тепловое загрязнение способствует также увеличению химического загрязнения. После повышения температуры воздуха до  $+22,5^{\circ}\text{C}$ , вероятность возникновения смога растет почти на 2% на каждый дополнительный градус. Кроме того, большая температура воздуха в городах требует генерации дополнительной электроэнергии, что, в свою очередь, также провоцирует большее загрязнение атмосферы.

Как уже упоминалось, в отдельных мегаполисах антропогенный тепловой поток может даже превышать показатель суммарной солнечной радиации. При этом тепловое воздействие может распространяться на десятки километров.

Например, зона влияния ТЭЦ может достигать от 131 тыс. До 11 млн. га, а высота теплового воздействия - 230-250 м. Но и города без собственных энергогенерирующих мощностей также формируют свои «острова тепла». Остановимся подробнее именно на тепловом загрязнении урбанизированных селитебных территорий.

Изменения температурных показателей в городах, проявляются в виде волн тепла (во временном масштабе) и островов тепла (в пространственном масштабе). Согласно определению Всемирной метеорологической организации WMO, волна тепла — это период, в течение которого максимальная суточная температура воздуха более 5 дней подряд превышает среднюю максимальную температуру воздуха в этот день за многолетний период на 5°C.

Прямое тепловое загрязнение городских территорий связано с непосредственным поступлением тепловой энергии вследствие выбросов автотранспорта, промышленных предприятий, котельных, подогретыми сбросами сточных вод, истоками на теплотрассах и тому подобное. Для пригородных зон частной застройки также характерны, рассредоточены выбросы от индивидуальных отопительных установок.

Косвенное тепловое загрязнение связано с антропогенными трансформациями радиационного, теплового режима и процессов испарения воды в пределах городской территории. Город — это, прежде всего, зона активного преобразования человеком деятельной поверхности, которая, как известно, является одним из климатообразующих факторов, вместе с солнечной радиацией и атмосферной циркуляцией. В городах значительные площади занимают, заасфальтированы дороги и площадки, забетонированы участки, здания, в том числе высотные, поверхность стен и крыш которых многократно увеличивает даже самую площадь деятельного слоя. Большинство искусственных поверхностей (бетон, камень, асфальт, пластик и т.д.) днем активно поглощают и накапливают тепло, от них нагревается и приземный слой воздуха (Branca, 2016).

### *1.3. Обзор ранее проведенных исследований*

Изучение островов тепла проводятся с начала 19 века. Сначала они были исключительно метеорологическими, сейчас они в большей степени заменены исследованиями, данными дистанционного зондирования, которые позволяют анализировать большой объем информации.

В основе всех современных исследований лежит одна идея, заключающаяся в оценке теплового загрязнения территории на основе выделения тепловых аномалий города по космическим снимкам. Однако методы к изучению и анализу данных существенно различаются.

Одной из самых известных работ в России является исследование, проведенное сотрудниками МГУ по оценке теплового загрязнения Москвы (Балдина, Грищенко, Федоркова, 2012). За основу были взяты снимки аппаратуры MODIS спутников AQUA/TERRA и снимки спутника Landsat 5. Тепловые изображения MODIS были использованы для показа общей картины распределения теплового излучения, несмотря на недостаточное для детального изучения городских территорий пространственное разрешение, поскольку имеют важное достоинство: по ним возможно получение абсолютных значений термодинамических температур поверхности несколько раз в сутки. В результате было проведено картографирование многолетней динамики тепловых аномалий в Москве по снимкам Landsat TM 8 октября 1991 и Landsat ETM+ 6 октября 1999 года, а также выделены «тепловые зоны» Москвы.

Другим примером применения ДДЗ является исследование Ивановой и Балдиной (2018) теплового воздействия объектов железнодорожных транспортных узлов на окружающую среду с помощью снимков TIRS/Landsat-8, которое показало, что аномалия составляет превышение поверхности температуры на 2-5 С, однако пространственного разрешения 100 м не хватает для детального выделения тепловой аномалии.

Очень много работ по данной теме были сделаны и за рубежом, в Китае был проведен анализ островов тепла в городе Шэньчжэнь, используя

радиационное преобразование для получения температур поверхностей для построения группы карт: карты видов покрытия поверхности, вегетации, температуры поверхности, а также скрытых и видимых тепловых потоков (Wang, 2019).

В исследовании турецких ученых на примере города Скопье были рассмотрены возможности использования различных индексов, таких как NDVI и NDBI для оценки их зависимости от LST (Land surface temperature). Они выяснили, что негативное значение корреляции говорит о способности зеленых насаждений уменьшить влияние островов тепла, а положительное значение только усиливает это явление (Kaplan, 2018).

## 2. ОПИСАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Обоснование выбора территорий для исследования

Для проведения работы были выбраны 5 самых быстрорастущих городов России на 2019 год на основании исследования, проведенного по инициативе «Первой экспедиционной компании» (ПЭК) аналитической группой «РБК». В рейтинг вошли 37 населенных пунктов, чье население превышает 500 тысяч человек. Лидером рейтинга с 60,3 баллами из 100 возможных стал Краснодар. За ним следуют: Рязань (52,9 балла) и Москва (52,0 балла). Топ-5 рейтинга замкнули Санкт-Петербург (50,8 баллов) и Казань (50,7 баллов). Именно они и были выбраны для нашего исследования.

Для оценки городов было выбрано 33 критерия, объединенные в 9 групп: демография, занятость и заработная плата, предпринимательская активность, потребительская активность, образование, здравоохранение, строительство, преступность и привлекательность города для ведения бизнеса.

#### ТОП-15 КРИТЕРИЕВ, ВХОДЯЩИХ В РЕЙТИНГ



**ПЭК:**

Наиболее высоко экспертным сообществом были оценены факторы, вошедшие в группы:

- демография,
- занятость и заработная плата,
- образование,
- предпринимательская активность,
- строительство.

Рис.6. Процентная доля топ-15 критериев, использованных для составления рейтинга самых быстрорастущих городов России по версии «ПЭК» («РБК», 2019 г.).

## *2.2. Физико-географическое описание территорий*

### *2.2.1. Краснодар*

Краснодар – крупный город на юге России, расположенный в 120 километрах от побережья Черного моря. Общая площадь города — 339,31 км<sup>2</sup>. Географические координаты: 45°02' северной широты, 38°59' восточной долготы.

Что касается геоморфологии, территория города относится к южной части Восточно-Европейской равнины, а именно к Прикубанской низменности, поэтому рельеф Краснодара спокойный, ровный, наблюдается плавный уклон к северо-западу. Высота над уровнем моря в среднем колеблется от 19 до 32 метров.

Город расположен на правом берегу реки Кубань, выше по течению которой находится Краснодарское водохранилище - крупнейший искусственный водоём Северного Кавказа (Нагалеvский, Чистяков, 2003).

Территория примыкает к южной границе умеренных широт, что обуславливает переходный от мягко континентального к субтропическому климат (согласно классификации климата Кёппена). Здесь преобладают воздушные массы умеренных широт, очень редко наблюдаются появления арктического воздуха. Летом характерно вторжение тропического воздуха. Из-за своего расположения, Краснодар открыт для вторжения различных воздушных масс, и как следствие подвержен резким погодным изменениям, особенно это касается перепадов температуры воздуха (Климат Краснодара 1990). Среднемесячные показатели зимних месяцев опускаются до - 1,3 ° С, весенние месяцы характеризуются сильными амплитудами колебаний: нижняя граница - 8 ° С, верхняя – около 25 ° С. В летние месяцы температура поднимается до 38 ° С. Осенние показатели колеблются от - 10 ° С до 25 ° С.

Продолжительность тёплого периода составляет 9 - 10 месяцев, безморозный период длится 180 - 200 дней. Среднее количество осадков: 500 - 600 мм. Кроме зимнего периода, во все сезоны имеет место положительный

тепловой баланс. (Агроклиматический справочник по Краснодарскому краю, 1961).

Степная растительность на данной территории представлена злаково-разнотравными видами с наличием в её составе большого количества лугово-степного разнотравья. В настоящее время, в связи с застройкой территории, степь преобразована в сплошные сельскохозяйственные угодья, до 90 % которых занимает пашня, разбитая системой лесополос на прямоугольные клетки. Изредка на равнине встречаются небольшие лесные массивы, которые также созданы руками человека, а остатки природных степных фитоценозов встречаются на неудобных для агрокультуры участках (Нагалеvский, Чистяков, 2003).

#### 2.2.2. Рязань

Рязань располагается в западной части Рязанской области и занимает площадь равную 224 км<sup>2</sup>. Географические координаты города: 54° северной широты и 39° восточной долготы.

Город расположен в центре Восточно-Европейской равнины в междуречье Оки и Волги, при этом основная часть города располагается на высоком правом берегу Оки. Рельеф на территории пересеченный, расчлененный оврагами и балками.

Рязань расположена в зоне умеренно-континентального климата. Лето – теплое, иногда знойное: бывают случаи, когда температура подымается вплоть до +40 °С в тени. Зимы, как правило, характеризуются как умеренно холодные. Периодически случаются суровые зимы с минимальной температурой в –40 °С. Такие скачки температуры обусловлены влиянием блокирующего антициклона, воздушные массы которого быстро прогреваются до высоких температур летом и так же быстро остывают зимой. Согласно данным метеорологических наблюдений за период с 1980 по 2010 г., среднегодовое количество осадков составляет приблизительно 580 мм, из которых 390 мм выпадает в период с апреля по октябрь. Территория расположена в зоне

влияния западного переноса, при этом в основном преобладают слабые и умеренные ветра западного и юго-западного направления.

Город находится на границе между двумя растительными зонами, разделенными рекой Окой: левобережной лесной и правобережной лесостепной. Таким образом, растительные сообщества представлены как лесными, так и лесостепными природно-территориальными комплексами.

### 2.2.3. Москва

Москва является самым крупным городом в Российской Федерации и занимает территорию равную 2561,5 км<sup>2</sup>. Географические координаты города: 55° 45' северной широты, 37° 37' восточной долготы.

Территория города расположена на Русской плите, входящей в состав Восточно-Европейской платформы, к северу и северо-востоку от города расположена крупнейшая депрессия центральной части Восточно-Европейской платформы – Московская синеклиза. Платформа здесь покрыта сплошным и мощным чехлом четвертичных отложений.

Что касается рельефа, город относится к центральной части Восточно-Европейской равнины и располагается на стыке трех областей, генетически связанных с деятельностью ледника: Теплостанной ледниковой возвышенности – на юго-западе, Москворецко-Окской равнины – на востоке, Мещёрской низменности – на юго-востоке и Клинско-Дмитровская моренной гряды – на севере. Для каждой из областей характерен свой тип рельефа. Так, Воробьевы горы, принадлежащие к Теплостанной ледниковой возвышенности, изрезаны водными потоками и изобилуют оврагами, балками и глубокими понижениями. Юго-восток Москвы в свою очередь отличается плоским рельефом, что в сочетании с высокой степенью обводненности приводит к заболачиванию территории. Своими особенностями рельеф города также обязан широким речным долинам с выраженными поймами и надпойменными террасами (Вагнер, 2003).

Город расположился в междуречье Оки и Волги в среднем течении реки Москва и занял оба ее берега. Гидрографическая сеть расчленена: помимо

основной реки Москвы в пределах города протекает несколько десятков менее крупных рек.

Климат Москвы важный умеренно-континентальный, с сильным влиянием атлантического морского, с четко выраженной сезонностью. По метеорологическим наблюдениям самым холодным месяцем года в Москве является январь, со средней температурой  $-7,5$  °С, а самым тёплым – июль, температура которого в среднем составляет  $+18,4$  °С (Агроклиматический справочник по Московской области, 1954).

Изначально здесь господствовали хвойно-широколиственные леса. Разнообразие форм рельефа во многом повлияло на формирование естественного растительного покрова. В Москве сходятся сосновые леса Мещёрской низменности, дубравы и липняки, еловые и елово-широколиственные леса. Однако, стоит учитывать, что антропогенное влияние оказало неизгладимое воздействие на облик занимаемой городом территории. Леса, произрастающие на данной местности, были вырублены практически полностью, оставшиеся единичные лесные массивы распределены неравномерно. В городе доминируют искусственные насаждения, однако в пределах Кольцевой линии метро практически отсутствуют крупные парки. И только ближе к окраинам расположено несколько довольно крупных лесопарков: Измайловский, Царицынский, Битцевский и др.

#### 2.2.4. Санкт-Петербург

Санкт-Петербург расположен на северо-западе России. Город занимает площадь в 1439 км. Координаты исторического центра —  $59^{\circ}57'$  северной широты  $30^{\circ}19'$  восточной долготы.

Что касается геологического строения и рельефа, территория расположена в пределах Приневской низменности, на прилегающем к устью реки Невы побережье Невской губы Финского залива и на многочисленных островах Невской дельты. Таким образом, почти вся территория города находится на низкой плоской равнине, изобилующей древними морскими террасами.

Санкт-Петербург отличается переходным от умеренно-континентального к умеренно-морскому климатом. Циклоническая деятельность, оказывающая преобладающее влияние на данную территорию, порождает частую смену воздушных масс. В летнее время доминируют западные и северо-западные ветры, в зимнее – западные и юго-западные. В течение всего года преобладает пасмурная, облачная погода, следствием чего является медленное испарение влаги и ограниченное поступление на земную поверхность солнечного тепла.

Санкт-Петербург и его окрестности относятся к южной подзоне тайги. В естественных условиях здесь господствовали хвойные лесные сообщества, перемежающиеся болотами, по большей части верховыми, а также переходными заболоченными участками. В результате антропогенеза, территория была полностью преобразована в ландшафт городского типа. В настоящее время в черте города присутствуют сильно преобразованные остатки естественной растительности, сохранившиеся в некоторых парках, а также искусственные зеленые насаждения, занимающие вместе с водной поверхностью около 40 % городской территории (Белова, Булдаков и др. 1992).

#### 2.2.5. Казань

Казань расположена в 820 км к востоку от Москвы и занимает площадь равную 515,8 км<sup>2</sup>. Географические координаты города: 55°47,45' северной широты 49°6,87' восточной долготы.

Город расположен на левом берегу реки Волги, при впадении в неё реки Казанки, и в западной, центральной и юго-западной частях примыкает к левому берегу Волги на протяжении около 15 км. Этот участок представляет собой две речные террасы, разделенные резко очерченным уступом высотой 20 – 25 метров, разделяющим город на нижнюю и верхнюю часть (Литвинов, 2011). Приток Волги – Казанка делит город на две равные части. Часть водной поверхности, которая составляет значительную часть площади города, сформирована в результате строительства Куйбышевского водохранилища.

Территория отличается равнинно-холмистым рельефом с низменными и возвышенными равнинами, а также большим количеством отдельно стоящих холмов. При этом наблюдается плавное повышение с северо-запада к юго-востоку. В пределах городской черты встречаются вытянутые овраги и понижения.

Казань относится к зоне умеренно-континентального климата средних широт. Лето здесь, как правило, теплое, зима – умеренно-холодная. Наиболее высокие температуры воздуха приходятся на июль (средняя месячная температура 18 – 20 °С), самые холодные – на январь (от - 13 °С). Средняя годовая сумма осадков составляет 460 – 540 мм.

Казань находится на стыке двух геоботанических областей: Евразийской таежной и Европейской Широколиственно-лесной, что определяет разнообразие характерных видов древесной растительности. Территория, на которой расположен город, изначально была занята мощными лесными массивами, представленными темнохвойными и широколиственными видами.

Результатом активной антропогенной деятельности явилась вырубка большей части лесных массивов на территории Татарстана. В данный момент сохранившиеся участки леса распределены неравномерно. В пригородах Казани вдоль берегов рек Волги и Казанки сохранились участки хвойных, сосновых и хвойно-широколиственных лесов. Наиболее крупные из них расположены у западной и восточной границы города. При этом как естественные, так и искусственно созданные насаждения носят статус памятников природы (Экология города Казани, 2005).

### 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

#### *3.1. Характеристика материалов, использованных в исследовании*

При проведении исследования были использованы данные спутниковой съемки или данные дистанционного зондирования (ДДЗ). Они являются важнейшим источником оперативной информации о природной среде, используемый при исследовании земной поверхности, создании и поддержании в актуальном состоянии тематических карт, и для других целей. Методы дистанционного зондирования основаны на получении информации о земной поверхности путем регистрации проходящего от нее электромагнитного излучения, отраженного или собственного. Возможность опознавания различных объектов и изучение их свойств дистанционными методами обусловлены тем, что поглощение, рассеивание, отражение и излучение электромагнитной энергии в различных зонах спектра специфичны для каждого типа земной поверхности и объектов, расположенных на ней. Анализ спектральных характеристик объектов, структурных и текстурных особенностей изображений позволяет получить информацию для их последующего дешифрирования и интерпретации.

Для решения задач обнаружения и оценке остров тепла были необходимы космические снимки с соответствующим разрешением и покрытием. Снимки спутниковой системы Landsat 8 оказались наиболее подходящим материалом.

Программа Landsat, осуществляемая США, является одной из наиболее успешных на мировом рынке ДДЗ, с 1972 года в рамках программы было запущено семь спутников. Программа выполняет многозональную периодически повторяемую долговременную съемка с помощью сканирующих устройств (радиометров) для решения природно-ресурсных, природоохранных, мониторинговых и картографических задач. Программу осуществляют три крупнейших правительственных организации США: NASA, NOAA, USGS (Королев, 1999).

Установленное на спутниках серии Landsat оборудование позволило собрать большую коллекцию спектральных снимков, востребованных в области сельского хозяйства, в картографии, геологии, лесоводстве, образовании и национальной безопасности. Восьмой спутник в рамках программы Landsat (седьмой выведенный на орбиту) изначально назывался Landsat Data Continuity Mission (LDCM), создан совместно NASA и USGS. Выведен на орбиту 11 февраля 2013 года (Landsat NASA).

Landsat 8 собран компанией Orbital Sciences Corporation по контракту от NASA на базе собственной платформы Orbital LEOS tar-3. Orbital Sciences Corporation отвечала за проектирование и изготовление платформы Landsat-8, интеграцию с полезной нагрузкой и тестирование спутника. Спутник Landsat 8 снабжен двумя съемочными комплексами, аппаратом оперативной телевизионной съемки Земли (Operational Land Imager (OLI)) и тепловым инфракрасным датчиком или тепловым инфракрасным сенсором (Thermal InfraRed Sensor (TIRS)) (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики материалов, получаемых аппаратурой Landsat 8

Спектральный канал	Спектральные диапазоны (мкм)	Разрешение (м)
Диапазоны OLI		
1 (побережья и аэрозоли)	0,433 - 0,453	30
2 (синий)	0,450 - 0,515	30
3 (зеленый)	0,525 - 0,600	30
4 (красный)	0,630 - 0,680	30
5 (ближний инфракрасный)	0,845 - 0,885	30
6 (коротковолновый инфракрасный)	1,560 - 1,660	30
7 (коротковолновый инфракрасный)	2,100 - 2,300	30

8 (панхроматический)	0,500 - 0,680	15
9 (перистые облака)	1,360 - 1,390	30
Диапазоны TIRS		
10 (дальний инфракрасный)	10,30 - 11,30	100
11 (дальний инфракрасный)	11,50 - 12,50	100

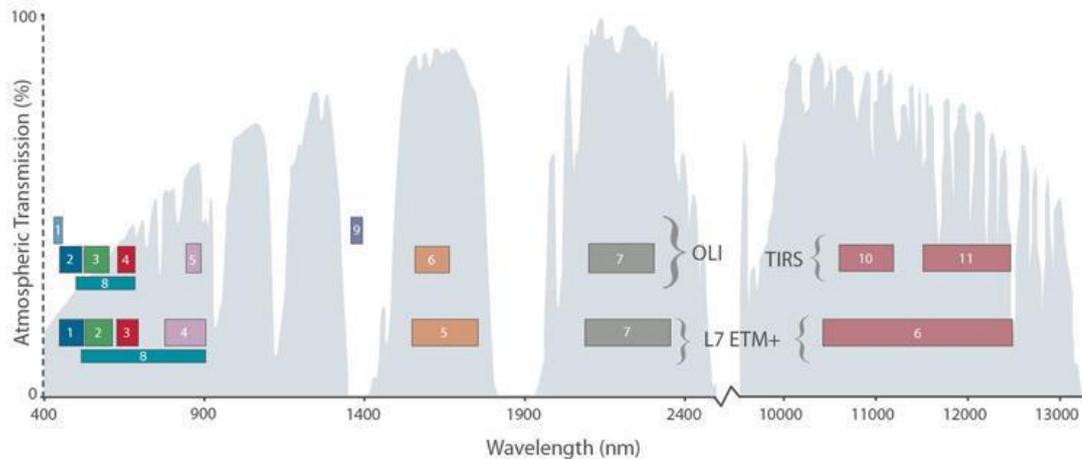


Рис.7. Длины волн различных каналов сенсоров OLI, TIRS и ETM+ (Официальный сайт NASA).

### 3.2. Методика проведения исследования

Перед началом работ была формализована общая методика обработки данных (рис.8) на основе анализа ранее проведенных отечественных и зарубежных исследований в этой области.



Рис.8. Общая блок-схема методики проведения исследования.

### 3.2.1. Выбор исходных данных

В качестве исходных данных были использованы снимки Landsat 8, полученные из открытой ресурсной базы сайта геологической службы США (earthexplorer.usgs.gov). При подборе космических снимков для исследования были взяты 2 временных периода: 2014 – 2015 и 2019 - 2020 года. При этом снимки отбирались, согласно сезонам, зима-лето, без точного совпадения дат съёмки год к году. В результате были выбраны 20 наборов снимков для 5-ти территорий (табл. 2). Сведения о погодных условиях были получены из открытого архива метеорологических данных гр5 (gr5.ru).

Таблица 2. Дата и условия съёмки выбранных материалов

Город	Дата	Температура воздуха, °С
Москва	10.02.2020	- 0.3
	06.06.2019	+ 22.3
	31.01.2014	- 18.3
	10.05.2015	+ 15.4
Санкт-Петербург	21.02.2019	- 15.6
	28.08.2019	+ 19.1
	21.01.2015	- 11.2
	24.08.2015	+ 20.4
Краснодар	17.01.2019	+ 0.3
	19.06.2019	+ 27.2
	23.02.2015	+ 4.4
	03.09.2015	+ 26.8
Рязань	22.03.2020	- 10.6
	24.06.2019	+ 22
	21.02.2015	+ 1.7
	25.08.2015	+16.4
Казань	09.02.2020	- 14.8
	11.09.2019	+14.9
	01.02.2014	- 22.1
	07.09.2015	+ 20

### 3.2.2. Радиометрическая коррекция

Первым этапом обработки снимков Landsat является радиометрическая калибровка, поскольку изображения нужно избавить от искажений, перед дальнейшей обработкой. Изначально снимки, получаемые спутниковой

аппаратурой, представляют собой растры, у которых яркостные характеристики пикселей должны строго соответствовать отражательным способностям элементарных участков зондируемой территории в определенном диапазоне длин электромагнитных волн. Затем данные значения пересчитываются в определенные физические величины, значения которых указывают на свойства земной поверхности и поверхностных отложений. Но для того, чтобы использовать тот или иной алгоритм математического преобразования растра его следует освободить от искажений, которые могут быть вызваны сбоями аппаратуры, систематическими ошибками в работе электронно-оптических приборов, вызваны поглощением и рассеиванием электромагнитного сигнала атмосферой, облаками и т.д. А также, искажения могут быть вызваны отклонением при съемке от надира, особенностями центральной проекции, а так же перепадами высотных отметок земной поверхности (Харазми, 2018).

В загруженном наборе данных Landsat 8 каждый пиксель хранит безразмерное нормализованное значение (Digital Number / DN), полученное после преобразований исходных значений, снятых сенсором спутника. В каждом независимом наборе данных эти числа могут оказываться совершенно несопоставимыми, они не несут непосредственного физического смысла, поэтому обрабатывать такие данные не принято (только в целях визуального дешифрирования). Однако существуют способы, с помощью которых можно, используя метаданные набора, пересчитать DN в — отражательную способность (reflectance). Для этого был использован модуль программного обеспечения GRASS GIS. GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System) — полнофункциональная геоинформационная система, предоставляющая мощные механизмы для обработки растровых и векторных геоданных в единой интегрированной программной среде.

Это преобразование было осуществлено для всех наборов снимков с помощью модуля `i.landsat.toar`, в меню Imagery - Satellite images tools - Landsat DN to radiance/reflectance.

### 3.2.3. Атмосферная коррекция

Ещё одним важным этапом предварительной обработки космических снимков является атмосферная коррекция. Получаемые съемочной системой данные о подстилающей поверхности и объектах на ней, очевидно, являются искаженными из-за влияния множества факторов, среди которых основной — атмосфера, сложная и неоднородная среда. Влияние атмосферы на искажения снимка проявляется в ряде нескольких факторов: угол падения и отражения солнечных лучей, прозрачность атмосферы, газовый фактор и дымка. В настоящее время, большая часть данных попадающих в руки конечного пользователя уже атмосферно скорректирована. Однако, необходимо учитывать, что процесс коррекции больших объемов данных полностью автоматизирован, и используемые для коррекции алгоритмы рассчитываются исходя из усредненных показателей и не учитывают особенностей получения каждого конкретного снимка. Для более корректных результатов необходимо максимально подробно учесть искажения, или, выражаясь корректнее, смоделировать поведение отраженной солнечной радиации на пути от объекта до съемочной аппаратуры.

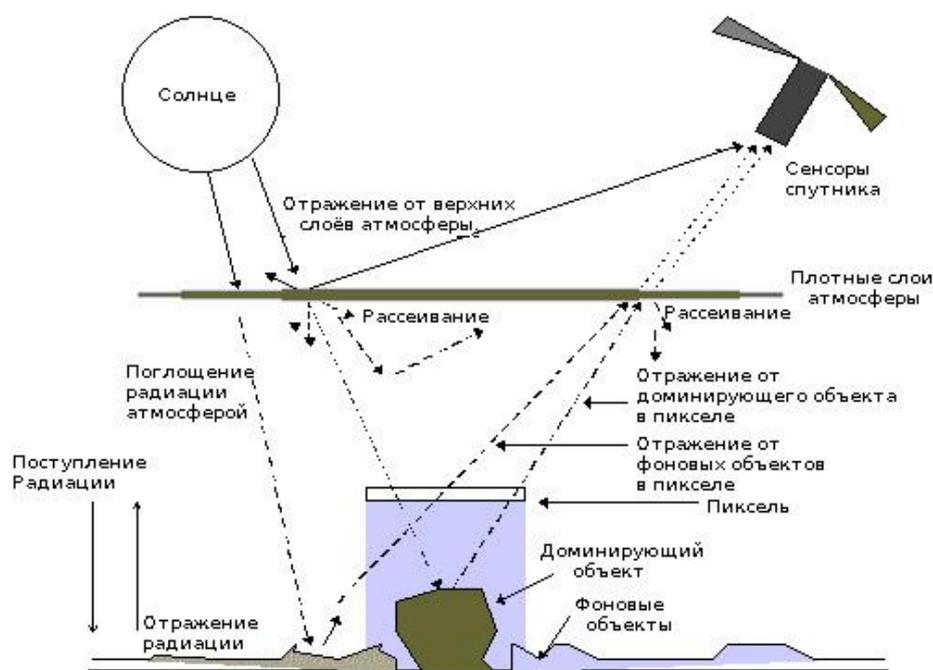
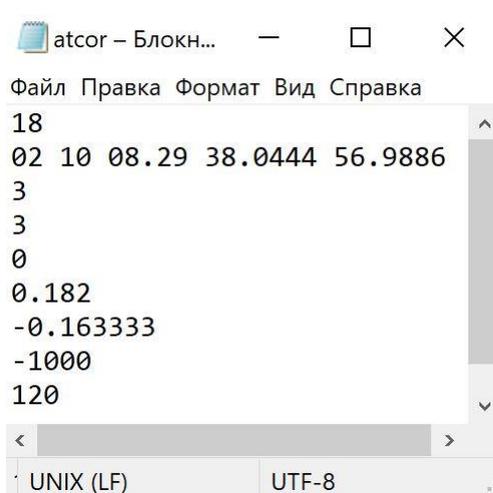


Рис.9. Факторы, влияющие на попадание отраженной солнечной радиации на сенсоры спутника (Жолобов, 2015).

Существует множество разных методов атмосферной коррекции, из которых большой популярностью пользуется FLAASH, реализованный в ENVI, но в рамках работы использовалась модель 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) в модуле i.atcorr в GRASS GIS. Для работы с модулем для каждого снимка требовалось создать конфигурационный файл, где за каждой строкой закреплён свой параметр. Первая строка – «Geometrical Conditions» или код сенсора. Во второй строке указываются месяц, день, время в формате GTM, долгота и широта. Третья и четвертая, атмосферная и аэрозольная модели, заполняются с помощью классификаций из документации модуля, в соответствии с территорией. Следующий параметр — модель концентрации аэрозолей (Aerosol concentration model). Поскольку у нас отсутствовал показатель оптической видимости, измеренный метеорологическими методами, то в качестве параметра видимости был указан "0", а в следующей строке был внесён параметр оптической толщины (optical depth), взятый с одного из порталов NASA (aeronet.gsfc.nasa.gov). В шестой строке записывается средняя высота территории снимка в километрах, извлечённая из ЦМР. В следующем параметре описывается положение съёмочной аппаратуры, для спутниковых съёмок параметр равен «-1000». В последней строке задан индекс используемого канала (Казаков и др., 2015).



```
atcor - Блокн...
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
18
02 10 08.29 38.0444 56.9886
3
3
0
0.182
-0.163333
-1000
120
UNIX (LF)  UTF-8
```

Рис.10. Пример конфигурационного файла для снимка Москвы 5-го канала (дата съёмки 10.02.2020).

Для запуска модуля требуется открыть меню Imagery - Satellite images tools - Atmospheric correction. Далее требуется подгрузить откалиброванные ранее снимки и конфигурационный файл, меняя последний параметр в соответствии с номером канала.

### 3.2.4. Расчет температуры поверхности (Land Surface Temperature)

Для расчета температуры земной поверхности использовался метод, предлагаемый разработчиками с использованием 10 канала, поскольку 11 канал значительно больше подвержен бликам, засветам и погрешностям датчика. Также разработчики рекомендуют пользователям воздержаться от использования данных этого канала в количественном анализе, включая извлечения температуры поверхности.

Для вычисления яркостных температур поверхности используется следующее уравнение:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15, (1)$$

Где  $L_\lambda$  – спектральная яркость на верхней границе атмосферы,  $K_1$  и  $K_2$  – тепловые константы из файла метаданных, а  $T$  – яркостная температура в °С.

Для дальнейших расчетов требуется вычислить индекс NDVI:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), (2)$$

где  $NIR$  – отражательная способность земной поверхности в ближнем инфракрасном диапазоне солнечных лучей, а  $RED$  – отражательная способность земной поверхности в красном диапазоне солнечных лучей. Данный показатель отражает количество фотосинтетически активной биомассы. Впервые был описан Rouse В.Ј. в 1973 году.

Далее вычисляется параметр  $Pv$  (Proportion of vegetation), описывающий процент растительности:

$$Pv = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2, (3)$$

На следующем этапе получаем излучательную способность поверхности земли (Ground Emissivity,  $e$ ):

$$e = 0,004 * Pv + 0,986, (4)$$

На последнем этапе для вычисления температуры поверхности используется формула:

$$LST = \frac{T}{(1 + (\lambda * \frac{T}{c2}) * \ln(e))}, (5)$$

Где  $T$  – яркостная температура поверхности,  $\lambda$  – длина волны,

$c2 = \frac{h*c}{s}$ ,  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – постоянная Больцмана,  $s$  – скорость света.

По итогу этого этапа работ была формализована методика расчета температур земной поверхности по космическим снимкам и создана модель для обработки всех наборов данных с помощью модулей `r.marscalc` и `Graphical Modeler` в `GRASS GIS`. Аналогичную обработку снимков можно было провести с помощью старого модуля для `QGIS 2.18` – `Land Surface Temperature plugin`.

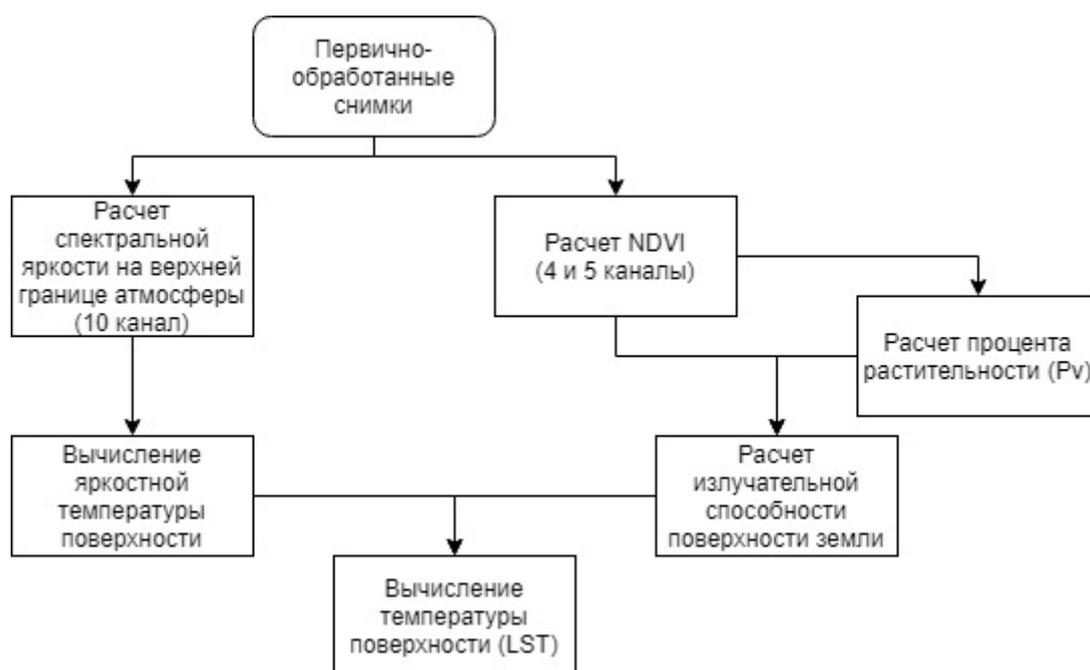


Рис.11. Блок-схема методики расчета температур земной поверхности по космическим снимкам.

### 3.2.5. Обнаружение островов тепла

Для обнаружения островов тепла и дальнейшей обработки было выбрано семейство программных продуктов ArcGIS, в частности: ArcMap и ArcCatalog. Данная программа была выбрана, поскольку обладает большими возможностями для решения любых картографических и геоинформационных задач.

На данном этапе для каждой территории имелся набор из 4 изображений, содержащих информацию о температуре поверхности земли по сезонам в двух временных периодах.

Для получения изображений островов тепла требовалось осуществить наложение изображений, с помощью инструмента взвешенное наложение (Weighted overlay) модуля Spatial Analyst. С помощью, него удастся определить, какие участки обладают стабильно высокими температурами по сравнению с прилегающими территориями во все рассматриваемые временные периоды. Но учитывая требования для входных данных, перед использованием этого инструмента надо провести переклассификацию изображений, поскольку растровые изображения должны быть целочисленные и переклассифицированы по единой шкале. Для этого используется инструмент переклассификация (reclassify) с помощью гистограмм яркостных температур на каждую исследуемую дату съемки. Для единой шкалы было определено 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 яркостных температур происходило методом естественных интервалов (Natural Breaks), в котором границы классов определяются путем группировки схожих значений и максимально увеличиваются различия между классами. В ходе выделения указанных выше ступеней температур границам классов присваивались ближайшие целочисленные значения.

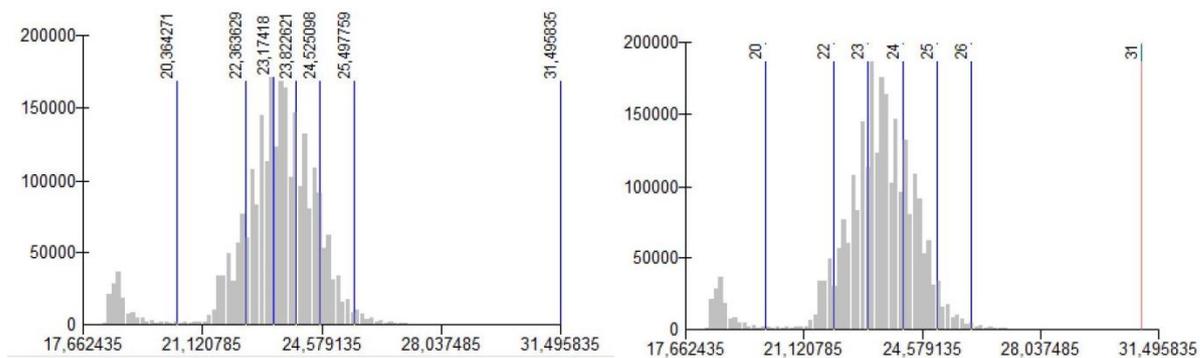


Рис.12. Пример переклассификации изображения распределения температур на территории Казани (лето 2015).

На следующем этапе из полученных изображений с помощью взвешенного наложения были суммированы разносезонные снимки каждого временного периода. При этом растрам были присвоены равные веса. В результате для каждого города была получена пара изображений с 7 градациями температур за 2015 и 2020 года.

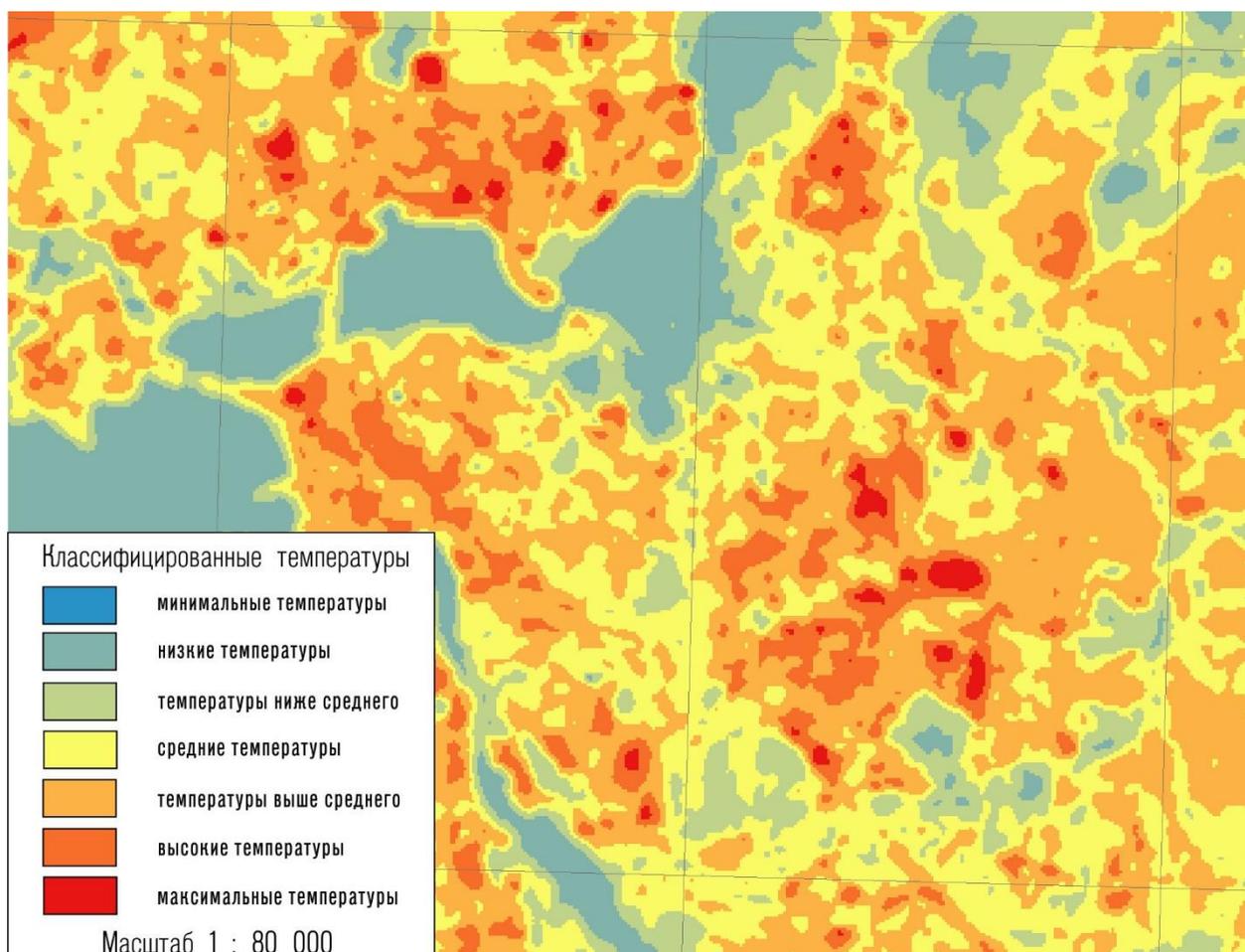


Рис.13. Фрагмент взвешенного изображения температуры поверхности (Казань 2015 г.)

Для выделения на каждом изображении островов тепла, растры были конвертированы в векторный формат с помощью инструмента растр в полигоны (raster to polygon). Далее была проведена выборка полигонов с градацией температуры 7 (максимальные температуры) и геометрическая генерализация этих участков.

На последнем этапе на подложку OpenStreetMap были наложены 2 слоя островов тепла за 2020 и 2015 гг., а также разработан общий стиль для всех 5-ти карт.

После выполнения всех этапов обработки была составлена полная методика обработки спутниковых данных для создания карт тепловых аномалий.

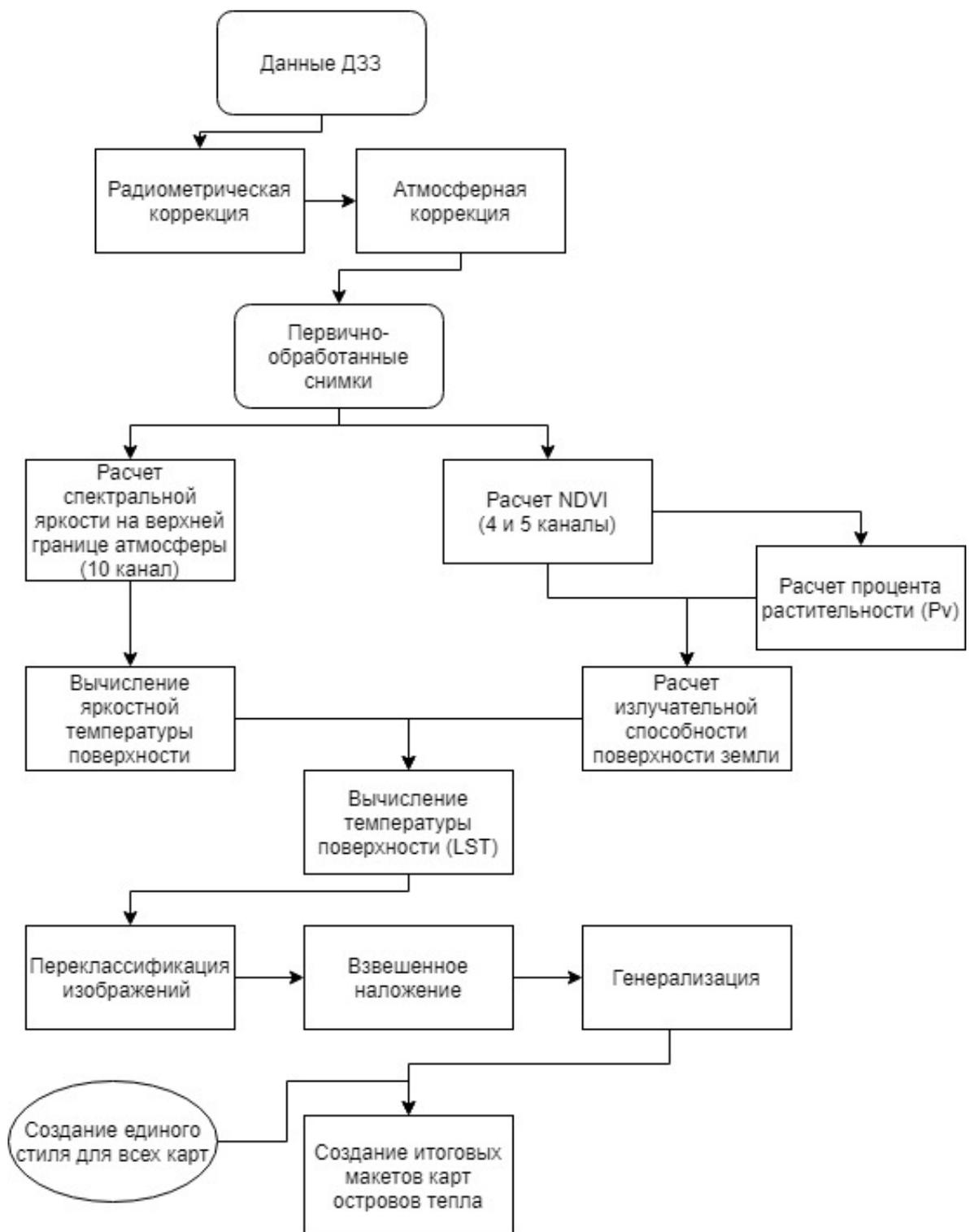


Рис.14. Блок-схема методики обработки космических снимков для создания карт островов тепла.

## 4. ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1. Карта островов тепла города Краснодар

При анализе карты динамики тепловых островов Краснодара (рис.15), легко заметить, что большая часть территории города попадает в зону аномально повышенной температуры по сравнению с окружающими территориями. Также заметно увеличение островов тепла в период 2019-2020 годов, по сравнению с 2014-2015 гг. Подробнее рассматривая период 2014-2015 гг. видно, что острова тепла расположены преимущественно в центральной части города, а также вдоль железнодорожных путей и в зонах с действующими промышленными предприятиями. Большое влияние оказывает «Краснодарская» ТЭЦ, находящаяся на востоке города, она, сбрасывая воду в Старую Кубань способствует, образованию островов тепла, особенно в зимние периоды времени. Стоит отметить, что тепловые аномалии также расположены над некоторыми сельскохозяйственными территориями севернее города из-за сильного нагрева пашней. В 2019-2020 гг. заметно увеличение площадей с повышенной температурой, острова тепла регистрируется уже и во многих спальных районах, не имеющих никаких зеленых зон. Влияние растительности на образование тепловых аномалий можно оценить с помощью индекса растительности NDVI.

В общем, карта позволяет оценить зависимость образования островов тепла на территории Краснодара. Центр города больше подвержен тепловому загрязнению из-за плотной застройки и большой теплоотдачи от сооружений, поскольку из-за своего южного географического положения и климатических особенностей и малого количества зеленых зон, город получает большое количество тепла ежедневно и не успевает его отражать (рис. 15).

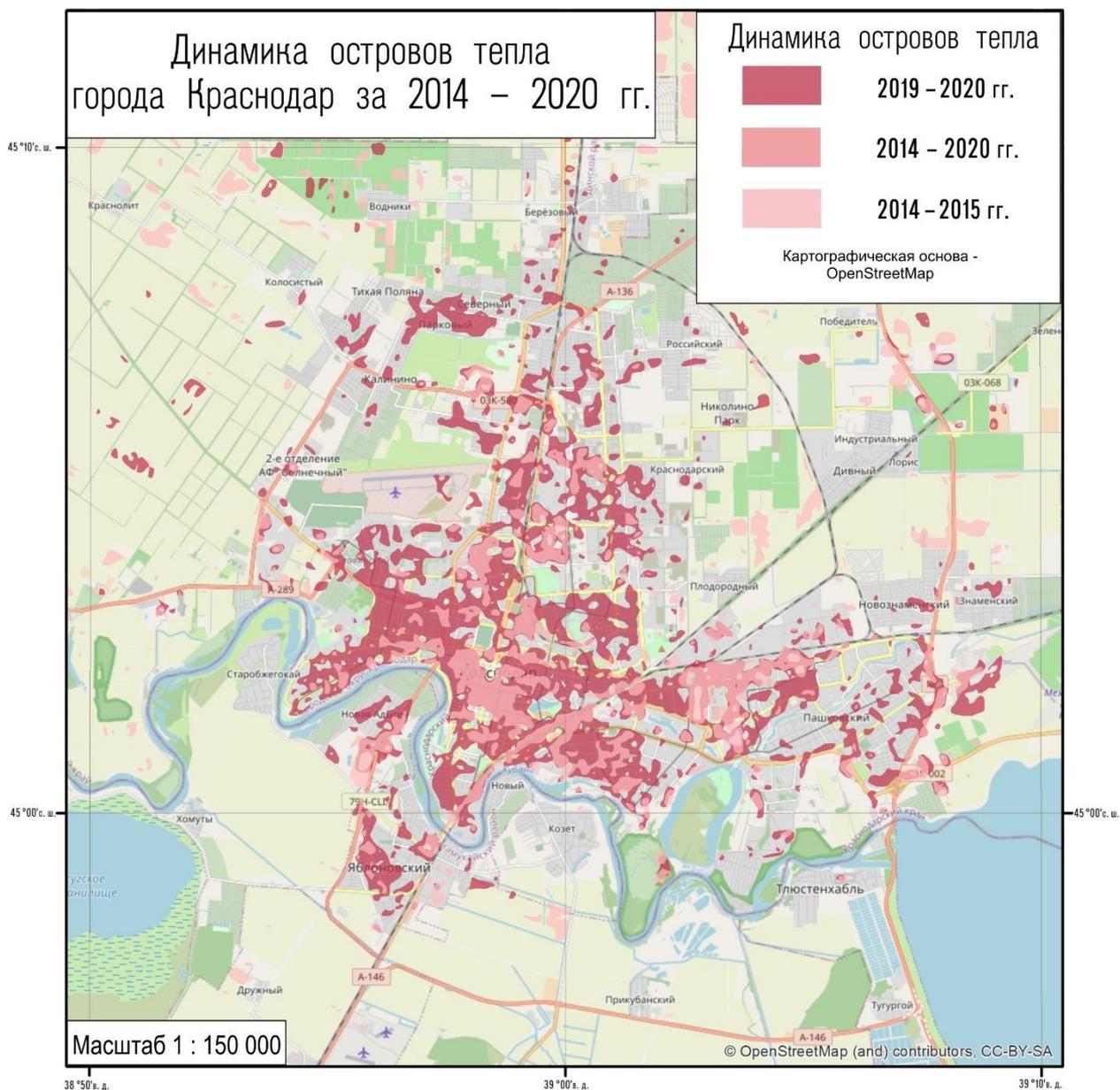


Рис.15. Карта динамики островов тепла Краснодара.

#### 4.2. Карта островов тепла города Рязань

На карте температурных аномалий Рязани (рис.16) видна четкая корреляция образования островов тепла в промышленных зонах на Юго-Востоке и Северо-Западе (ЗАО «РНПК», «Новорязанская» ТЭЦ, Завод «Автогрегатов», ЗАО «Рязанский станкостроительный завод» и т.д.). Также острова тепла образуются вдоль линий железных дорог и вокруг крупных станций и вокзалов. Заметны зоны повышенных температур и на пересечении крупных автомобильных дорог и развязках, что говорит о сильном влиянии

машин в данном тепловом загрязнении. В динамике заметно увеличение площади островов к 2019-2020 гг., но в общем город мало загрязнен тепловой энергией, и тепловые аномалии имеют локальный характер.

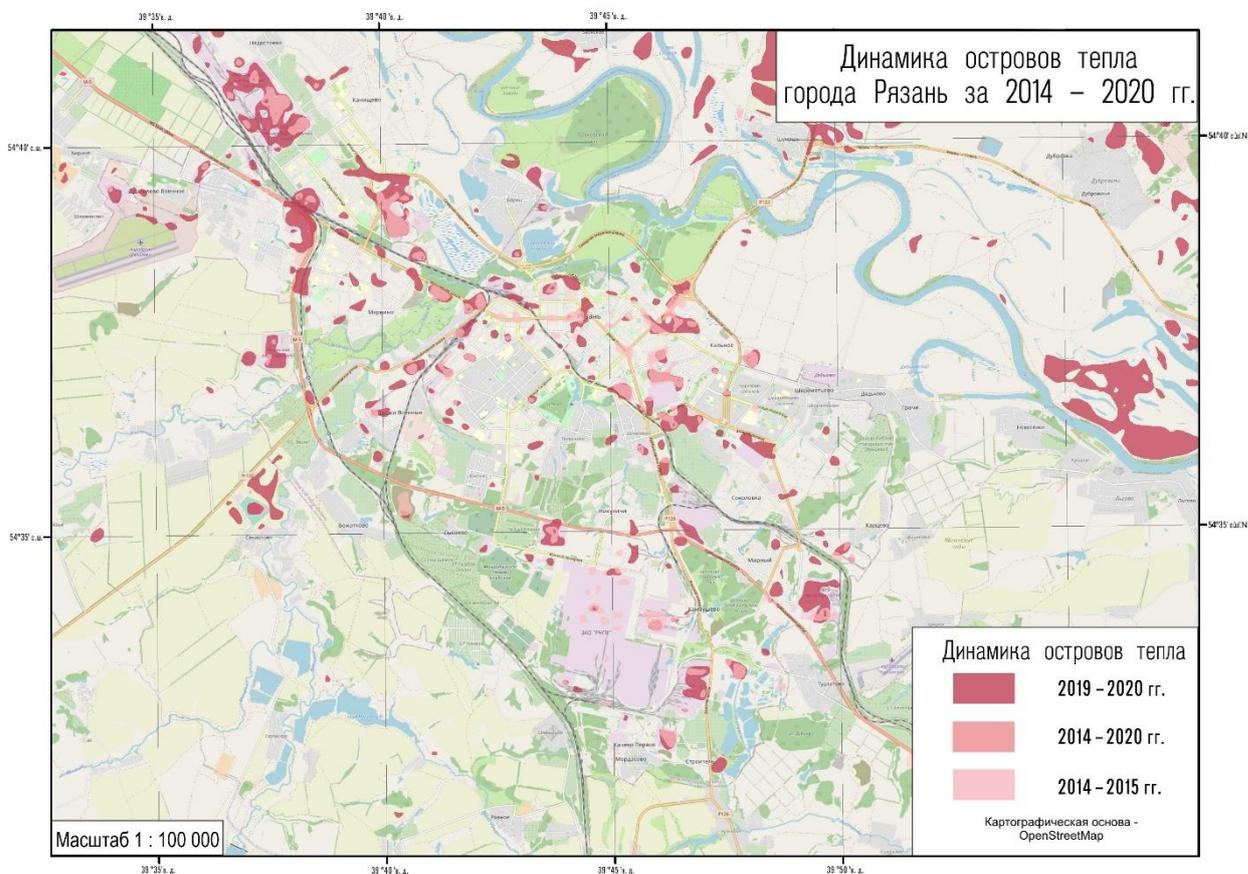


Рис.16. Карта динамики островов тепла Рязани.

#### 4.3. Карта островов тепла города Москва

В результате проведенных работ после выделения городских тепловых аномалий на территории Москвы в зонах с повышенными температурами оказалась большая часть активно действующих промышленных предприятий, основные вокзалы и железнодорожные пути, а также участки крупных транспортных магистралей (МКАД, Садовое кольцо, 3 транспортное кольцо).

Анализ карты динамики (рис. 17) позволяет выявить следующие изменения городской среды: в целом можно отметить заметное снижение выраженности тепловых аномалий в центре города в пределах Садового кольца. Однако за его пределами, главным образом в восточной половине города, плотность распространения островов тепла наоборот повысилась к периоду 2019 – 2020

гг. Большое влияние на это оказывают крупные железнодорожные узлы: Курский, Ярославский, Казанский, Ленинградский и Павелецкий вокзалы с прилегающими территориями. Эти территории имеют более высокую температуру на протяжении всего периода исследований 2014 – 2020 гг.

Одновременно можно отметить увеличение интенсивности тепловых аномалий, связанных с некоторыми промышленными предприятиями, особенно на севере и юго-востоке города. На Юге большое влияние оказывает промышленная зона рядом с районом Текстильщики, большое влияние оказывает «Завод имени Лихачева», часть территорий которого сейчас сносится. После редевелопмента данных территорий температурная ситуация в данном районе должна улучшиться. Еще одним крупным кластером являются промышленные зоны в районах Лефортово, Соколиная Гора и Преображенское, здесь заметно увеличение площадей тепловых аномалий.

Помимо стандартных объектов, виновных в образовании островов тепла, в период 2019 – 2020 гг. множество островов образовались на территориях спальных районов, вдали от промзон. Это объекты текущего строительства новых жилых кварталов. Также следует отметить влияние Москва-Сити, поскольку из-за больших площадей плоскостей нагрева небоскребов, эта территория только увеличивает тепловой остров вокруг себя. Рассматривая динамику островов тепла вдоль МКАД, можно вынести, что тепловые аномалии чаще всего образуются на пересечении основных артерий города с кольцевой дорогой, именно в тех местах, где каждый день увеличен трафик и образуются пробки.

Подводя итог, огромное влияние на изменение микроклимата Москвы несут большое количество ТЭЦ, заводов и фабрик, они являются основными источниками тепла в городе.

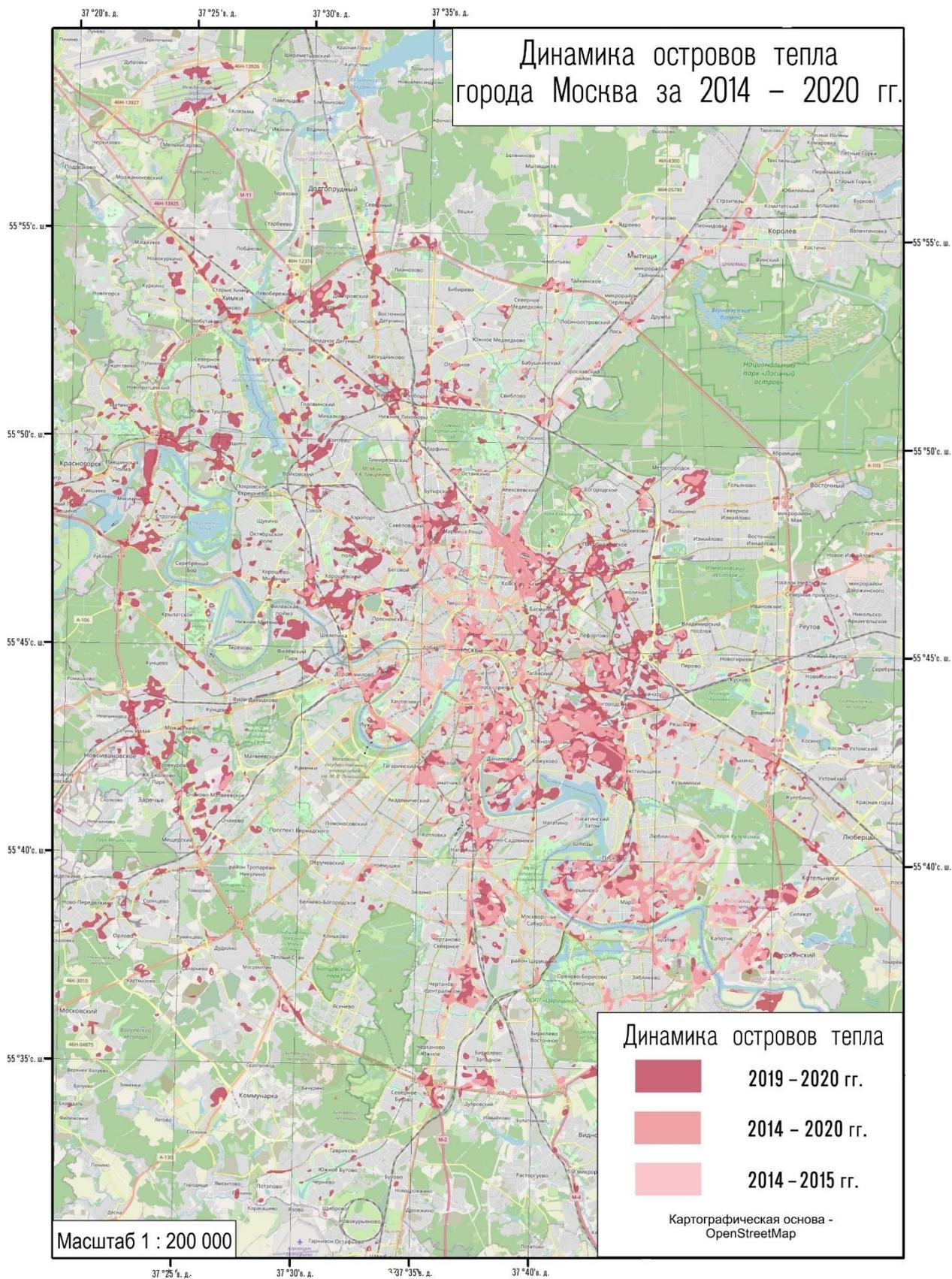


Рис.17. Карта динамики островов тепла Москвы.

#### *4.4. Карта островов тепла города Санкт-Петербурга*

Карта динамики островов тепла Санкт-Петербурга (рис.18) позволяет проанализировать пространственные особенности распределения тепловых аномалий на территории Санкт-Петербурга.

Рассматривая временной отрезок 2014 – 2015 гг. можно сделать вывод о большом распространении тепловых островов на территории города, но их размещение соответствует промышленным зонам, линиям железных дорог и основным автодорогам. Повышенные температуры на Юге города характерны для территорий «Кировского завода», судостроительного «Северная верфь», аэропорта «Пулково», а также нескольких ТЭЦ, контейнерного порта, промышленных территорий района Обухово и станции «Предпортовая». На Западе города выделяется участок намывных территорий Васильевского острова и Пассажирского порта, а также район Северо-Приморской части и Старой Деревни. На Севере города выделяются промзоны Парнас и Мартыновка. На протяжении всего временного периода острова тепла характерны для территории Центрального района, Выборгской стороны, в частности, территориям заводов и железнодорожных путей вблизи Финляндского вокзала. Тепловые аномалии также прослеживаются на территориях всех железнодорожных узлов Петербурга (Балтийский, Витебский, Московский и Ладожский вокзалы). «Серая» зона за Обводным каналом выделяется своей повышенной температурой по сравнению с окружающими территориями. Анализируя карту, легко заметить, что тепловые аномалии также тянутся вдоль основных автомагистралей (Московский, Витебский, Стачек и Пискаревский проспекты, КАД). На Севере города острова формируются на перекрестках, что говорит о сильном влиянии автомобильного трафика в тепловой структуре города.

В 2019 – 2020 годах острова тепла заметно прогрессируют на в историческом центре города, в то время как на остальных территориях заметно уменьшаются.

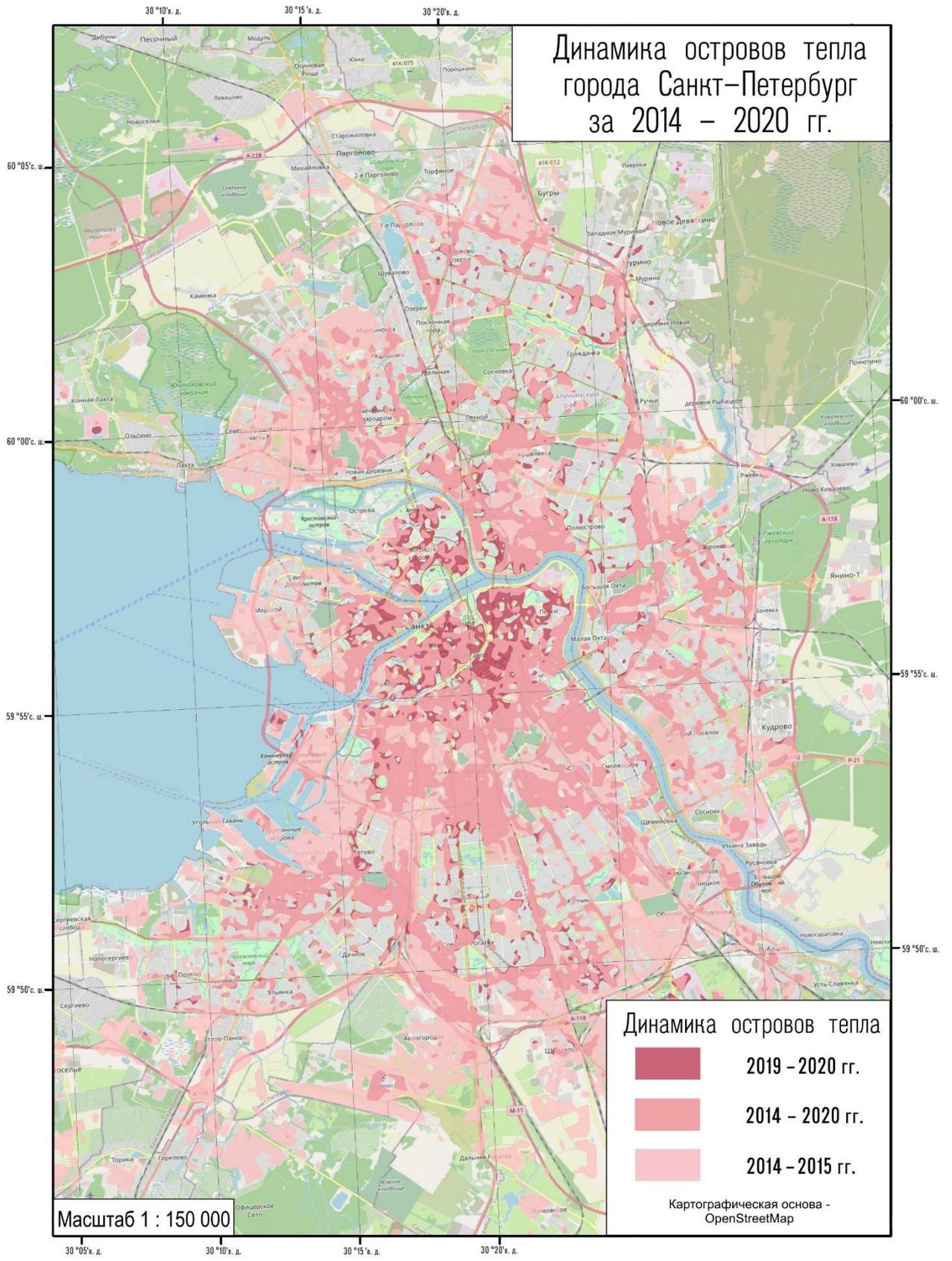


Рис.18. Карта динамики островов тепла Санкт-Петербурга.

#### *4.5. Карта островов тепла города Казань*

Анализируя тепловое загрязнение города Казань (рис.19), очевидно, что территория мало подвержена образованию тепловых островов и они в общем виде имеют точечный характер. В период 2014-2015 гг. наблюдаются тепловые аномалии в промышленных зонах на севере города («Казанский вертолетный завод», «ТЭЦ-2», «Казанское моторостроительное производственное объединение» и «Химград»), на востоке («Компрессормаш») и на юге («ТЭЦ-1», завод тепловых приборов и др.). Также особое внимание привлекают острова тепла, образованные на территориях больших торговых центров («Мега», «Парк Хаус»). Именно такие сооружения, с большими и темными крышами, являются точками образования тепловых аномалий в жилых районах.

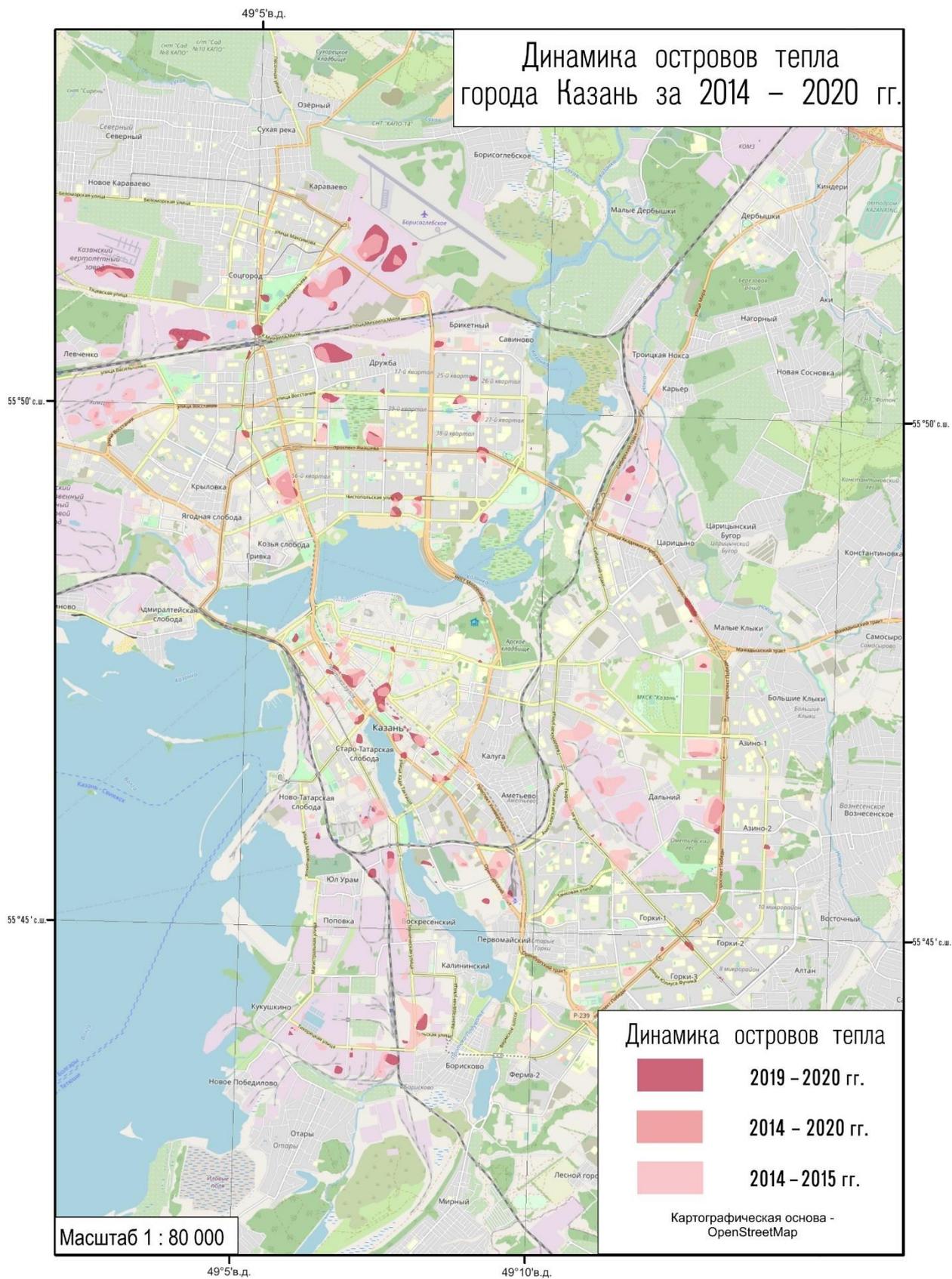


Рис.19. Карта динамики островов тепла Казани.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения исследования в рамках выпускной квалификационной работы был получен ряд электронных карт, которые показывают основные тепловые острова на территории городов для каждого периода. Они позволяют проследить изменения тепловой структуры городов в течение 6 лет с 2014 по 2020 гг.

Была формализована методика обработки спутниковых данных для получения карт динамики городских островов тепла, которая позволила сделать ряд выводов:

1) Среди проанализированных городов наиболее сильно подвержены тепловым аномалиям такие города как: Санкт-Петербург, Москва и Краснодар.

2) О целесообразности выноса старых промышленных объектов за пределы центральных и прилегающих к ним районов - современные промзоны, для уменьшения существующих островов тепла. Для существующих объектов, которые перенести невозможно, следует проводить реновацию с уменьшением выбросов тепла.

3) На освободившихся бывших промышленных зонах проводить редевелопмент территорий по примерам проектов, реализуемых в Москве.

4) Оптимизация старых и создание новых транспортных потоков для разгрузки сети дорог и уменьшения трафика, а вследствие и теплового загрязнения. Развивать виды общественного транспорта, использующие электроэнергию (метро, электробусы).

Результаты работы могут быть применимы и для комплексной оценки условий комфортного проживания человека и повышения качества жизни населения крупных городов России.

## ЛИТЕРАТУРА

### *Монографии:*

1. Агроклиматический справочник по Краснодарскому краю [Текст] / Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сев.-Кавказское упр. гидрометслужбы. - Краснодар: Кн. изд-во, 1961. — 467 с.
2. Агроклиматический справочник по Ленинградской области [Текст] / Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сев.-Зап. упр. гидрометеорол. службы. Ленингр. гидрометеорол. обсерватория. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1959. — 176 с.
3. Агроклиматический справочник по Московской области [Текст] / [Ред. проф. С. А. Сапожникова] ; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Моск. упр. гидрометслужбы. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1954. — 194 с.
4. Агроклиматический справочник по Рязанской области [Текст] / Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Упр. гидрометеорол. службы центр. областей. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1957. — 144 с.
5. Белова Л.Н., Булдаков Г.Н. Санкт-Петербург, Петроград, Ленинград. — Науч. изд-во «Большая российская энциклопедия», 1992. — 687 с.
6. Вагнер Б. Б., Манучарянц Б. О. Геология, рельеф и полезные ископаемые Московского региона. — Москва, 2003. — С. 28—35. — 81 с.
7. Климат Казани под ред. Н.В. Колобова, Ц.А. Швер, Э.П. Наумова, Ленинград Гидрометеиздат, 1990. – 185 с.
8. Климат Краснодара под ред. Ц.А. Швер, Т.И. Павличенко, Ленинград Гидрометеиздат, 1990. – 192 с.
9. Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология. Учеб. для вузов. М: Высш. шк., 2001. — 273 с.
10. Нагалецкий Ю.Я., Чистяков В.И. Физическая география Краснодарского края. Краснодар, Учеб. для вузов. М: Высш. шк., 2003. — 256 с.
11. Ситаров В. А., Пустовойтов В. В. С 41 Социальная экология: Учеб. Пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений., М.: Издательский центр «Академия», 2000. — 280 с.
12. Экология города Казани. – Казань: Изд-во «Фэн» Академия наук РТ, 2005. – 576с.
13. Энциклопедический справочник «Санкт-Петербург». - М.: Большая Российская энциклопедия. Белова Л.Н., Булдаков Г.Н., Дегтярев А.Я. и др. 1992.

14. Luke Howard, The climate of London, deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis, 2 vol., London, 1818

*Статьи в журналах:*

1. Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Исследование «теплового острова» Москвы по разносезонным снимкам Landsat-7/ETM+ // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 62–69.

2. Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Картографирование тепловых аномалий Москвы по разносезонным тепловым снимкам // Геоэкологические проблемы Новой Москвы. – М.: Медиа-ПРЕСС Москва, 2013. – С. 70–76.

3. Исследование 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. – 2015. – Спецвыпуск.– С. 38–42.

4. Королев Ю.К. Как подойти к обработке снимков, электронные текстовые данные/ArcReview, Современные геоинформационные технологии. – 1999. – №4.

5. Литвинов Д.В. Геоморфологический анализ ландшафта прибрежных зон крупных городов Среднего Поволжья // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура - 2011).

6. Опыт использования космических снимков при экологических исследованиях Москвы / И. А. Лабутина, Е. А. Балдина, М. Ю. Грищенко, Т. С. Хайбрахманов // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. – 2012. – № 1. – С. 50–55.

7. Погорелов А.В., Д.А. Липилин. Тепловой «портрет» Краснодара по спутниковым снимкам // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2016. – № 4

8. Weimin Wang, Kai Liu, Rong Tang, Shudong Wang. Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shanzhen, China // Physics and Chemistry of the Earth. – 2019.

*Тезисы докладов:*

1. Ana-Maria Branea, Marius Stelian Gaman, Mihai-Ionut Danciu, Stefana Badescu. Challenges regarding the study of urban heat islands. Ruleset for researchers // Risk Reduction for Resilient Cities. – 2016.

2. Gordana Kaplan, Ugur Avdan, Zehra Yigit Avdan. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite Data: A case study in Skopje, Macedonia // The 2nd International Electronic Conference on Remote Sensing. – 2018.

*Фондовые материалы:*

1. Зареи Саджад. Картографирование ландшафтов по данным спутникового термического зондирования и моделирования тепловых полей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, СПбГУ, 2017.
2. Иванова А.А. Картографирование теплового загрязнения территорий крупных транспортных узлов. Дипломная работа. М., МГУ, Географический факультет, 2018.
3. Харазми Р.С. Оценка динамики аридных экосистем на основе материалов дистанционного зондирования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., МИИГАиК, 2018.
4. Пивоваров Ю.Л. Современная урбанизация. Курс лекций. - М., РГГМУ, 1994.

*Ресурсы сети Интернет:*

1. <http://gis-lab.info/qa/grass7-landsat8-processing.html> - Казаков Э., Семенов А., Волгушева Н., Обработка и интерпретация данных Landsat 8(OLI) средствами GRASS GIS. Дата обращения: 13.04.2020.
2. <http://gis-lab.info/qa/landsat-datacorrection.html> - Силкин К., Коррекция материалов Landsat. Дата обращения: 13.04.2020.
3. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/> - официальный сайт NASA. Дата обращения: 20.04.2020.
4. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/> - информация о Landsat 8 Bands. Дата обращения: 20.04.2020.
5. <https://www.ipcc.ch> – Материалы доклада об изменении климата, 2013 г. Физическая научная основа Резюме для политиков МГЭИК Т.Ф. Стоккер, Д. Цинь, Дж.-К. Платтнер. – IPCC, 2013. Дата обращения: 20.05.2020.
6. <https://www.rbc.ru> – сведения о исследовании самых быстрорастущих городов России. Дата обращения: 15.03.2020.
7. [https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con) – информация об использовании Landsat 8 Геологической службой США. Дата обращения: 20.04.2020.
8. <https://yceo.yale.edu/how-convert-landsat-dns-top-atmosphere-toa-reflectance> – Converting Landsat TM and ETM+ thermal bands to atmosphere reflectance. Дата обращения: 15.03.2020.