

Санкт-Петербургский государственный университет

***КАГАН Михаил Борисович***

**Выпускная квалификационная работа**

***Применение данных дистанционного зондирования и географических информационных технологий для исследования расширения городов и агломераций***

Уровень образования: *магистратура*

Направление 05.04.03 *«Картография и геоинформатика»*

Основная образовательная программа *ВМ 5523 «Геоинформационное картографирование»*

Научный руководитель: доцент кафедры  
картографии и геоинформатики,  
к.т.н., Паниди Евгений Александрович

Рецензент: главный специалист отдела инженерных изысканий  
ООО «Эко-Экспресс-Сервис»,  
к.г.н., Солодов Алексей Анатольевич

Санкт-Петербург

2023

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>1. ИССЛЕДОВАНИЕ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ</b> .....	5
1.1. Урбанизированность.....	5
1.2. Острова тепла .....	8
1.3. Световое загрязнение .....	10
1.4. Опыт применения методов ДДЗ и ГИС.....	13
<b>2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	18
2.1. Выбор городов .....	18
2.2. Географическое положение и климат .....	19
2.2.1. Осло .....	19
2.2.2. Санкт-Петербург .....	22
2.2.3. Стокгольм .....	25
2.2.4. Хельсинки .....	27
<b>3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ</b> .....	30
3.1. Методика исследования .....	30
3.2. Материалы, использованные в исследовании .....	31
3.3. Исходные данные .....	35
3.4. Предобработка снимков.....	37
3.5. Постобработка снимков.....	39
<b>4. Результаты</b> .....	45
4.1. Санкт-Петербург .....	45
4.2. Хельсинки .....	52
4.3. Стокгольм .....	60
4.4. Осло .....	67
4.5. Общие результаты.....	73
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	76
<b>Литература</b> .....	77
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	83

## ВВЕДЕНИЕ

Мировое сообщество обеспокоено развитием городов. За прошлый век увеличилась доля населения, проживающих в городах. Но рост не остановился на этом, а только продолжился. Сегодня свыше 50% населения проживают на урбанизированных территориях. К 2050 году по прогнозам ООН (Организация объединенных наций) численность населения увеличится до 10 млрд на Земле. В тоже время урбанизированность вырастет до 70%, так как люди начнут выбирать города для удобства проживания в них.

Расширение города естественный процесс, который приводит к увеличению его самого, так и ближайших населенных пунктов, которые со временем объединяются в единую агломерацию. Люди начинают работать и проводить время в больших городах, в дальнейшем переезжая в них. Увеличение населения ведет за собой застройку новых территорий, которые, например, изымаются из рекреационных или сельскохозяйственных земель, в некоторых случаях изменение городских границ или намыв участков в прибрежных зонах. Данный процесс ведет к изменению климата территорий, ухудшению воздуха в городах, нагреванию поверхностей за счет увеличения бетонных и асфальтных покрытий. А это уже в свою очередь влияет на здоровье самих жителей. Данная проблема является актуальной и с каждым годом становится все более важной для наших городов. Поэтому многие ученые, эксперты и исследователи предлагают различные подходы для действенного управления городами

Данные спутникового дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) и географические информационные системы помогают в мониторинге роста городов и агломераций экспертам, исследователям, градостроителям и государственным служащим. С помощью космических снимков можно оценить развитие урбанизированных территорий с высокой временной частотой. Полученные данные позволяют уменьшить полевые исследования и трудозатраты, а также предоставляют возможность визуализировать пространственную информацию. Некоторые данные невозможно собрать в полевых условиях, например, световое загрязнение или температуру поверхности Земли.

Дистанционное зондирование Земли можно применять в качестве исходных данных для территориального планирования городов и агломераций.

Цель работы состоит в проведение анализа роста городов с применением данных дистанционного зондирования и географических информационных систем. Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. систематизировать информацию о росте городов по фондовым источникам;

2. рассмотреть долю озелененности городов;
3. проанализировать световое загрязнение городов;
4. исследовать увеличение застройки в городах и агломерациях;
5. оценить динамику численности населения в городах и агломерациях;
6. выявить изменение температуры поверхности в городах.

Объектом исследования работы является создание методов и способ для изучения расширения городов и агломераций с применением данных дистанционного зондирования Земли и географических информационных систем.

Предмет исследования – методика ДДЗ для исследования роста городов и агломераций.

Автор выражает благодарность за бесценную помощь в подготовке выпускной квалификационной работы своему научному консультанту старшему преподавателю кафедры «Картография и геоинформатика» Поздняковой Н.А.



# 1. ИССЛЕДОВАНИЕ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

## 1.1. Урбанизированность

Рост городов, который наблюдается в наше время, является серьезной проблемой для человечества в новом веке. Каждый месяц прирост населения на урбанизированных территориях составляет 5 миллионов человек, и данный рост остается практически экспоненциальным, и по прогнозам пик может быть только к середине века. Различные экономисты, аналитики, эксперты и ученые в области урбанистики ведут бурные дискуссии об оценивании потребления земельными ресурсами, об управляемом размере мегаполисов и несложных способах структурирования огромного распространения урбанизации (Schweitzer, 2006).

Урбанизация – процесс повышения роли городов в обществе и увеличения доли городского населения в общем составе. Также она является следствием миграции населения из сельской в городскую местность. В индустриальной эпохе ни одной стране не удалось добиться экономического развития без урбанизации. Но другая сторона проблемы в том, что города сильно воздействуют на окружающую среду. Как результат изменения растительного покрова, гидрологических систем, климата и биоразнообразия среды.

Расширение городов во всем мире – это один из основных факторов потери среды обитания и исчезновения биоразнообразия. Рост городской территории приводит к увеличению спроса на ресурсы, получения энергии, увеличения выбросов диоксида углерода и отходов от производства. Также происходит изменение микроклимата, ухудшение качества воздуха, который в свою очередь влияет на здоровье горожан, загрязнение водных ресурсов.

В 2020 г. в Абу-Даби проходил десятый форум городов. На нем привели факты, что половина человечества – 3,5 млрд. человек проживает в городах и по прогнозам к 2030 году в городских районах уже будет проживать 5 млрд человек. Также в ближайшее время свыше 90% роста городов будет приходиться на развивающиеся страны. Города занимают примерно 3% суши, но на них приходится около 75% выбросов углекислого газа, и главная проблема заключается в том, что в 2016 году 90% горожан дышали воздухом, который не отвечал установленному ВОЗ (Всемирная организация здравоохранения) стандарту безопасности. В итоге это привело к смерти 4,2 миллиона человек.

В 2022 году в Катовице в Польше прошел одиннадцатый форум городов. На нем затрагивали различные темы, например, города являются двигателями экономического развития и инноваций, увеличение урбанизации приводит к загруженности населенных

пунктов, ухудшению качества воздуха, росту CO<sub>2</sub>. Не проектируемый рост города приводит к перенаселению территории и возникновению трущоб. На города приходится 80% ВВП всего мира. Также в обсуждении поговорили о территориях, которые правильно спланированы и хорошо управляемы, что дает местным жителям большие возможности как в работе, так и в досуге.

Урбанизация не только рост и появление новых городов, но и процесс объединения городов между собой, который называется агломерацией. Потом происходит процесс сближения с соседними населенными пунктами, что приводит к созданию мегаполисов и сильно урбанизированных территорий. Самая крупная агломерация – Токио – Иокогама, далее располагаются мегаполисы Юго-Восточной Азии, Санкт – Петербург на 73 месте по данным на 2015г. Также выделяют такое понятие как урбанизированная территория – это площади, которые занимают города и поселения и связанные с ними инженерные, производственные и транспортные связи. По типу планировочной структуры различают линейные, компактные и рассредоточенные территории. Урбанизированные территории сопровождаются нарушениями в экологические обстановки региона (Юйлинь, 2017).

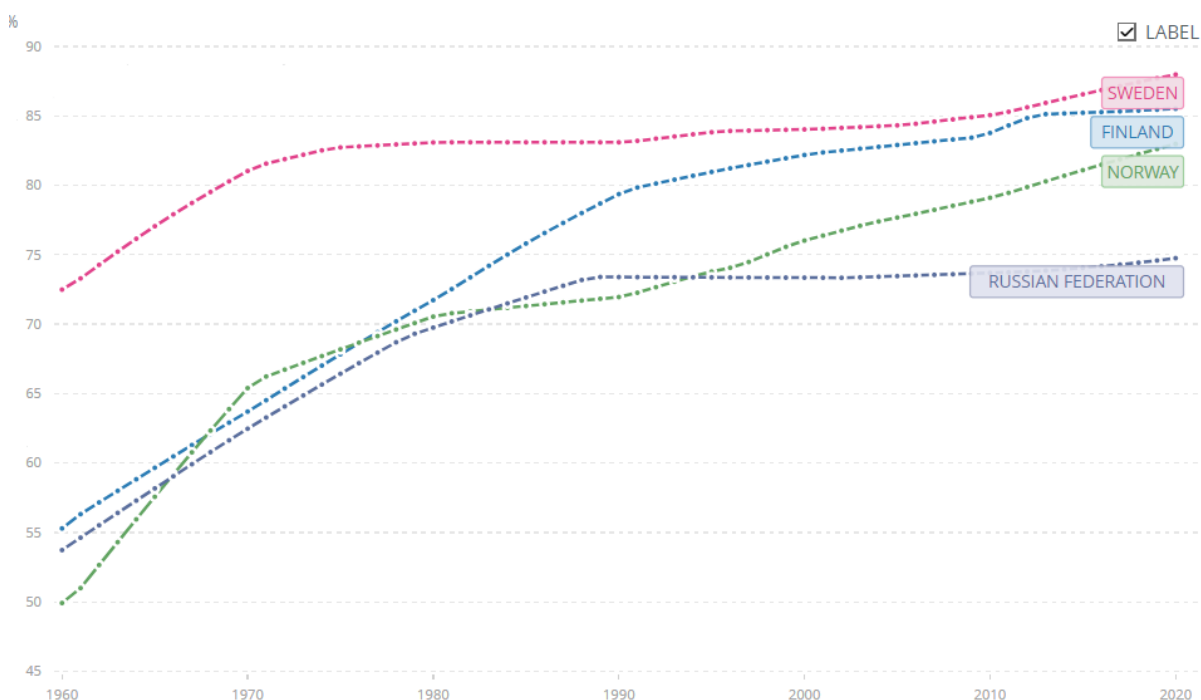


Рисунок 1. Изменение уровня урбанизации с 1960 – 2020 г. (Международный банк реконструкции и развития, 2022)

ВОЗ указывает, что серьезные проблемы со здоровьем горожан отмечены в городах, которые имеют низкое качество питьевой воды и загрязнение воздуха, а также с отсутствием физической активности. В 2010 г. ВОЗ посвятила всемирный день

здоровья кампании под названием «1000 городов, 1000 жизней». Цель заключалась в создании комфортной среды для местных жителей и реализация проектов здорового города.

В организации уверены, что городское планирование может оказывать влияние на здоровье жителей путем создания специальных мест для тренировок, улучшения жилищных условий в городах, повышение качества питьевой воды и воздуха.

Уровень урбанизации в Норвегии составляет 83%, России 75%, Финляндии 86%, Швеции 88% по данным на 2020 г. из всемирного международного банка реконструкции и развития (МБРР). По картинке (рис.1) видно, что наибольший уровень урбанизации в Швеции. В Норвегии наблюдается постоянный тренд роста с 1960-х годов. Можно отметить замедление роста в России, где после 1990-го года наблюдалось небольшое снижение. При рассмотрении периода в 60 лет, можно с уверенностью сказать об увеличении уровня урбанизации во всех четырех странах.

Данные дистанционного зондирования могут служить надежной основой для создания схем территориального планирования и градостроительной документации. Спутниковые снимки представляют полную информацию о земельных ресурсах, объектах строительства, транспортной инфраструктуре и т.д. Также целесообразно использовать данные и для развития городских территорий (Кресникова, Васильевых, 2018). Снимки можно просматривать в естественных цветах, но также есть возможность изучать в псевдоцветах, используя различные комбинации каналов. А используя производные изображения, например, NDVI или NDBI, оцениваем функциональные зоны городов, которые являются неотъемлемой частью при создании генеральных или территориальных планов (рис.2).

Нехватка земли в границах города для строительства или редевелопмент «серых поясов» (зона промышленной застройки – заводы и фабрики, которые оказались в центре города из-за удаления современных окраин), связаны с изменением функциональных зон территорий. Это зоны, для которых генеральным планом устанавливается функциональное назначение, типы и виды функционально-планировочных образований, которые могут быть образованы в пределах таких зон (зоны жилого, общественно-делового, промышленного, рекреационного назначения). Без изменения функциональной зоны нельзя начать строительство на данной территории.

При застройке территории возникают новые проблемы, возрастает температура за счет нагрева поверхностей, увеличивается световое загрязнение, которое негативно

сказывается на горожанах и окружающей среде. Поэтому стоит рассматривать увеличение застройки с возникновением островов тепла и световым загрязнением.

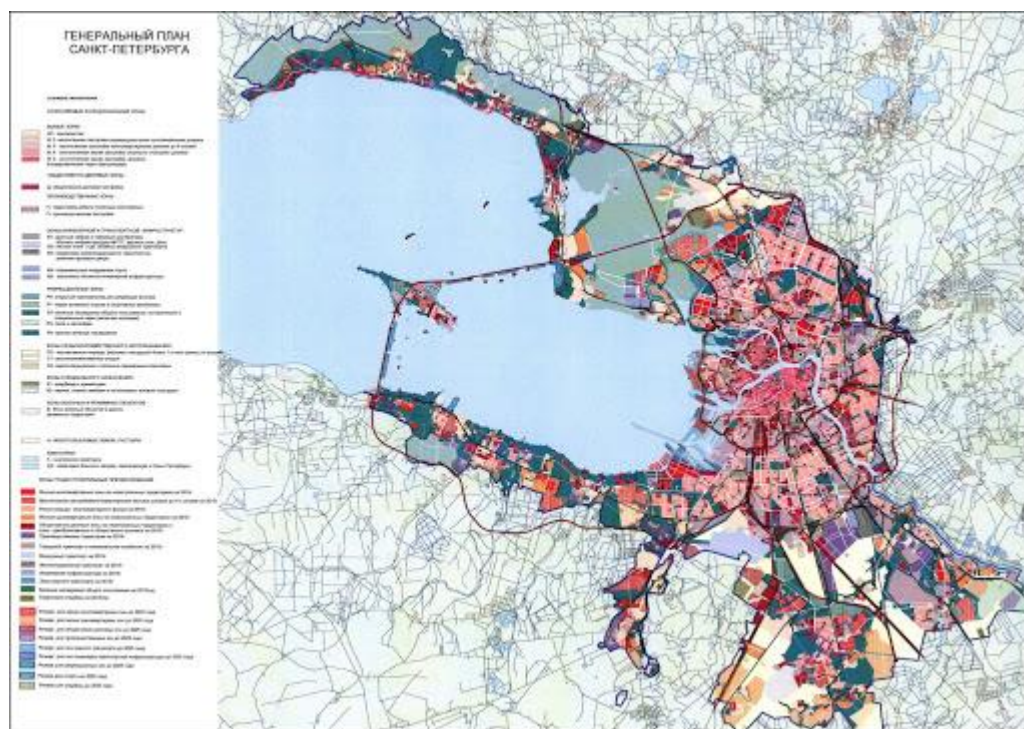


Рисунок 2. Пример генерального план Санкт-Петербурга на 2015 г. (Генеральный план Санкт-Петербург, 2023)

### 1.2. Острова тепла

Острова тепла обнаружил и открыл британский метеоролог Люк Говард в начале 19 века (Howard, 1818). Он провел измерения температуры воздуха в центре Лондона и в районе Тоттенхэм, который тогда являлся пригородом Лондона. Проводя измерения в течение нескольких месяцев, Люк Говард заметил, что температура в центре Лондона выше, чем на окраине, особенно ночью. Люк нашел разницу по уравнению, вычитая городскую местность из сельской (Mills, 2008). Островом тепла называется зона повышенной температуры над урбанизированной территорией (рис.3). Наибольшая разница температур заметна в ночные часы, нежели в дневные и особенно при безветренной погоде, когда нет проветривания улиц естественными потоками, способными охладить поверхность (Howard, 1818). Одна из основных причин возникновения островов тепла в том, что в городе наблюдается малое количество растительности и открытой поверхности, которая выступает в роли охладителя территории. Растительность, трава, деревья и водоемы способны понижать температуру окружающей местности, давая собственную тень и за счет поглощения зеленой растительностью воды, которая испаряясь, дает прохладу. Крыши, здания, тротуары,

большие площади асфальтового покрытия, стеклянные небоскребы быстрее испаряют влагу, чем природные ландшафты, тем самым способствуя повышению температуры. Темные материалы, из которых они производятся, поглощают большое количество энергии и имеют низкое альbedo, тем самым нагревая поверхность.

## URBAN HEAT ISLAND PROFILE

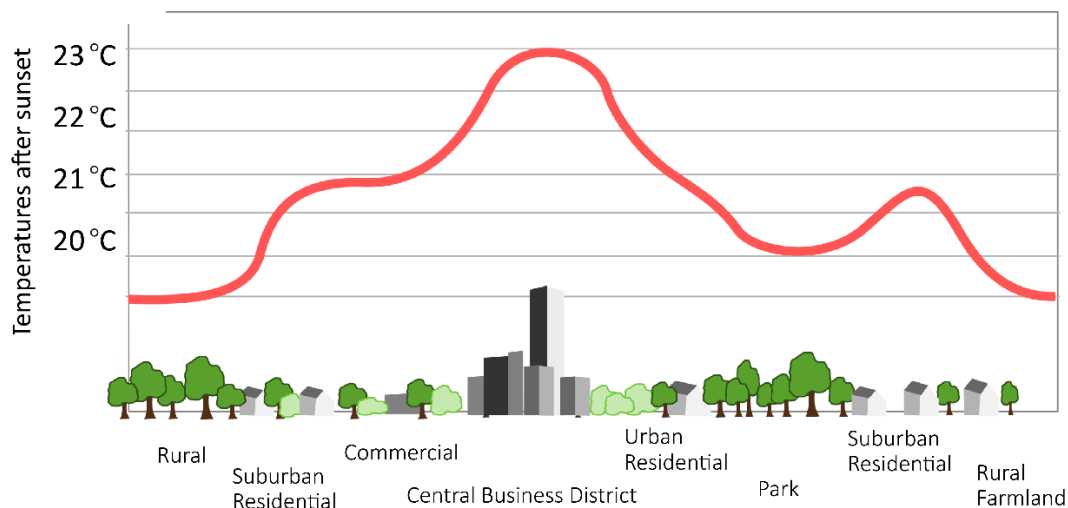


Рисунок 3. Острова тепла над городскими и сельскими территориями (Городские острова тепла, 2023)

Недостаток также заключается в меньших затратах энергии на испарение воды, меньшее отражение солнечной энергии, накапливание тепла зданиями, асфальтом, чем в сельской местности. Антропогенные источники тепла (автомобили, работа промышленных секторов, охлаждение/отопление зданий, бытовая деятельность) также влияют, на повышение температуры в урбанизированной местности и тем самым, создавая парниковый эффект. Также оказывать воздействие может и рельеф подстилающей поверхности. Рядом расположенные горы могут блокировать попадание ветра в город, а могут, наоборот, формировать и направлять поток через городскую среду.

В связи с изменением климата отмечается повышение температуры воздуха и увеличение периодов аномальной жары в летние месяцы. Продолжительные промежутки тепла в дневные и ночные периоды создают нагрузки для организма человека, который оказывает влияние на течение заболеваний, являющихся основными причинами смерти во всем мире, включая респираторные и сердечнососудистые заболевания, сахарный диабет и заболевания почек. Многие фокусируются на глобальном потеплении климата, но в границах города температура по сравнению с сельской местностью может быть выше от 5 до 10 °C. Это создает сложности для определенных групп населения (пожилые люди, младенцы, беременные,

лица, работающие на открытом воздухе или занятые ручным трудом), которым сложно переносить высокие температуры. Летом с приходом аномальных температур в Европе повышается количество смертей, которые связаны с высокими значениями температуры (Hoeven, Wandl, 2015). Многие города решили бороться с этим при помощи озеленения, водных объектов, которые могли бы давать населению прохладу в условиях жаркого города.

### 1.3. Световое загрязнение

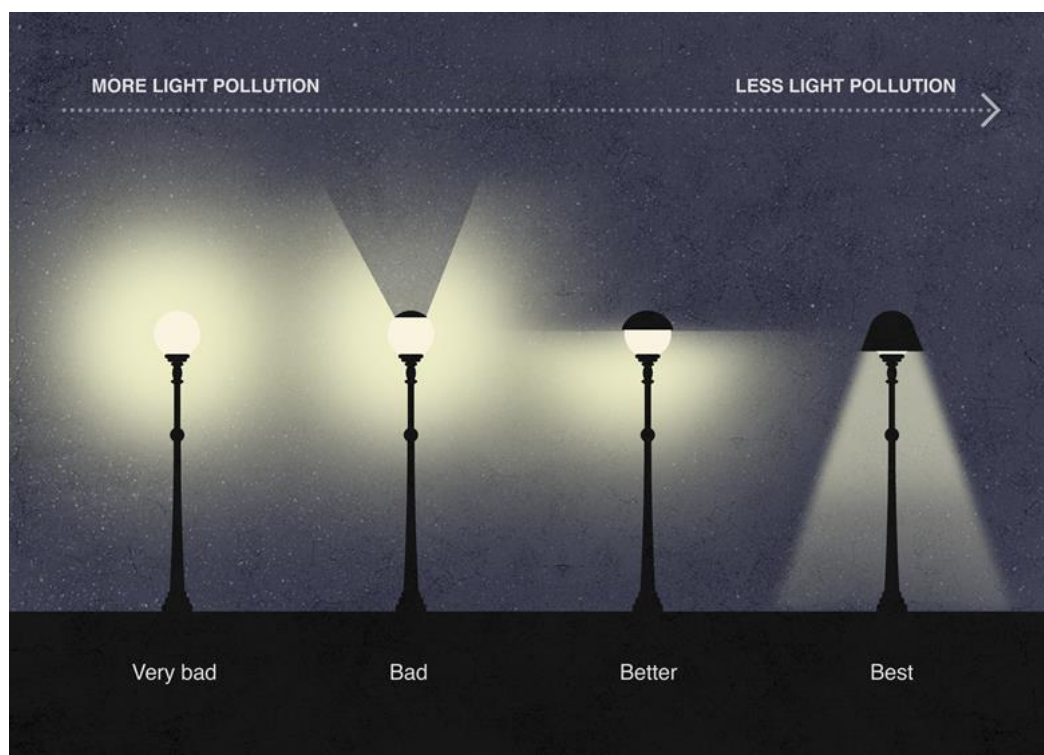


Рисунок 4. Влияние светового загрязнения (Международная ассоциация ночного неба, 2023)

Световое загрязнение-это чрезмерный, неверно направленный искусственный (обычно уличный) свет (рис.4). Слишком сильное световое загрязнение имеет последствия:

- не дает возможности наблюдать звездное небо ночью;
- негативно влияет на астрономические исследования;
- разрушает биологические системы;
- оказывает воздействие на здоровье людей;
- вхолостую расходует энергию.

Сегодня примерно 23% поверхности Земли находится под влиянием искусственного света. Почти 80% населения подвергается его воздействию, включая 99% живущих в Европе и США. В мире с каждым годом света становится все больше,

площадь искусственно освещенных территорий выросла на 2,2% с 2012 по 2016 года, а яркость света повышается на 1,8% ежегодно. Самое парадоксальное, что это связано с переходом на энергоэффективные светодиодные лампы, которые считаются более экологичными.

Световое загрязнение негативно влияет и на здоровье человека, нарушая его биологические часы. Распространение искусственного освещения означает, что большинство людей больше не переживают по-настоящему темные ночи. Исследования показывают, что искусственный свет в ночное время может негативно повлиять на здоровье человека, увеличивая риск ожирения, депрессии, нарушения сна, диабета, рака и многого другого. Во время сна у человека вырабатывается мелатонин, который борется с раковыми клетками и отвечает за общее состояние здоровья. Но при искусственном освещении его выработка сокращается. Если его в организме становится недостаточно, то в дальнейшем это может привести к развитию рака (Spiney, 2010).

Для животных и насекомых искусственный свет сказывается также негативно. Например, многие насекомые становятся видны для хищников в ночное время из-за освещения территории. Это приводит к сокращениям их популяций на освещенных участках.

Каждый год из-за негативных последствий от светового загрязнения на окружающую среду и здоровье людей тратится около \$7 млрд. Также проблема заключается в том, что доступ к более энергоэффективным лампам заставляет людей больше устанавливать новых источников света. Следовательно, вся выгода от энергосбережения утрачивается. Это называется парадоксом Джевонса. Эффективность использования ресурса может увеличить объем его потребления.

Проблема светового загрязнения наталкивается на проблему безопасности. Невозможно просто выключить в городах свет, хоть это и несет положительный эффект для окружающей среды. В некоторых районах Великобритании для экономии денег муниципалитеты стали выключать фонари глубокой ночью, когда на улицах практически нет людей. После этого ученые обнаружили положительную динамику размножения некоторых насекомых. Исследования показывают, что выключать свет с полуночи до рассвета достаточно, чтобы предотвратить нарушение поведения у животных.

Впрочем, не все города и страны готовы выключать ночью освещение, поэтому Международная комиссия по освещению приняла рекомендации, в которых прописаны допустимые уровни попадания нежелательного света для разных природных зон. Нежелательный свет, или нерациональное использование света - одна из основных



причин светового загрязнения. Это ситуации, когда свет падает на территорию или объекты, которые не нужно освещать. Основная причина нежелательного света - ошибки проектирования.

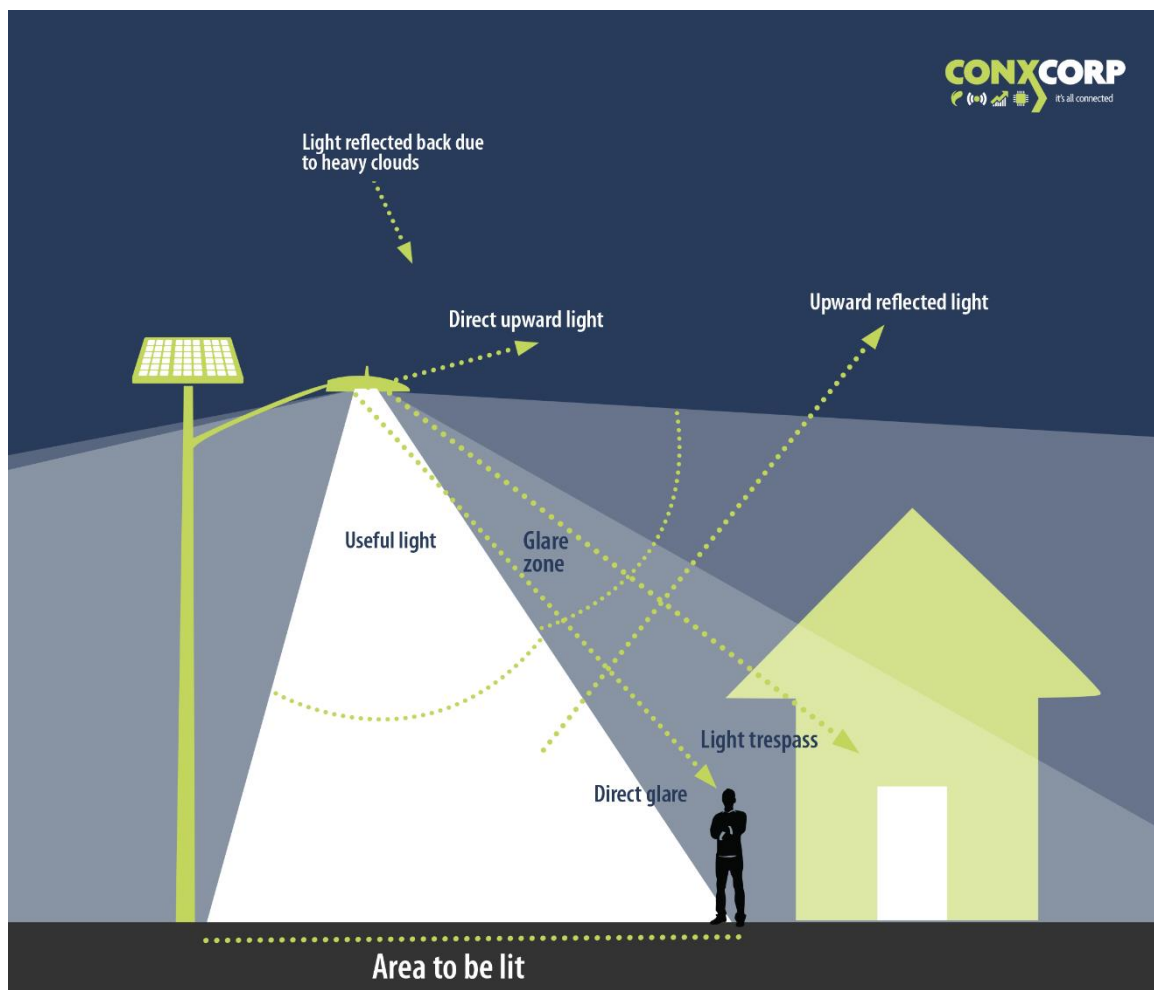


Рисунок 5. Падение и отражение искусственного света (Международная ассоциация ночного неба, 2023)

Международная ассоциация темного неба сформулировала пять правил, которых стоит придерживаться, чтобы сократить негативное влияние от светового загрязнения:

- Необходимо понять, действительно ли нужно осветить территорию. Эксперты предлагают подумать, как свет повлияет на местность, в том числе на дикую природу.
- Если никак не уйти от освещения, необходимо избавиться от нежелательного света, т.е. направлять лампы и фонари только на те места, которые нужно подсветить (рис.5).
- Свет не должен быть ярче, чем необходимо. Эксперты призывают использовать минимальный требуемый уровень освещенности.
- Свет следует использовать только тогда, когда он полезен. В этом могут помочь датчики движения.



- По возможности использовать более теплые оттенки. Эксперты советуют ограничить коротковолновый сине-фиолетовый свет до минимально необходимого количества, так как он наиболее вреден для насекомых и животных, за счет высоких тепловых значений, которые позволяют выделять мелкие объекты.

#### *1.4. Опыт применения методов ДДЗ и ГИС*

Отечественные ученые выделяют зеленую инфраструктуру как один из эффективных инструментов в современных городах для создания комфортной среды. В качестве примера был выбран город Кировск в Мурманской области. Он располагается в непосредственной близости к рудникам и обогатительной фабрике по производству апатитов. Основная доля выбросов приходится на неорганическую пыль, которая выделяется на различных этапах производства. Градообразующее предприятие является лидером по загрязнению в городском округе, но на территорию самого города Кировска большое влияние оказывает автотранспорт (Пакина, Лелькова, 2019).

Как отмечают исследователи, загрязнение атмосферного воздуха главная проблема многих городов мира. Расчеты показали, что суммарный выброс от автотранспорта в г. Кировске 2,9 тыс. т/год, из которых 84% углеводороды. По данным на 2017 г. площадь зеленых насаждений составляла 1010 га. Ученые оценивали эффективность зеленой инфраструктуры по функциям:

- гигиеническая (поддержание качества среды);
- защитная (защита от предприятий);
- рекреационная (для отдыха).

Гигиеническая функция оценивалась по эффективности газопоглощения выбросов от автотранспорта по различным данным: объем выбросов, состав и количество зеленых насаждений, интенсивность улавливания различными породами деревьев в сутки. Среднее поглощение одним деревом составило 27,4 г. Общий объем на площади в 99,5 га составил 317, 6 т. за вегетационный период. Исследование показало недостаточный уровень озеленения вдоль транспортной сети, так как средний показатель составил 11%.

Защищающая функция оценивалась по данным анализа степени озеленения санитарно-защитных зон (СЗЗ) производственных территорий, объектов транспортной и инженерной инфраструктуры, а также транспортных путей города. По данным генплана площадь СЗЗ 327 га, из которых озеленение составляет 166 га. Оптимальный уровень не менее 60% озеленения в СЗЗ, но в Кировске данный показатель составил 51%.

Исследователи отметили дефицит зеленых зон в местах жилой застройки, северной части города и микрорайоне Кукисвумчорр.

Рекреационная функция оценивалась по социальному опросу местных жителей и по санитарным нормам. Согласно им, площадь парков в городе должна быть не менее 15 га и на одного жителя приходится не менее 8 м<sup>2</sup>. Рассчитав показатели, ученые получили данные, что на 1 жителя приходится более 18 м<sup>2</sup>.

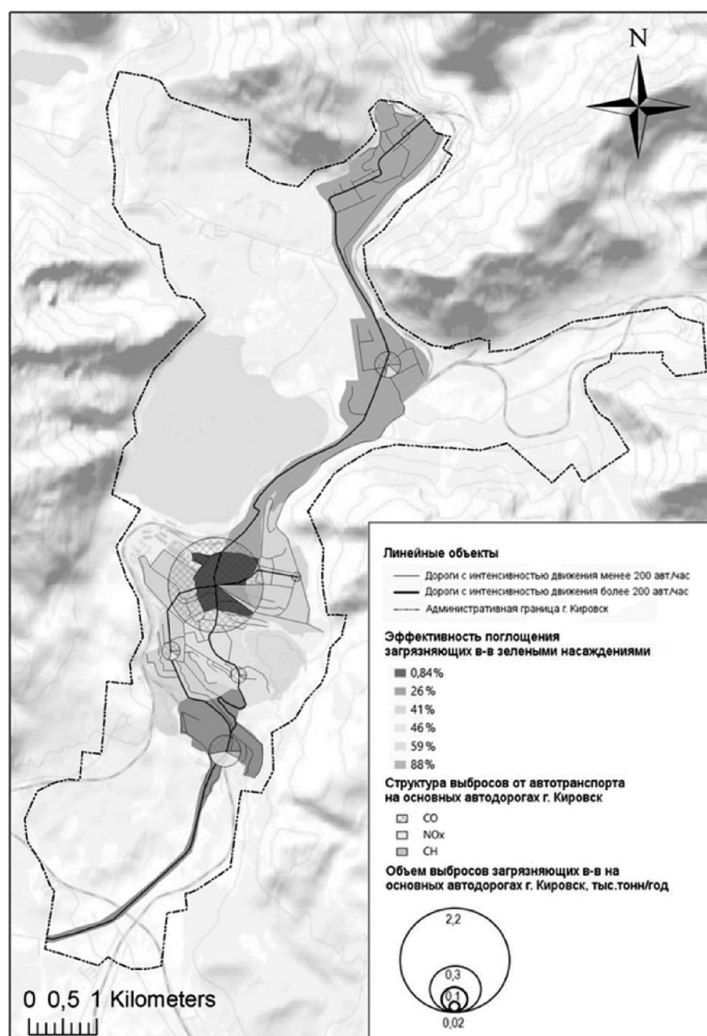


Рисунок 6. Эффективность поглощения выбросов от автотранспорта зелеными насаждениями г. Кировска (Пакина, Лелькова, 2019)

Полученные результаты работы позволяют говорить, что в городе имеются резервы для улучшения среды путем развития зеленой инфраструктуры (рис.6). Наличие в границах города обширных зеленых зон создает благоприятные условия для улучшения социально-экономической ситуации. Внесение небольших изменений может способствовать предотвращению последствий неблагоприятных природных явлений, увеличения островов тепла, шумового и других видов воздействий на население (Пакина, Лелькова, 2019). Создание комфортной среды привлекает в город новых жителей, предотвращая отток населения.

Зарубежные ученые из департамента городского развития и окружающей среды королевского института технологий Стокгольма провели исследование мониторинга урбанизации и городской среды в Стокгольме с помощью Sentinel-2A и SPOT-5 (Furberg, Van и др., 2019). Стокгольм является быстрорастущей столицей Европы и крупной среди остальных в Скандинавии. Период времени был взят с 2005 по 2015 г. За этот промежуток времени исследователи оценили влияние роста города на охраняемые зеленые зоны, зеленую инфраструктуру и экосистемные услуги города (рис.7).

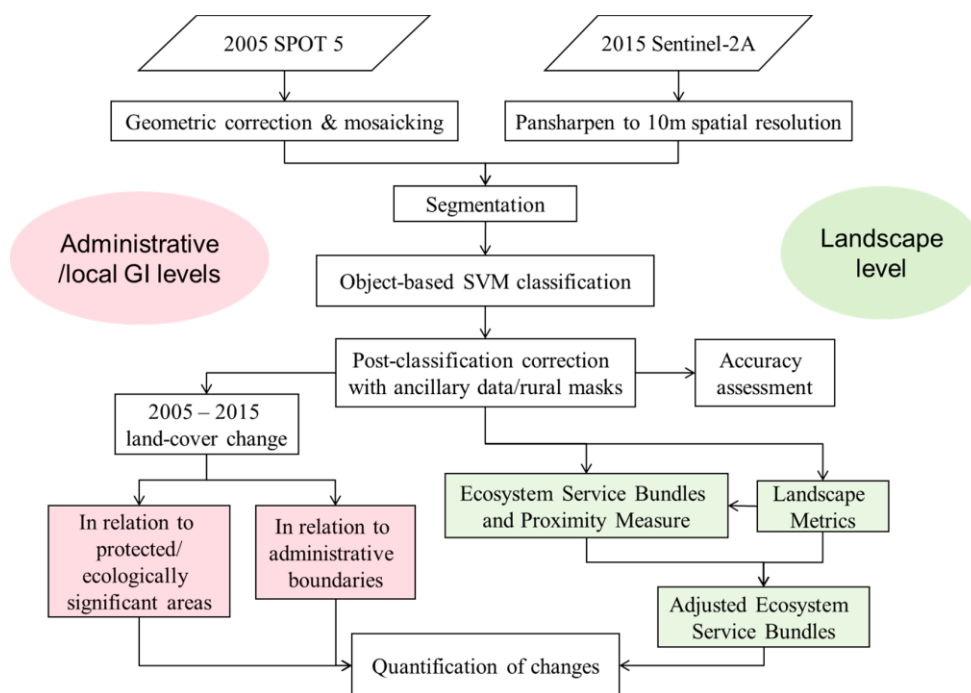


Рисунок 7. Блок-схема методологии с подробным описанием основных этапов исследования (Furberg, Van и др., 2019)

В ходе исследования ученые установили, что земельный покров за пределами города сократился, а застроенные территории наоборот возросли примерно на 2% или на 116 км<sup>2</sup> от площади округа Стокгольма. Городские площади увеличились на 15%, в то время как за пределами города не урбанизированные территории уменьшились чуть менее чем на 4%. По картинке (рис.8), к 2015 году рост городов сместился в процентном отношении так, что разрыв между сельскохозяйственными землями и городскими районами значительно сократился: сельское хозяйство 15,2%, а городские территории 13,3%. Это предполагает, что городские районы могут вскоре вытеснить сельское хозяйство в качестве второй по величине категории земного покрова в ландшафте округа Стокгольм.

В качестве экосистемных услуг сокращение лесного покрова привело к увеличению температуры воздуха и шума из-за роста городских территорий.

Исследователи проанализировали различия урбанизированных земель среди округа Стокгольма и выявили рост за 10 лет во всех муниципалитетах, но в семи из них увеличение составило более чем на 5%. Данные населенные пункты располагаются к северу от Стокгольма. Это связано с тем, что площадь южных муниципалитетов гораздо больше, нежели северных (Furberg, Van и др., 2019).

За десятилетие лесные массивы потеряли 80 км<sup>2</sup>, которые преобразовали в городские и промышленные территории. Сокращение ведет к уменьшению биоразнообразия региона. Ученые предполагают, что причина городской экспансии состоит в формальной или отсутствующей законодательной защиты зеленых зон под давлением увеличивающегося населения.

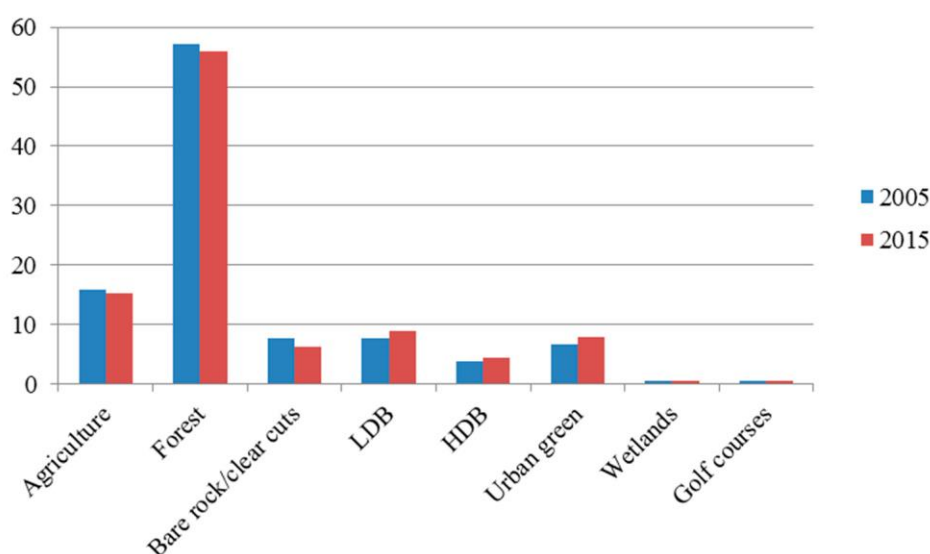


Рисунок 8. Изменения земельной площади в округе Стокгольм с 2005 по 2015 г. (Furberg, Van и др., 2019)

Положительный момент исследователи отметили в сохранение водно-болотных угодьев, которые более-менее стабильны по площади в течение всего периода исследования. Но есть предположение, что разрешения в 10 м не достаточно для выявления изменений, так как в данном регионе площади их территорий невелики.

В итогах подчеркивают об увеличении городской площади на 15%, но не урбанизированные территории сократились только на 4%. Результаты говорят о том, что сельскохозяйственные земли уступят второе место городам. Лес больше остальных пострадал от роста урбанизированных земель. Это сказалось на биоразнообразии природы, борьбе с потеплением климата, ухудшение качества воздуха в регионе. Расширение городов привело к сокращению зеленого каркаса и ослаблению звеньев в районах (Furberg, Van и др., 2019).

Постоянно обновляемый пространственно-временной анализ ключевых экологических ареалов и их сравнение с существующими слабыми зелеными связями, может быть полезной частью будущего мониторинга окружающей среды, чтобы ресурсы планирования и восстановительные работы своевременно направлялись на нужные земли.

В другом зарубежном исследовании индийские ученые проанализировали связь между данными LST (температура поверхности Земли), NDVI (вегетационный индекс) и NDBI (индекс застройки территории) со спутника Landsat 8 в городе Хошангабад в штате Мадхья-Прадеш в Индии (Malik, Shukla и др, 2019). Температура поверхности земли определяется как температура на границе между двумя поверхностями: атмосферой и землей. Дистанционное зондирование с разновременной и разной разрешающей способностью изображения могут предоставить базовые данные для анализа городской пространственной информации и тепловой окружающей среды. Предыдущие исследования показывают, что существует сильная отрицательная корреляция между NDVI и LST, в то время как NDVI сильно меняется в зависимости от сезона. Сезонное изменение LST рассчитывали по спутниковым данным в ПО ArcGIS и произвели отношение с двумя индексами: NDBI и NDVI. Были выбраны три разновременных снимка: зимой, в конце весны и середине осени (рис.9).

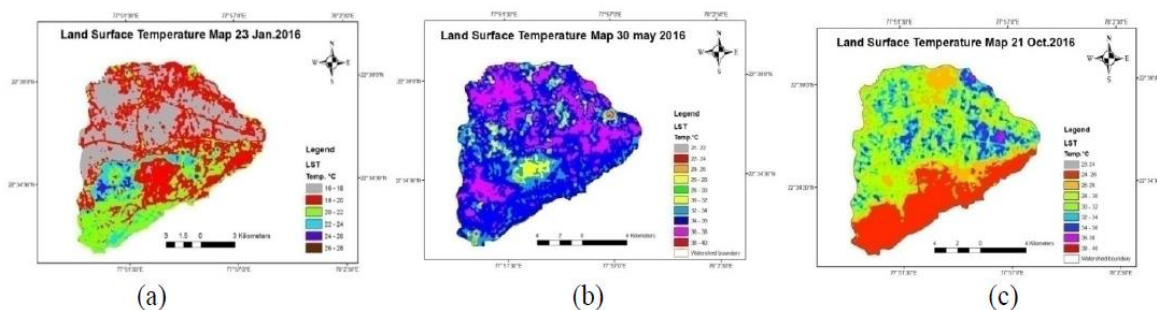


Рисунок 9. Карты температуры поверхности по сезонам (Malik, Shukla и др, 2019)

Анализ LST показал более высокую температуру поверхности на открытых участках и низкую на участках с растительностью. Отношения между NDBI и LST выявили положительную корреляцию в каждом сезоне года. Застроенные территории и места с открытой поверхностью показали максимальную температуру в отличие от зон с растительностью. Между NDVI и LST корреляция негативная, изменяясь немного от времени года, особенно в сезон дождей, что говорит нам о влиянии зеленой растительности в понижение температуры (Malik, Shukla и др, 2019). Индекс NDBI можно использовать не только для анализа и прогнозирования LST, но также и для обеспечения надежной основы для строительства и планирования.

## 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Выбор городов

В качестве объектов исследования были выбраны четыре города: Осло (Норвегия), Санкт-Петербург (Россия), Стокгольм (Швеция) и Хельсинки (Финляндия). Города располагаются примерно на одинаковой широте -  $60^\circ$  с.ш. Интересный момент, что по долготе города расположены примерно через  $6^\circ$ , кроме расстояния между Осло и Стокгольмом, где значение превышает  $6^\circ$ . (табл.1).

Таблица 1. Координаты выбранных городов

Город	широта	долгота
Осло	$59^\circ 54'$ с.ш.	$10^\circ 44'$ в.д.
Стокгольм	$59^\circ 19'$ с.ш.	$18^\circ 03'$ в.д.
Хельсинки	$60^\circ 10'$ с.ш.	$24^\circ 56'$ в.д.
Санкт-Петербург	$59^\circ 57'$ с.ш.	$30^\circ 19'$ в.д.

По физико-географическому расположению города выходят к заливам: Финский залив (Санкт-Петербург и Хельсинки), залив Сальтшен (Стокгольм) и Осло-фьорд (Осло). Климат умеренно морской для всех четырех городов.

За счет расположения и схожести климата, города стараются обмениваться опытом по планированию и развитию территорий (рис.10).

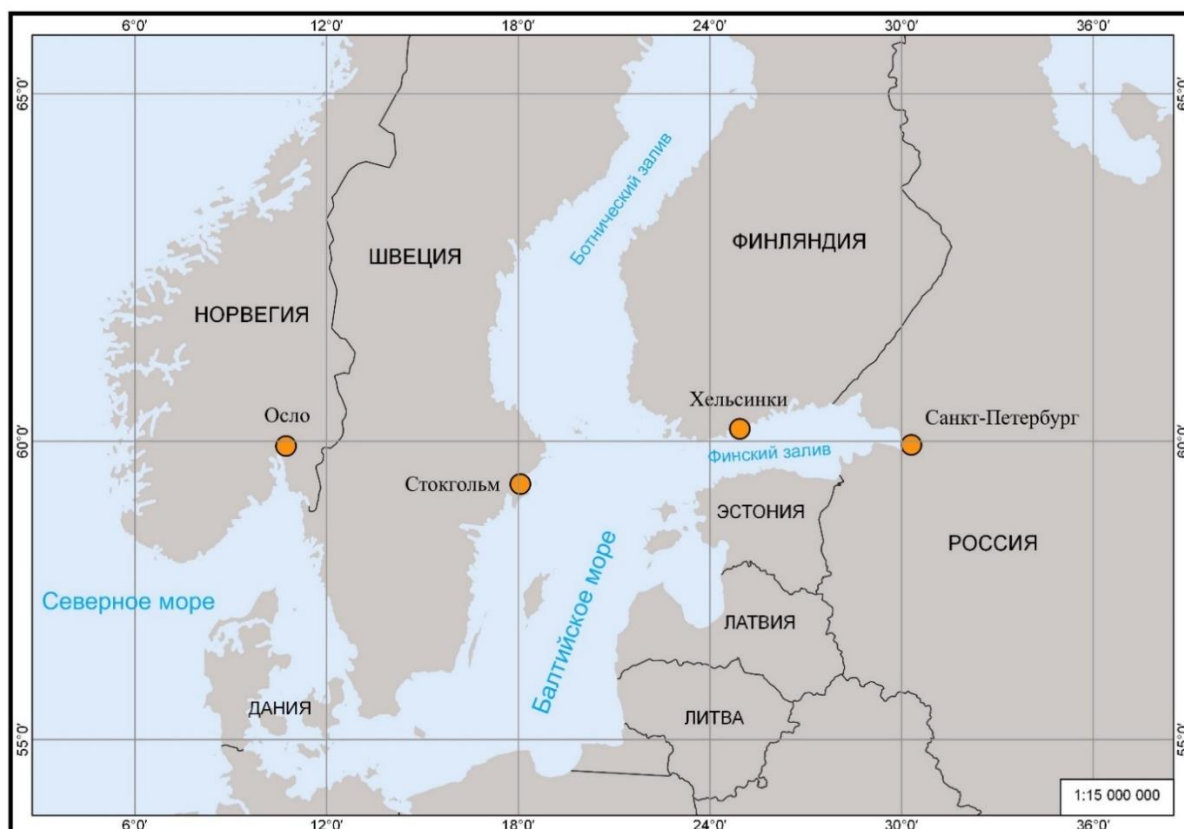


Рисунок 10. Расположение объектов исследования



## 2.2. Географическое положение и климат

### 2.2.1. Осло

**Осло** – столица королевства Норвегия и самый крупный город страны (рис.11). По упоминаниям в саге город основан в 1049 г. Харальдом III Суровым. Столицей Осло стал в 1299 г., сменив Берген. В 1397 г. Норвегия вошла в Кальмарскую унию, в связи с чем столицей стал Копенгаген. Постройки были в основном деревянные, из-за чего город многократно страдал от пожаров. После одного из таких пожаров в 1624 г. король перевел жителей в новое место поблизости крепости Акерсхус, которое получило название в честь правителя – Христиния. В 18 в. экономика получила рост за счет кораблестроения, которая превратила город в торговый порт. В следующем столетии приход индустриализации, которая увеличила численность населения в городе. С 1814 г. Дания уступила Швеции Норвегию. В 1877 г. после проведения реформ, столица стала называться Кристианией на шведский манер. В 1905 году Норвегия получила независимость, в связи с чем стало неуместно использовать название Кристиания в честь датского короля. Только в 1924 г. название вернули. Изначально Осло назывался восточный пригород столицы. В 20 в. город заметно разросся, в 1948 году к нему присоединили Акер. В 1960-х годах Осло постепенно начал превращаться в современный город с обширной сетью дорог, системой общественного транспорта и новыми офисными зданиями.

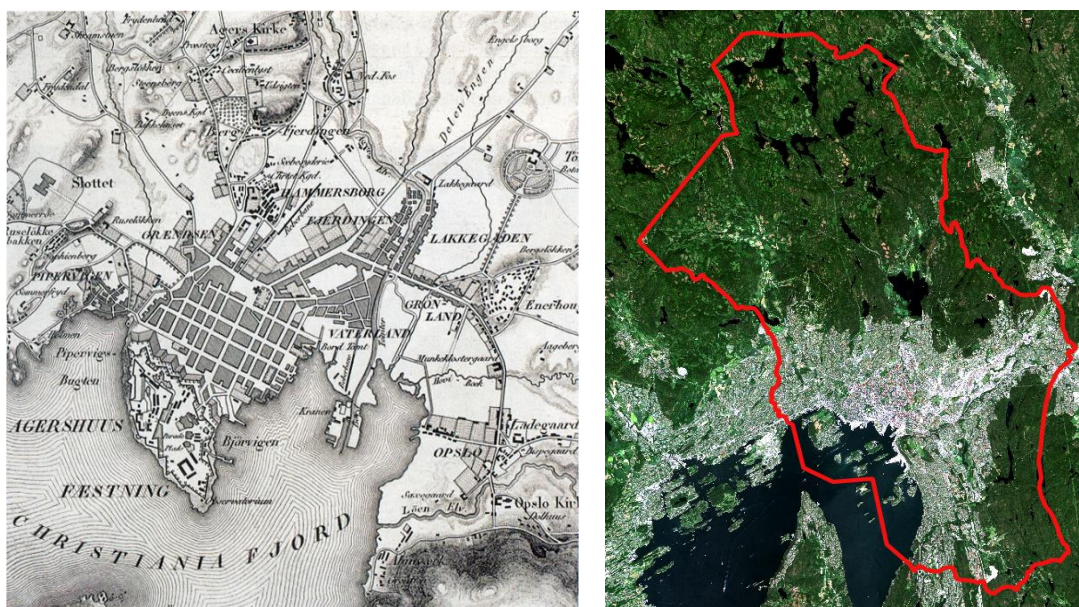


Рисунок 11. Слева план 1840 г. (Oslomap, 2023), справа космический снимок в естественных цветах города Осло 2020 г.

Площадь города 454 км<sup>2</sup>, из которых водные объекты 27 км<sup>2</sup>. В пределах города расположены 343 озера. Самая высокая точка столицы – гора Киркебергет (629 м). Природные объекты в Осло занимают примерно две трети. Они практически

расположены в Марка, площадь которого 301 км<sup>2</sup>. Данная территория называется, как лесистая и холмистая местность и на ней введены запреты по строительству. Зеленые территории в Норвегии часто обозначаются Маркой и управляются городской администрацией или соседними районами.

Город располагается во фьорде Осло на юге страны. Климат в Осло умеренно морской, с прохладным летом и теплой зимой. Воздушные массы с запада приносят осадки и прохладную погоду. Самый теплый месяц июль со среднемесячными температурами воздуха +17 – +19°C, а самый холодный – январь со среднемесячными температурами от -2 - -4 °С. Годовая сумма осадков составляет 700 – 800 мм. Северные районы города покрыты лесами, преимущественно хвойными.

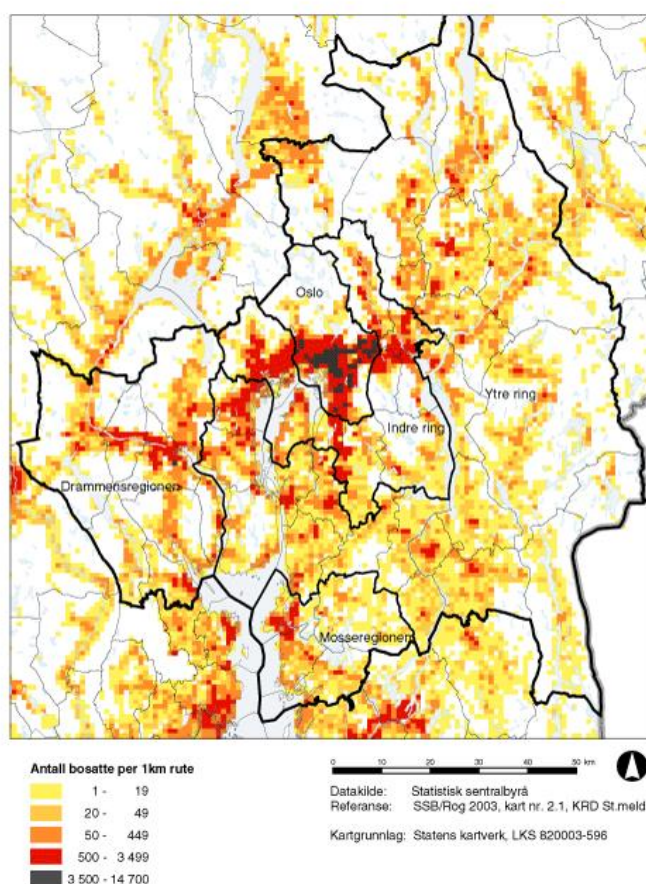


Рисунок 12. Плотность населения в агломерации Осло в 2003 г.

(Агломерация Осло, 2023)

Вокруг города Осло сформировалась крупнейшая агломерация Норвегии Большой Осло. От центра города расходится урбанизированная территория по трем отдельным «коридорам» — вглубь страны на северо-восток и на юг по обеим сторонам фьорда, что придает агломерации форму, напоминающую перевернутая буква «Y». Агломерация вокруг Осло разделена на шесть субрегионов. Они состоят из внутреннего и внешнего кольца, которые далее делятся на три сектора – на юг, на запад и на север:



- Внутренний юг: Энебакк, Несодден, Нордре Фолло.
- Внутренний Запад: Берум.
- Внутренний север: Лиллестрём, Лёренског, Ниттедадь, Релинген.
- Внешний юг: Фрогн, Индре Эстфолд, Маркер, Скиптвет, Вестбю, Ос.
- Внешний Запад: Аскер.
- Внешний север: Аурског-Хёланд, Эйдсволл, Гердрум, Хурдал, Луннер, Наннестада, Нес, Улленсакер.

Регионы Драммен (Драммен, Лиер, Эвре Эйкер) и Мосс (Мосс, Роде, Валер) входят также в состав Большого Осло (рис.12). Все муниципалитеты входят в состав губернии (фюльке) Викиен.

Большой Осло промышленный, экономический и политический центр страны. В пределах территории сосредоточены крупнейшие транспортные узлы: порты (Осло, Мосс), аэропорт (Аэропорт Осло, Гардермуэн) и вокзал (Центральный городской вокзал Осло). В агломерации проживает примерно 30% населения Норвегии (рис.13).

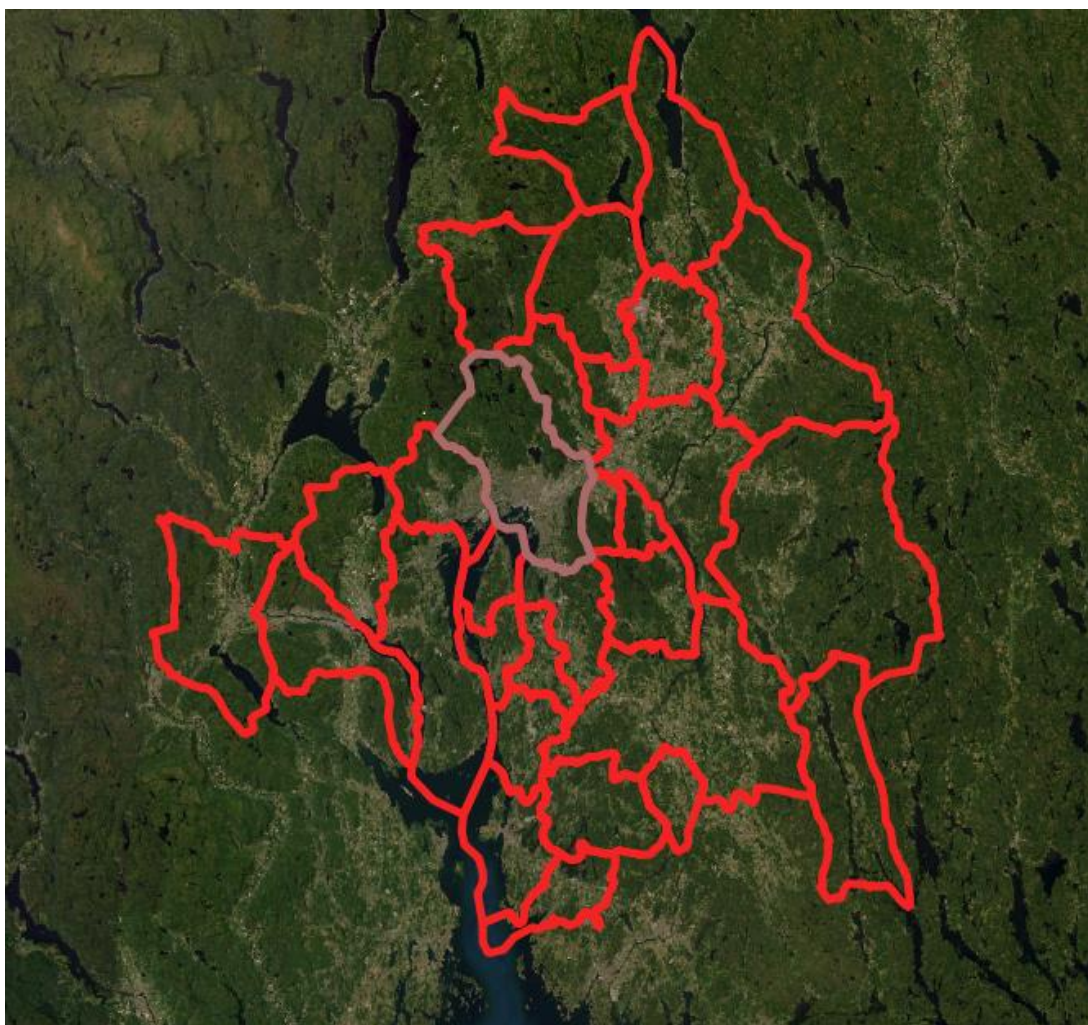


Рисунок 13. Космический снимок в естественных цветах агломерации Большой Осло

### 2.2.2. Санкт-Петербург

**Санкт-Петербург** - город федерального значения в Российской Федерации (рис.14). Город основан в 1703 году первым российским императором Петром I. С 1712—1918 года столицей Российской империи был Петербург, кроме пару лет с 1727 года, когда правил юный Петр II. По замыслу Петра I, город должен был стать не только политическим центром государства, но и культурной столицей. В Петровский период появляются Синод и Сенат, первый музей Кунсткамера, Академия наук. В город приглашались известные иностранные архитекторы, которые проектировали и застраивали его. К 1725 году численность Петербурга была более 40 тыс. чел. При Екатерине город преобразуется: открывается Публичная библиотека, Эрмитаж, появляются гранитные набережные. К концу века численность населения уже свыше 200 тыс. чел. В 1824 году город пережил самое разрушительное наводнение за все время. В середине 19 в. в Петербурге начинается новая культурная волна: открытие театров, музеев, создание литературных произведений и т.д. В город приходят зарубежные инвесторы и открывают производства, увеличивая экономический рост города. В 1914 году город меняет свое немецкое название на Петроград в связи с Первой мировой войной. После прихода к власти большевиков город теряет столичное звание. Население сократилось до 500 тыс. чел. После смерти Ленина, город переименовывают в Ленинград в 1924 году. Тяжелый период для города пришелся в Великой отечественной войне, когда 872 дня длилась блокада немецкими захватчиками. Но Ленинград выстоял. После войны город становится культурным центром советского времени. В 1991 году с распадом СССР Санкт-Петербург возвращает историческое название.

Санкт-Петербург расположен в устье р. Невы на островах и на берегу Финского залива в Приневской низменности. В нынешних административных границах город протянулся с северо-запада на юго-восток на 90 км. Площадь Петербурга 1439 км<sup>2</sup>. В черте города растительность с водной поверхностью занимают 40% территории города (Шиманюк, 1967). Самым высоким местом в черте города являются Дудергофские высоты в районе Красного Села с максимальной высотой 176 метров над уровнем моря. С начала XVIII в., когда было начато строительство города, и до настоящего времени земная поверхность в пределах города искусственно повышалась.

Город располагается на стыке Балтийского щита и Русской равнины. Древние породы перекрыты осадочным чехлом четвертичного периода. Климат умеренно морской за счет переноса воздушных масс запада, которые приносят обильные осадки и прохладную погоду летом, а зимой умеренно-холодную. Самый теплый месяц июль со

среднемесячными температурами воздуха  $+18 - +20^{\circ}\text{C}$ , а самый холодный – январь со среднемесячными температурами от  $-4 - -6^{\circ}\text{C}$ . Годовая сумма осадков примерно составляет  $600 - 700$  мм. Естественно-растительный покров относится к зоне тайги, для которой характерно господство хвойных лесов – еловых и сосновых, которые по мере продвижения к югу постепенно переходят в смешанные леса с вкраплением широколиственных пород – дуба, липы, клена (Шиманюк, 1967).



Рисунок 14. Слева план города 1799 г. (История Санкт-Петербурга, 2023), справа космический снимок в естественных цветах города Санкт-Петербурга 2020 г.

Вокруг Санкт-Петербурга сформирована вторая по численности агломерация России после Москвы. Формирование началось в прошлом веке в связи с расширением границ города. На севере города до 1945 года были земли, принадлежавшие Финляндии. В связи с этим обстоятельством, агломерация развивалась в южных направлениях – Московском, Псковском, Таллинском. Соцэконом географы выделили агломерацию не в пределах границ муниципальных образований поселений. Мы считаем это неверно, так как для анализа территории необходимо использовать границы всего образования, а не только его части (Лосин, Кузнецов, 2022).

В агломерацию входят различные районы Ленинградской области частично или полностью (рис.15):

- Всеволожский район: Агалатовское сп, Бугровское сп, г. Всеволожск, Дубровское гп, Заневское сп, Колтушское сп, Кузьмолдовское гп, Куйвозовское сп, Лесколовское сп, Морозовское гп, Муринское сп, Новодевятинское сп, Рахьинское гп, Романовское сп, МО Сертолово, Свердловское гп, Токсовское гп, Щегловское сп, Южковское сп.
- Выборгский район: Первомайское сп, Полянское сп, Рошинское гп.



- Гатчинский район: Большеколпанское сп, Вереvское сп, Войковицкое сп, Вырицкое гп, Гатчинское гп, Дружногорское гп, Елизаветинское сп, Кобринское сп, Коммунарское гп, Новосветское сп, Пудомягское сп, Пудостьское сп, Рождественское сп, Сиверское гп, Сусанинское сп, Сяськелеvское сп, Таицкое гп.
- Кировский район: МО Кировск, Мгинское гп, Назиеvское гп, Отрадненское гп, Павловское гп, Приладожское гп, Путиловское сп, Синявинское гп, МО Шлиссельбург.
- Ломоносовский район: Аннинское гп, Большеижорское гп, Виллозское гп, Горбунковское сп, Гостилицкое сп, Кипенское сп, Лаголовское сп, Лебяженское сп, Низинское сп, Оржицкое сп, Пениковское сп, Ропшинское сп, Русско-Высоцкое сп.
- Сосновоборский ГО.
- Тосненский район: Красноборское гп, Лисинское сп, Любанское гп, Никольское гп, Нурминское сп, Рябовское гп, Тельмановское сп, Тосненское гп, Ульяновское гп, Федоровское гп, Форносовское гп, Шапкинское сп.



Рисунок 15. Космический снимок в естественных цветах агломерации Санкт-Петербурга

### 2.2.3. Стокгольм

**Стокгольм** – столица Королевства Швеция и крупнейший город страны (рис.17), но также, как и столица Скандинавии. Первые упоминания города относятся к 1252 году, когда вблизи Стокгольма начали добычу железной руды и ее последующую продажу через порт в городе. Старый город начал развиваться ближе к 14 в., когда у Стокгольма установились связи с ганзейскими городами Балтийского региона. К 1600 году с установлением королевской власти численность населения выросла до 10000 человек. В 17 в. Швеция становится европейской державой, в связи с этим население города увеличивается в 6 раз. В 1634 году Стокгольм становится столицей Швеции. Серьезный удар для страны пришелся после поражения в Северной войне. В этот период начался застой, но Стокгольм сумел сохранить политический центр страны и в дальнейшем продолжил развиваться культурно. К середине 19 в. экономическая роль города снова стала ведущей в Европе. Появились новые виды промышленности, увеличился торговый потенциал. Стокгольм стал воротами в Швецию. К началу 20 в. численность населения выросла за счет иммиграции, так как число уроженцев стало менее 40%. Стала появляться агломерация вокруг города. В дальнейшем сильный импульс начался после Второй мировой войны, так как страна сохранила нейтралитет и не получила разрушений. Пока большинство европейских стран восстанавливались, Швеция развивалась экономически, научно и культурно. Промышленность стала ориентироваться на высокотехнологические области. В это время пришелся серьезный рост строительства новых жилых кварталов по концепции ABC, где А - работа, В - жилье, С- центр. По рисунку 16 видно, что вокруг вокзала строятся многоквартирные дома, а дальше идут особняки и таунхаусы. Данная концепция придумана архитектором Свенном Маркелиусом в послевоенный период для сокращения расстояний между жильем, работой и инфраструктурой.

В Стокгольме людям гарантируется чистая питьевая вода и отдельный сбор мусора. В настоящее время в городе и его окрестностях реализуется более ста действующих и запланированных проектов устойчивого строительства. Постоянная выставка «Stockholmsrummet» показывает, как развивается город, с помощью 3D-модели под стеклянным полом. Модель масштаба 1:1000 с 5000 зданий.

Стокгольм расположен на востоке Швеции, на протоках озера Меларен, которое впадает в Балтийское море. Площадь города 188 км<sup>2</sup>, из которых 30% водная поверхность. Примерно 40% составляют парки и зеленые зоны. В границах города 15 озер. Самая высокая точка города гора Хегдальстоппен (102 м), которая создана

искусственно за счет выемки грунта для котлованов. Природной точкой считается гора Викингабергет (77 м).

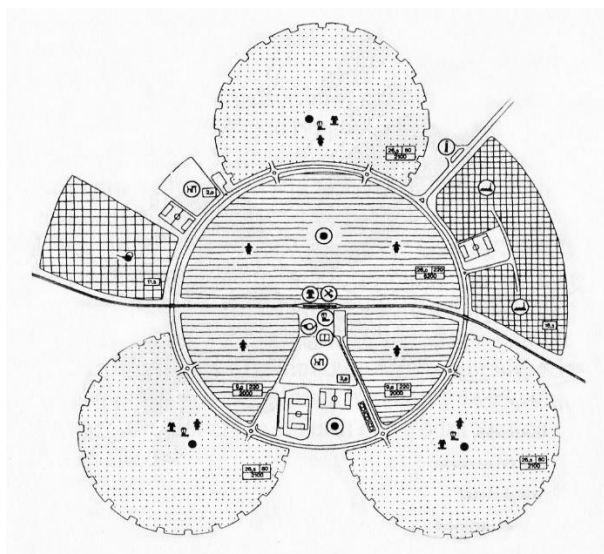


Рисунок 16. Концепция АВС (История развития Стокгольма и региона, 2023)

Город расположен на восточной оконечности Центрально-Шведской низменности. Климат в Стокгольме умеренно-морской, за счет расположения на протоках озера Меларен. Воздушные массы с запада приносят обильные осадки и прохладную погоду летом, а зимой теплую. Средняя годовая температура составляет 7,9 °С, а среднее количество осадков за год 531 мм. Город расположен в зоне лиственных лесов умеренного пояса.

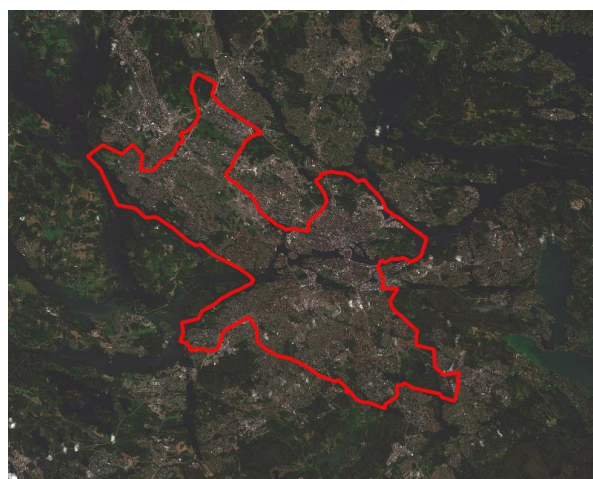
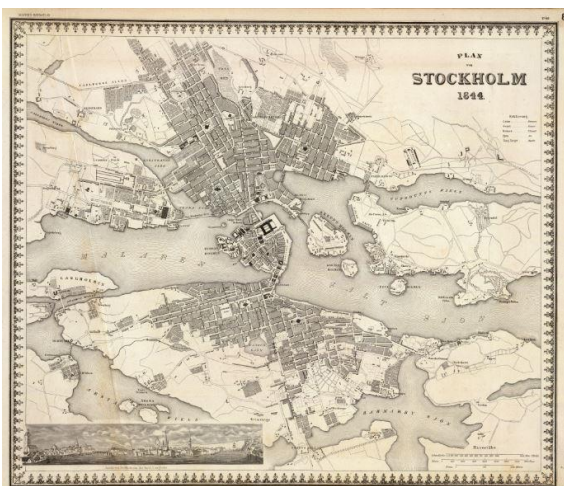


Рисунок 17. Слева карта конца 1844 г. (История развития Стокгольма и региона, 2023), справа космический снимок в естественных цветах Стокгольма 2020 г.

Вокруг Стокгольма образована крупнейшая агломерация Швеции – Большой Стокгольм. Стокгольм является муниципалитетом в лене Стокгольм. Лен – это субъект в Швеции. В него также входят 25 муниципалитетов, которые составляют агломерацию Стокгольма: Боткирка, Ваксхольм, Валлентуна, Вермдэ, Уппландс-Весбю, Дандерюд,

Лидингё, Нака, Норртелье, Ньюварн, Нюнесхамн, Салема, Сёдертелье, Сигтуна, Соллентуна, Сольна, Сундбюберг, Тиресо, Тэби, Уппландс-Бро, Ханинг, Худдинге, Экерё, Эстерокер, Ярфелла (рис.18). Плотность агломерации составляет примерно 320 чел/км<sup>2</sup>. В лене Стокгольм проживает более 20% всего населения страны и производится около 30% ВВП Швеции.

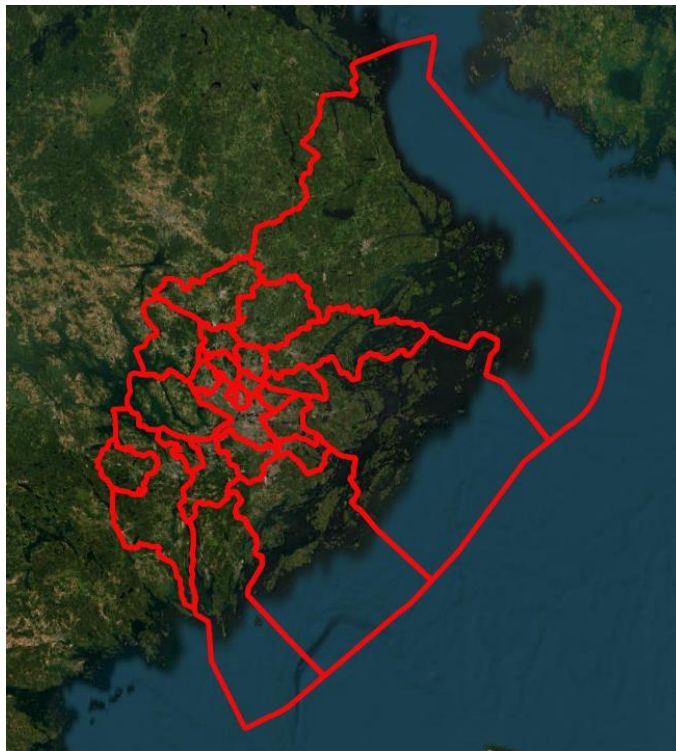


Рисунок 18. Космический снимок в естественных цветах агломерации Большой Стокгольм

#### 2.2.4. Хельсинки

**Хельсинки** – столица Финляндской Республики и административный центр региона Уусимаа. Указом шведского короля Густава Васы основали поселение в устье реки Вантаа, сегодня это городской район Арабия, 12 июня 1550 года. В дальнейшем выяснили, что место выбрано было не удачно из-за мелководной гавани, в которую не могли заходить суда. В середине 17 в. поселение перенесли в район нынешнего центра города. Импульс развития небольшое поселение получили лишь в 1812 году, когда после присоединения Финляндии к России Александр 1 объявил провинциальный Хельсинки столицей Великого княжества Финляндского (рис.20). В 1917 году после обретения независимости Финляндией Хельсинки стал крупнейшим городом страны. В 1946 году к Хельсинки были присоединены крупные территории, на которых в дальнейшем началось строительство (рис.19). Известность Хельсинки получил после проведения летних олимпийских игр в 1952 году. В 21 веке Хельсинки стал ярким, быстрорастущим и модным городом, который привлекает как студентов, людей трудоспособного



возраста, так и семей с детьми. Морская, мультикультурная и новаторская столица заслуженно была культурной столицей Европы (2000 г.) и столицей дизайна мира (2012 г.).

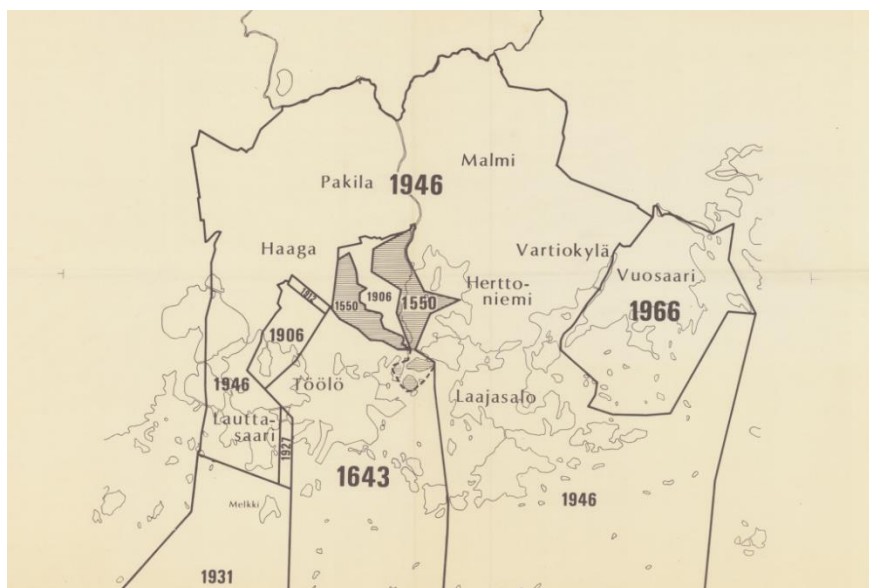


Рисунок 19. Рост города Хельсинки с 1550 – 1966 года (История города Хельсинки, 2023)

Столица располагается на северном побережье Финского залива. Площадь Хельсинки на 1 января 2020 года составляет 715,48 км<sup>2</sup>, из которых 214,25 км<sup>2</sup> суша, 0,91 км<sup>2</sup> внутренние водоемы, а остальное 500,32 км<sup>2</sup> воды Финского залива. Из общей площади земли - 37,2 км<sup>2</sup> леса, 9,9 км<sup>2</sup> парки и около 8 км<sup>2</sup> ландшафтные поля или луга (Tilastotietoja Helsingistä 2020, 2020). На территории Хельсинки есть 42 природных заповедника площадью около 7,7 км<sup>2</sup>. Самой высокой точкой города является холм Малминкартано (90 м) на северо-западе столицы, который создали искусственным способом за счет земли из котлованов в 1976–1996 годах. Самый высокий природный холм Хельсинки находится в северной части парка Kivikko, и составляет 62 м над уровнем моря. В Хельсинки насчитывается 317 островов (Tilastotietoja Helsingistä 2020, 2020).

Город полностью располагается на Балтийском щите с выходом коренных пород. Климат умеренно морской за счет расположения на заливе. Воздушные массы с запада приносят обильные осадки и прохладную погоду летом, а теплую зимой. Самый теплый месяц июль со среднемесячными температурами воздуха +17 – +19°C, а самый холодный – февраль со среднемесячными температурами от -2 - -4°C. Годовая сумма осадков составляет 600 – 700 мм. Город располагается в зоне тайги, для которой характерно преобладание хвойных лесов с распространением местами широколиственных пород деревьев.





Рисунок 20. Слева карта конца 1876 г. (История города Хельсинки, 2023), справа космический снимок в естественных цветах города Хельсинки 2020 г.

Вокруг Хельсинки сформирована крупнейшая урбанизированная территория Финляндии, которая называется Большой Хельсинки (рис.21). В нем располагаются 14 муниципалитетов: Хельсинки, Эспоо, Вантаа, Кауниайнен, Вихти, Киркконумми, Туусула, Нурмиярви, Сипоо, Керава, Хювинкяя, Мянтсяля, Ярвенпяя, Порнайнен (рис.21). Данная территория является важнейшей для страны с точки зрения экономики, науки, культуры и политики. В регионе производится одна треть всего ВВП Финляндии. Заселенность территории в среднем редкое по скандинавским меркам, но достаточно густое по финских. В Большом Хельсинки проживает около 30% всего населения страны (Susiluoto, 2016).

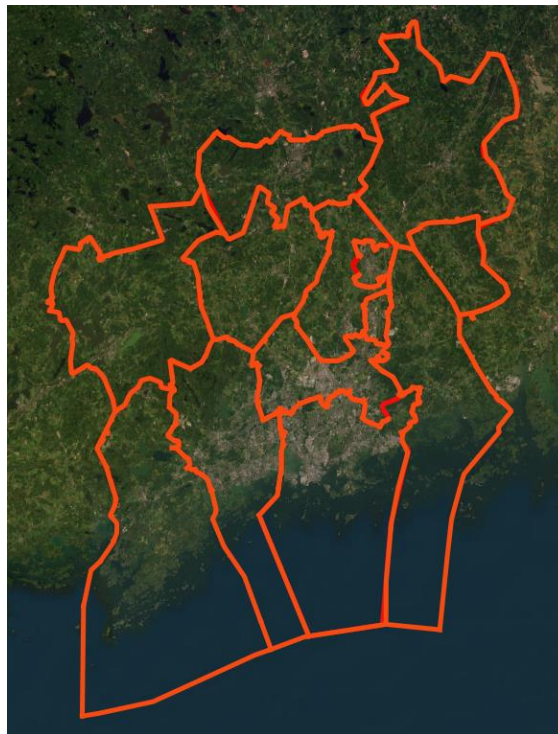
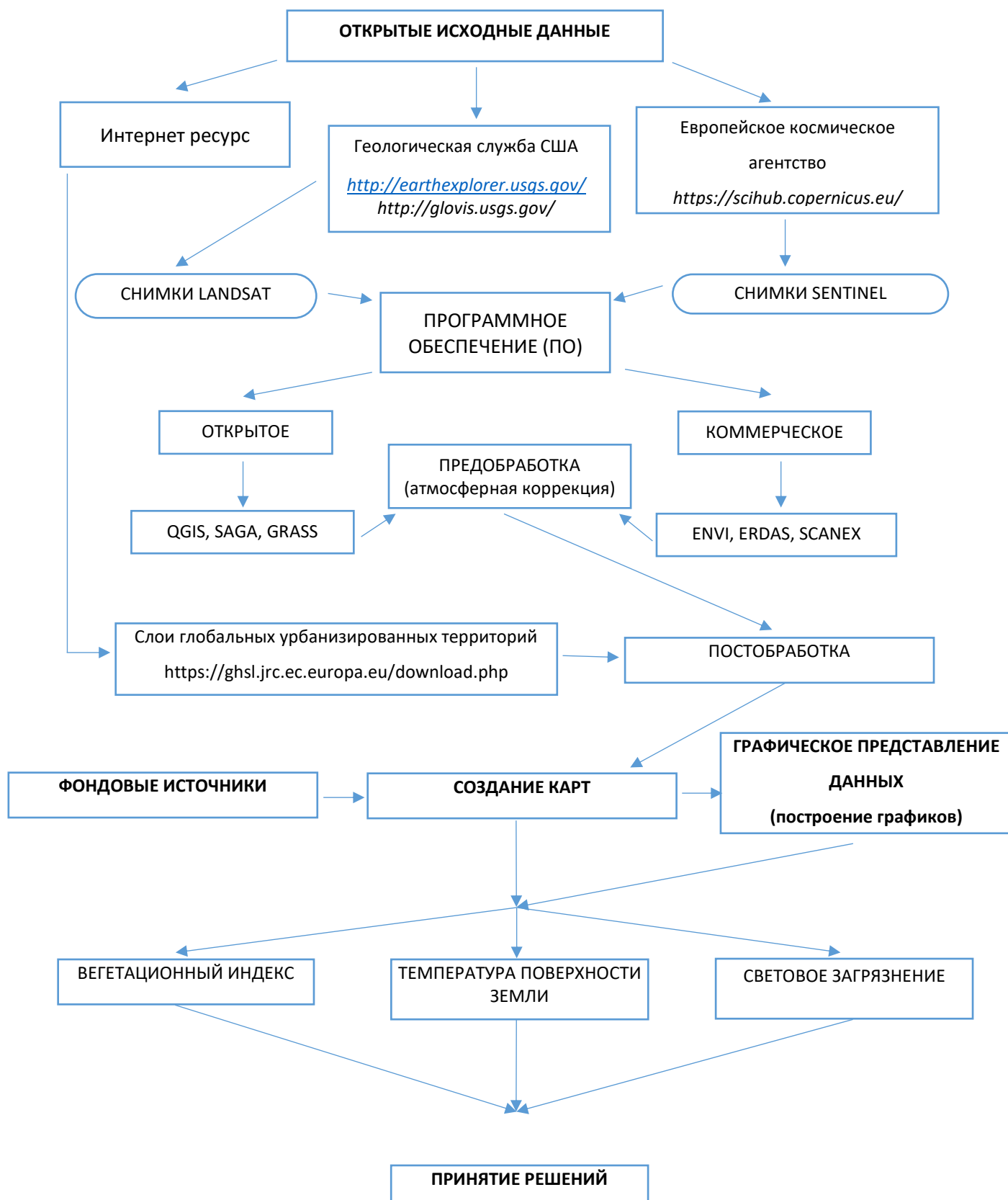


Рисунок 21. Космический снимок в естественных цветах агломерации Большой Хельсинки

### 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

#### 3.1. Методика исследования



### 3.2. Материалы, использованные в исследовании

Космические данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) становятся одним из важнейших инструментов при решении множества задач. Постоянная съемка местности позволяет проводить мониторинг природных явлений, предупреждения чрезвычайных ситуаций, развития городов, водных объектов и др. С помощью космических снимков ученые минимизируют затраты, ускоряя процесс открывания новых горизонтов. (Чандра, Гош, 2008).

Для выполнения поставленных задач были взяты снимки спутников американского Landsat 5 и Европейского космического агентства Sentinel-2A, которые находятся в открытом доступе. Для работы со световым загрязнением использованы спутники DMSP и Suomi NPP Национального управления океанических и атмосферных исследований.

Для сравнения длин волн и каналов использован график (рис.22). Landsat 5 и 7 схожи по количеству каналов и длине волн. Данный график помогает в работе с разными спутниками, когда наполнение каждого из них отличается.

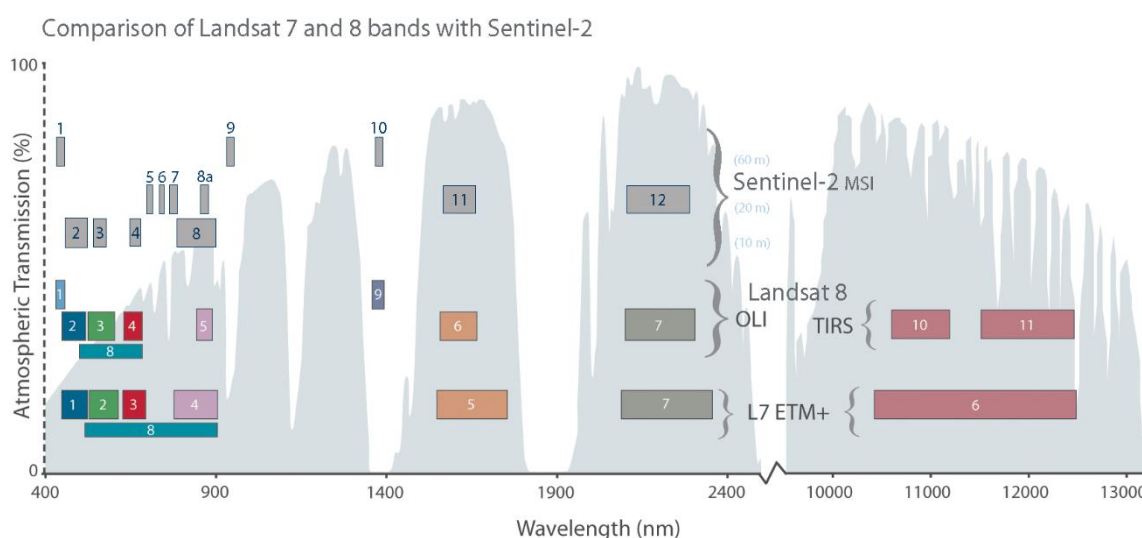


Рисунок 22. Сравнение каналов спутников Sentinel – 2, Landsat 8 и Landsat 7  
(Геологическая служба США, 2023)

Landsat один из первых и самый продолжительный проект съемки Земли из космоса. Первый из спутников в рамках программы был запущен 23 июля 1972 г. Период получения данных на данную территорию составляет 16 суток. Ежедневно спутник снимает порядка 400 сцен, которые после обработки в соответствии с текущим стандартом продуктов Landsat хранятся в Центре хранения данных Геологической службы США (USGS), и затем снимки доступны пользователям.

Спутник Landsat-5 проработал 29 лет от момента запуска в 1984 г. При этом, разработчики планировали срок службы в три года. На нем происходили поломки, которые поддавались удаленному ремонту. Решение об остановке связано с выходом гироскопов. Для работы необходимо 2 функционирующих устройства. На спутнике установили 3, но со временем остался только один рабочий. Landsat 5 включает два съемочных комплекса: мультиспектральный сканер (Multispectral Scanner (MSS)) и съёмочный (the Thematic Mapper (TM)). Данные MSS доступны с 1972 года с пространственным разрешением 80 м., TM с 1982 года и имеют пространственное разрешение значительно лучше – 30 м., только в тепловом диапазоне 120 м. (табл.2).

Таблица 2. Спектральные каналы спутника Landsat-5 (Геологическая служба США, 2023)

Спектральный канал	Спектральные диапазоны (мкм)	Разрешение (м)
Диапазоны TM		
1 (синий)	0,45 - 0,52	30
2 (зеленый)	0,52 - 0,60	30
3 (красный)	0,63 - 0,69	30
4 (ближний инфракрасный)	0,76 – 0,90	30
5 (ближний инфракрасный)	1,55 – 1,75	30
6 (тепловой)	10,40 - 12,50	120
7 (средний инфракрасный)	2,08 - 2,35	30

Для построения карт температуры поверхности Земли на 2015 год и 2020 год использовался спутник Landsat-8. Landsat-8 заменил в 2013 году Landsat-5, который проводил съемку до тех пор, пока не появится замена. До выведения на орбиту Landsat 9, Landsat 8 оставался единственным спутником миссии. Спутник включает два съемочных комплекса: аппарат оперативной телевизионной съемки Земли (Operational Land Imager (OLI)) и тепловой инфракрасный датчик или тепловой инфракрасный сенсор (Thermal InfraRed Sensor (TIRS)) (табл.3). Временной период такой же, как и у других спутников миссии – 16 дней. Спутник по сравнению с Landsat 5 имеет больше каналов, а также тепловой канал получил улучшенное пространственное разрешение – 100 м. Landsat-8 имеет два тепловых канала: 10 и 11. Съёмочные комплексы в Landsat-8 представляют прорыв в технологиях. OLI улучшает предыдущие датчики Landsat. Он собирает данные для видимого, ближнего инфракрасного и коротковолнового инфракрасных спектральных диапазонов, а также для панхроматического диапазона (Ihlen, 2019).

Таблица 3. Спектральные каналы спутника Landsat-5 (Геологическая служба США, 2023)

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

Спутник Sentinel-2A в рамках миссии Copernicus был запущен 23-июня 2015 г. Другой спутник Sentinel-2B введен в строй 7 марта 2017 г. Период получения свежих данных на территорию со спутников миссии Sentinel-2 составляет 5 дней за счет двух разных спутников. Все это способствует более частому получению данных для проведения мониторинга изменений поверхности Земли. На спутниках установлен датчик мультиспектрального сканера (MSI). Период работы спутников рассчитан на чуть больше 7 лет.

Снимки доступны пользователю на платформе Copernicus. Для пользователей из России есть ограничения, но их можно преодолеть. Преимущество снимков Sentinel в том, что они обеспечивают оптическое изображение высокого пространственного разрешения 10 м. для видимого спектра и ближнего инфракрасного излучения, а также 20 м. и 60 м. для всех остальных каналов спутников Sentinel (табл.4). Использование тепловых каналов спутника Sentinel-3 уступает Landsat из-за пространственного разрешения в 1000 м.

Таблица 4. Характеристики данных со спутника Sentinel-2 (Copernicus, 2023)

Спектральный канал	Спектральные диапазоны (мкм)	Разрешение (м)
Диапазоны OLI		
1 (побережья и аэрозоли)	0,421 - 0,457	60
2 (синий)	0,439 - 0,535	10
3 (зеленый)	0,537 - 0,582	10
4 (красный)	0,646 - 0,685	10
5 (вегетационный красный)	0,694 - 0,714	20
6 (вегетационный красный)	0,733 - 0,748	20
7 (вегетационный красный)	0,773 - 0,793	20
8 (ближний инфракрасный)	0,785 - 0,900	10
8А (короткий ближний инфракрасный)	0,855 - 0,875	20
9 (водяной пар)	0,935 - 0,955	60
10 (коротковолновый инфракрасный - облака)	1,365 - 1,385	60
11 (коротковолновый инфракрасный)	1,565 - 1,655	20
12 (коротковолновый инфракрасный)	2,100 - 2,280	20

Для изучения светового загрязнения городов были использованы данные Национального управления океанических и атмосферных исследований. До 2012 года применялся спутник DMSP, потом начали применение нового спутника Suomi NPP.

Прибор Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) на спутниках собирает видимые и инфракрасные изображения и глобальные наблюдения за землей, атмосферой, криосферой и океанами. В настоящее время, выполняя миссии спутника Suomi NPP, прибор VIIRS генерируют множество важных экологических продуктов, относящихся к снежному и ледяному покрову, облакам, туману, аэрозолям, огню, дымовым шлейфам, пыли, здоровью растительности, изобилию фитопланктона и хлорофиллу. VIIRS также будет запущен на спутниках JPSS-2, JPSS-3 и JPSS-4.

VIIRS обеспечивает ежедневные возможности визуализации в нескольких диапазонах электромагнитного спектра для сбора изображений атмосферы с высоким

разрешением и других инструментов, включая видимые и инфракрасные изображения ураганов и обнаружение пожаров, дыма и частиц в атмосфере, таких как пыль.

Для анализа динамики агломераций использовался проект Global Human Settlement Layer (GHSL) от миссии Copernicus. Данная платформа создает глобальную пространственную информацию о влиянии человека на Земле с течением времени. Информация предоставляется в виде карт застройки, высоты домов, населенных пунктов и так далее с различными промежутками времени и разным пространственным разрешением. Данные создаются с использованием новых технологий интеллектуального анализа пространственных данных.

Платформа обработки GHSL использует разнородные данные, включая глобальные архивы мелкомасштабных спутниковых изображений, данные переписи населения и предоставленную добровольно географическую информацию. Данные обрабатываются полностью автоматически и генерируют аналитику и знания, объективно и систематически сообщая о наличии населения и застроенной инфраструктуры.

Для создания аналитических карт и сопоставления данных с космических снимков применялись статистические источники информации. В них собирается важный материал для дальнейшей обработки данных и понимания изменений.

### *3.3. Исходные данные*

Период исследования выбран в 10 лет с 2010–2020 г. с промежуточным 2015 г. Снимки должны быть отобраны весеннего-летнего периода, так как при расчете NDVI лучше всего выбирать данное время года из-за того, что период цветения древесных пород дает наибольшие показания индекса (Шиманюк, 1968). В результате были выбраны 12 наборов снимков для 4 городов.

В связи с запуском Sentinel-2A в конце июня 2015 г., снимки были взяты в конце июля – начале августа. В 2010 г. в Санкт-Петербурге не наблюдалось благоприятных дней в период съемки, поэтому пришлось увеличить временной охват до середины августа. Данный момент является серьезным препятствием для проведения мониторинга территорий в определенные моменты времени.

Для получения космических снимков необходимо сначала пройти регистрацию на портале USGS (Геологическая служба США), Copernicus (Европейское космическое агентство) и NOAA (Национальное агентство океанических и атмосферных исследований). После этого можно приступать к скачиванию данных через GloVis или



EarthExplorer от USGS, Copernicus и NOAA. Без регистрации на данных порталах не удастся получить необходимые космические снимки.

Для скачивания Landsat имеется два вида интерфейсов, через которые можно получить космоснимки. По нашему мнению, удобнее использовать GloVis, чем EarthExplorer для скачивания данных. GloVis имеет более дружелюбный и понятный интерфейс для нового пользователя (рис.23). После авторизации появляется окно просмотра снимков по умолчанию на территорию США. Затем переходим на нужную территорию, выбираем временной период, процент облаков и производим скачивание. Внизу есть шкала, которая показывает с какого момента спутник запущен и до какого времени он будет получать или получал данные.

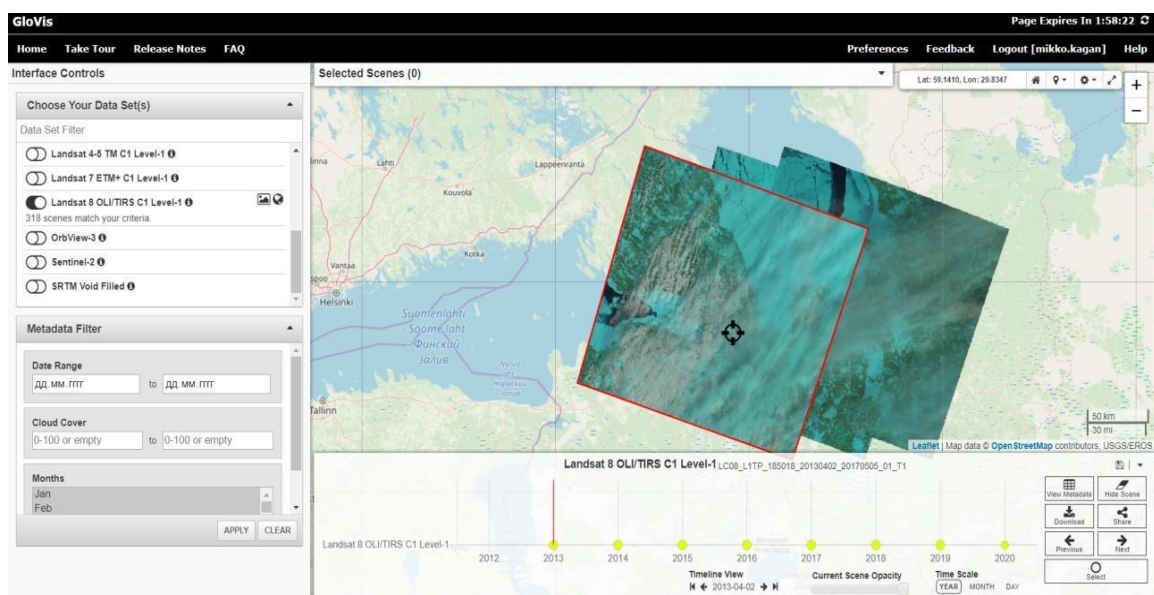


Рисунок 23. Интерфейс GloVis (Glovis, 2023)

Снимки Sentinel-2 можно получить с портала Copernicus (рис.24). На данном портале представлены спутники Sentinel-1, Sentinel-2 и Sentinel-3. Интернет страница достаточно удобная, выбираешь территорию охвата, период времени, спутник, процентов облаков и некоторые другие параметры для миссий Sentinel. Данные предоставляются на безвозмездной основе.

Минус данного источника заключается в процессе скачивания снимка. При выборе оптимального снимка он попадает в корзину, где надо будет дождаться какое-то время, когда он станет доступен для скачивания. Свежие космические снимки находятся в онлайн несколько месяцев, что позволяет их скачивать сразу. Но из-за улучшенного пространственного разрешения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, чем у Landsat, данные с Sentinel перекрывают этот недостаток.



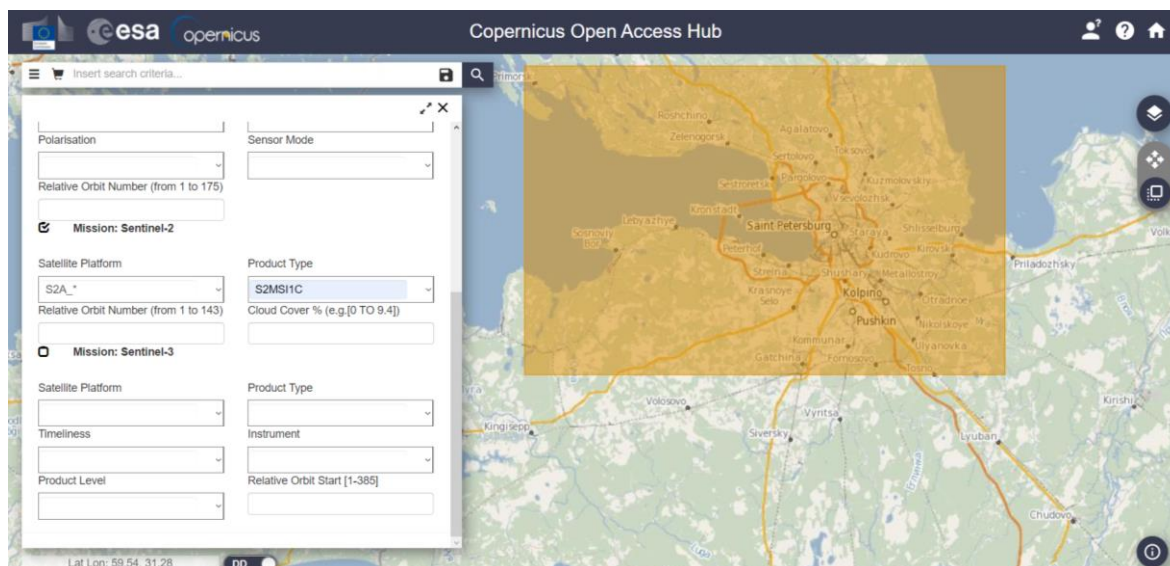


Рисунок 24. Интерфейс Copernicus (Copernicus, 2023)

В качестве исходных данных для проведения светового загрязнения были взяты снимки с метеорологических спутников DMSP и Suomi NPP. Спутники совершают 14 витков вокруг планеты за сутки. Информация доступна по месяцам и годам. Данных на определенный день нет. Все они усреднены за определенный период на весь мир и поэтому эти данные отличаются от привычных нам космических снимков. Еще проблема заключается в том, что данные на весь мир имеют большой размер, примерно 8-10 Гб. Пространственное разрешение у спутника DMSP 30 угловых секунд или примерно 1000 м в районе Экватора. У спутника Suomi NPP разрешение в два раза лучше – 15 угловых секунд или примерно 500 м на Экваторе.

Для скачивания с платформы GHSL не надо регистрироваться. Данные находятся в открытом доступе, являются предобработанными и готовы к использованию. Большой плюс заключается в том, что снимки имеют небольшой размер, примерно до 100 Мб. Из минусов можно отметить, что данные представлены на определенные периоды времени и с определенным пространственным разрешением.

Для выполнения поставленных задач необходимо было найти правильные административные границы городов, муниципальных образований и агломераций. На официальных интернет ресурсах для 4 городов были скачаны необходимые слои для исследования.

### 3.4. Предобработка снимков

Первый этап обработки спутниковых снимков заключается в радиометрической коррекции, с помощью которой космоснимки избавляют от искажений. Радиометрическая коррекция устраняет ошибки за геометрию съемки, освещенность

снимка, чувствительность датчика спутника. Это все параметры, которые могут изменяться в зависимости от спутника и системы (Чандра, Гош, 2008). Данные Sentinel-2 с пометкой L1C и Landsat-5, 8 L1TP в названии включают в себя предобработанные снимки с радиометрической коррекцией.

Следующим важным шагом является проведение атмосферной коррекции. Данные, поступающие на спутник о подстилающей поверхности, являются искаженными из-за многих факторов, главная из которых атмосфера. Это достаточно непростая среда, которая проявляется ввиду дымки, прозрачности атмосферы, отражение солнечных лучей и другое (Шовенгердт, 2010). В большинстве случаев данные предоставляются атмосферно скорректированными. Данный процесс автоматизирован, и алгоритмы рассчитываются исходя из усредненных показателей.

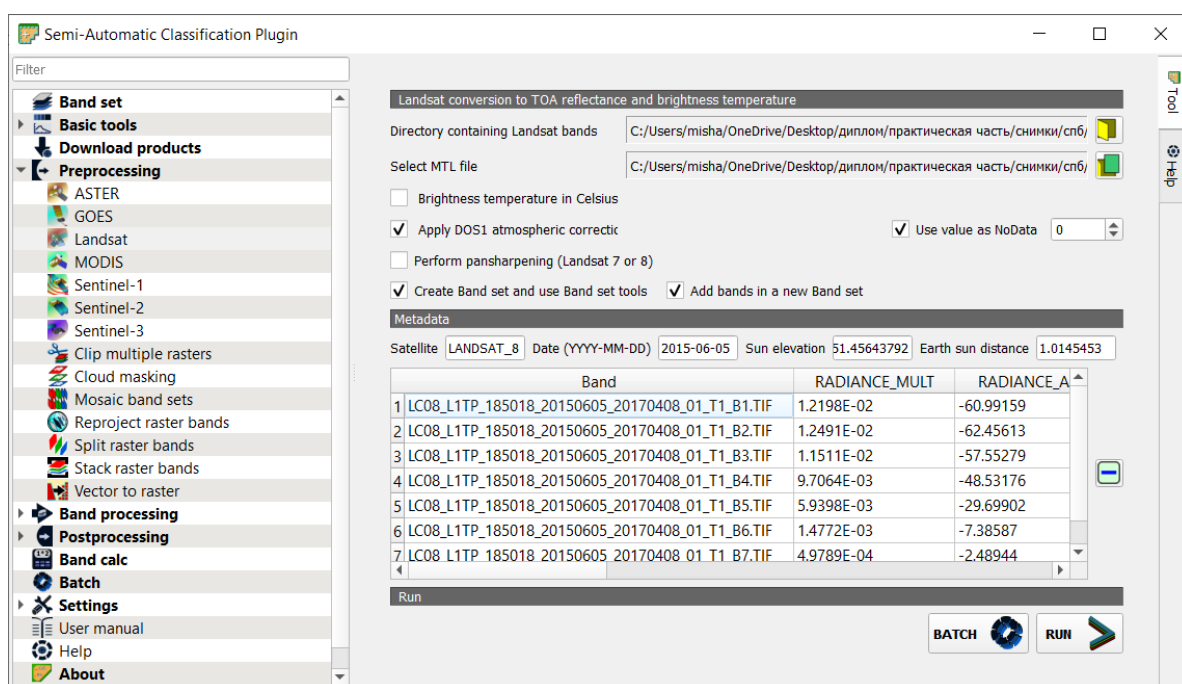


Рисунок 25. Окно модуля Semi-Automatic Classification Plugin

Предобработка выполнялась в программном продукте QGIS с помощью модуля Semi-Automatic Classification Plugin (рис.25). Плагин позволяет осуществлять контролируемую классификацию изображений дистанционного зондирования, предобработку и постобработку, поиск и скачивание снимков и многое другое. Атмосферная коррекция выполняется стандартным методом DOS1, или калибровка по темному объекту, предложенной Чавесом П.С. в конце 1980-х годов. На снимке ищется условный абсолютно темный объект, яркость которого принимается за ноль во всех каналах съемки, а остальные минимальные значения пикселей снимка корректируются относительно спектральной яркости объекта. За такой объект обычно принимаются глубокие водоемы (Шовенгердт,2010). В окне модуля выбираем предобработку

(Preprocessing), далее необходимо выбрать соответствующий спутник. Простота заключается в том, что обработка в автоматическом режиме. Требуется выбрать директорию с нашими снимками, метафайл и необходимые нам настройки. Обработка атмосферной коррекции была использована для каналов в видимом и инфракрасном диапазоне.

### 3.5. Постобработка снимков

Для расчета доли зеленых насаждений городов, температуры поверхности Земли необходимо произвести шаг с построением нормализованного относительного вегетационного индекса (NDVI) с применением растрового калькулятора в QGIS по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}, (1)$$

NIR - отражение в ближней инфракрасной области спектра;

RED - отражение в красной области спектра.

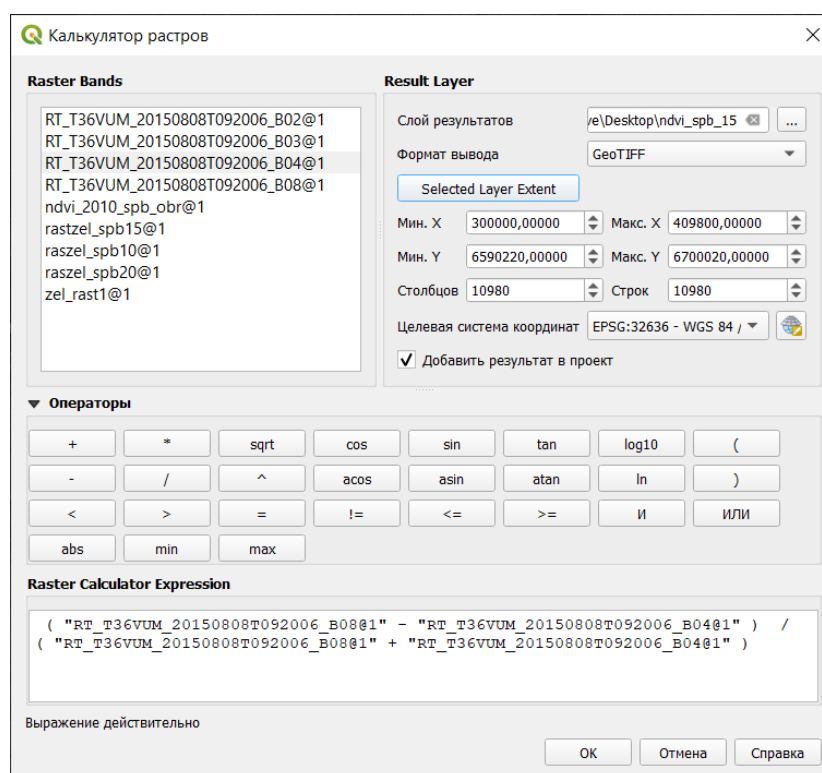


Рисунок 26. Окно растрового калькулятора

На панели инструментов выбираем «Растр – Калькулятор растров». В окне Raster Bands отображены растровые слои проекта (рис.26). В Result Layer параметры выходных данных. В разделе «Операторы» даны математические знаки и функции для работы с растровыми слоями. В окне Raster Calculator Expression записывается выражение для расчета значений.

Полученный результат по NDVI имеет значения от [-1; +1]. Для уменьшения количества обработки данных, снимок обрезали в границах города. Для этого необходимо было подгрузить векторный слой с административными границами города в QGIS. Затем выбрать «Растр» – «Извлечение» – «Обрезать растр по маске».

Для расчета доли зеленых насаждений перешли в ArcGIS для дальнейшей обработки данных. Следующий шаг предполагает произвести переклассификацию изображения на два значения: все кроме растительности и разреженная растительность с показателем от 0.3 до максимального значения вегетации. Значение от 0,3 взяли из-за того, что город оказывает влияние на зеленые зоны, которые в свою очередь подвергаются угнетению и снижению вегетации. Переклассификация растра позволяет нам объединить значения для дальнейшей работы. Для переклассификации выбираем Arc toolbox – 3D Analyst Tools – Raster Reclass – Reclassify. Удаляем лишние поля в таблице reclassification и делаем только два поля с показателями: [-1.0 – 0.3] и [0,3 – 1.0]. Необходимо нажать на Classify... Во всплывающем окне нажать на ОК. Потом сохраняем наш переклассифицированный растр (рис.27).

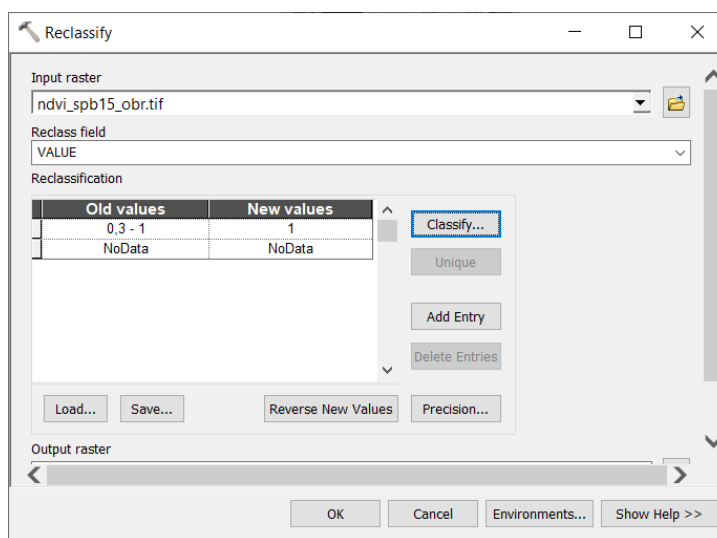


Рисунок 27. Окно переклассификации

Переводим растровое изображение в векторный формат с последующим удалением значений меньше 0.3. С помощью функции Conversion Tools – From Raster – Raster to Polygon сконвертируем растр в вектор.

После завершения операции растеризуем снова вектор в растр. При помощи функции Conversion Tools – To Raster – Polygon to Raster производится перевод. В открывшемся окне необходимо в полях Value field и Priority field выбрать критерий по полю Gridcode, так как по нему производили отбор полигонов. Также в поле Cellsize нужно указать правильное пространственное разрешение, которое, например, у Landsat 30 м., Sentinel 10 м. (рис.28).

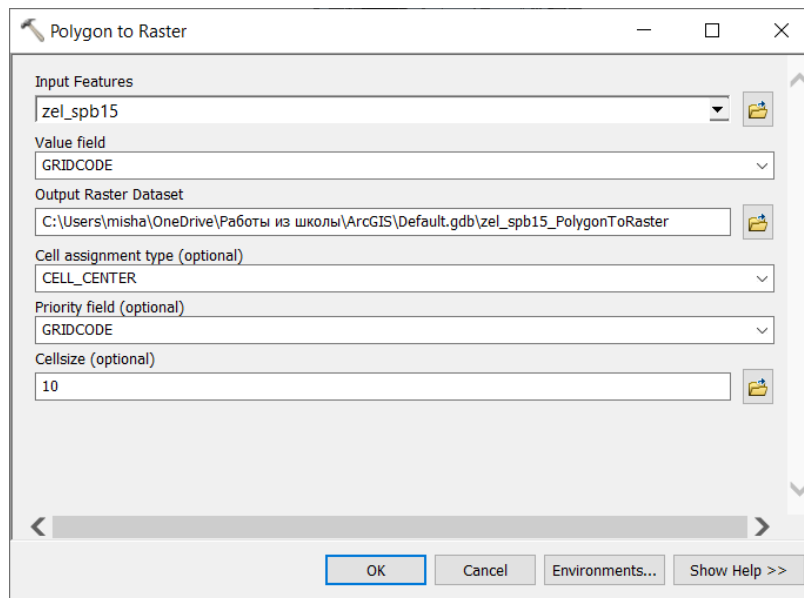


Рисунок 28. Окно перевода полигона в растр

После завершения операций в ArcGIS возобновляем работу в QGIS. В инструментах анализа необходима «Зональная статистика». С ее помощью считается количество пикселей растительности в каждом районе и городе. Данные об информации по зональной статистике заносятся в атрибутивную таблицу векторного слоя. Далее через калькулятор полей необходимо подсчитать площадь растительности в районе. Площадь рассчитывается как количество пикселей, умноженное на пространственное разрешение пиксела. После этого можно рассчитать удельный вес растительности района от площади района.

Для расчета значений по световому загрязнению применялся инструмент «Зональная статистика». В данном случае необходимы средние, минимальные и максимальные значения в городах. Предобработка снимков не требуется, они готовы к использованию.

При построении карт динамики застройки агломераций использовался также инструмент «Зональная статистика». Снимки полностью готовы к дальнейшей обработке. В этом случае производили подсчет пикселей. Затем рассчитали площадь урбанизированных земель как количество пикселей, умноженное на пространственное разрешение пиксела. Динамики производилась в промежутке 10 лет. Затем произвели вычитание одного года из другого.

Для создания карт динамики населения использовались сборники со статистическими данными.

В модуле QGIS Land Surface Temperature (рис.29) были построены карты температуры поверхности земли. Тепловым каналом у спутника Landsat-5 является 6 канал, у Landsat-8 -10 и 11 канал. 11 канал подвержен засветам, бликам и погрешностям.

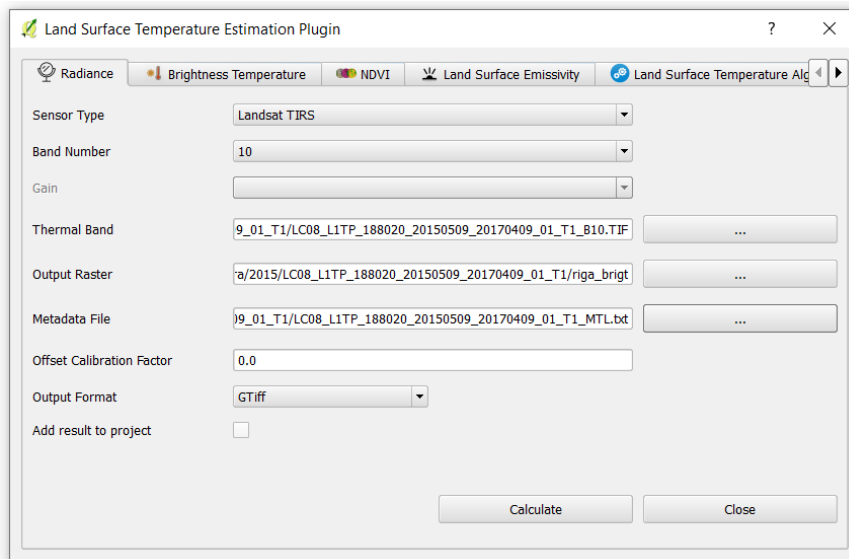


Рисунок 29. Модуль Land Surface Temperature

Сначала необходимо рассчитать спектральную яркость (radiance), которая рассчитывается по формуле:

$$L_{\Lambda} = M_L * BAND10 + A_L, (2)$$

Где  $L_{\Lambda}$ -спектральная яркость,  $M_L$ -мультипликативный масштабный коэффициент яркости для канала,  $A_L$ -коэффициент аддитивного масштабирования яркости для канала.

Подгружаем метафайл и соответствующий канал. Данные затем сохраняем на диск. Вторым шагом является вычисления яркостных температур поверхности (Brightness Temperature) используется следующее уравнение:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\Lambda}} + 1\right)}, (3)$$

Где  $L_{\Lambda}$ -спектральная яркость,  $K_1$  и  $K_2$ -тепловые константы из файла метаданных, а  $T$ -яркостная температура в °F.

Подгружаем растр с полученной спектральной яркостью и сохраняем результат на диск. Третьим этапом является расчет индекс NDVI. Для этого надо загрузить красный и ближнеинфракрасный канал.

На следующем этапе рассчитывается отражательная способность земной поверхности по формуле:

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

Подгружаем NDVI, сохраняем и рассчитываем значение.

На последнем этапе для вычисления температуры поверхности используется формула:

$$LST = \frac{T}{\left(1 + \left(\frac{\Lambda}{c^2}\right) * \ln(e)\right)} - 273,15, (5)$$

Где  $T$ -яркостная температура поверхности,  $\lambda$ -длина волны,  $e$ -отражательная способность земной поверхности.

$$C^2 = h * \frac{c}{s}, (6)$$

$h$ -постоянная Планка,  $c$ -постоянная Больцмана,  $s$ -скорость света.

Для подсчета температуры поверхности необходим калькулятор атмосферных параметров из Интернет-ресурса (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) (рис.30), так как в Landsat данные являются псевдозначениями. Заполняем поля в калькуляторе из метафайла о дате и времени, координатах локации, сезоне года, спутнике. После получения данных возобновляем работу в QGIS. Из отчета необходимо взять информацию о приходящей (Downwelling Radiance), отраженной радиации (Upwelling Radiance) и состоянии атмосферы (Atmospheric Transmission). После этого данные сохраняем на диск.

Enter the parameters for which you wish calculate atmospheric transmission and upwelling radiance:

Year:  Month:  Day:   
 GMT Hour:  Minute:

Latitude:  Longitude:   
+ is North, - is South + is East, - is West

Use atmospheric profile for closest integer lat/long [help](#)  
 Use interpolated atmospheric profile for given lat/long [help](#)

Use mid-latitude summer standard atmosphere for upper atmospheric profile [help](#)  
 Use mid-latitude winter standard atmosphere for upper atmospheric profile [help](#)

Use Landsat-8 TIRS Band 10 spectral response curve  
 Use Landsat-7 Band 6 spectral response curve  
 Use Landsat-5 Band 6 spectral response curve  
 Output only atmospheric profile, do not calculate effective radiances

**Optional: Surface Conditions**  
If you do not enter surface conditions, model predicted surface conditions will be used.  
 If you do enter surface conditions, all four conditions must be entered.

Altitude (km):  Pressure (mb):   
 Temperature (C):  Relative Humidity (%):

Results will be sent to the following address:  
 Email:

Рисунок 30. Калькулятор атмосферных параметров

Итогом становится получение температуры поверхности в градусах Цельсия.

Для более наглядного рассмотрения изменений вегетационного индекса, температуры поверхности Земли и светового загрязнения применим модуль Terrain profile в QGIS (рис.31). График строим по трем соответствующих периодам: 2010, 2015 и 2020 году.

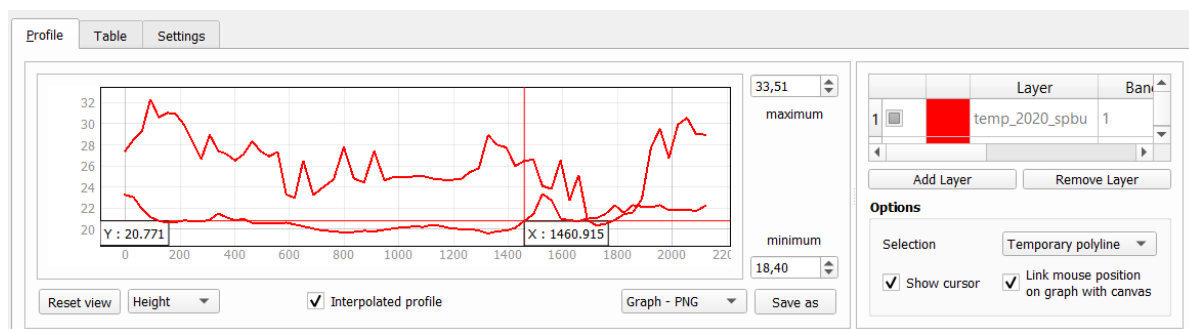


Рисунок 31. Модуль Terrain profile

На карте строится линия, по которой затем отображается график. Отображение данных возможно в табличном виде. Полученный график сохраняется в разных графических форматах: PNG, SVG и DXF.



## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 4.1. Санкт-Петербург

В ходе расчета зеленых насаждений в Санкт-Петербурге (прил.1) были получены данные о том, что высокий процент наблюдается в Петродворцовом (92%), Курортном (90%) и Пушкинском (89%) районах города. В них находятся большие площади городских лесов, музеев-заповедников, ООПТ и незначительное количество населенных пунктов. Наименьший процент имеют центральные районы города: Центральный (31%), Адмиралтейский (21%) и Василеостровский (21%). Это обосновывается плотной исторической застройкой и дворами-колодцами, которые зачастую лишены растительности.

Таблица 5. Доля зеленых насаждений в Санкт-Петербурге по районам

№	Район	Доля зеленых насаждений, %		
		2010 г.	2015 г.	2020 г.
1	Адмиралтейский	13,17	18,23	20,70
2	Василеостровский	22,59	26,96	30,59
3	Выборгский	<b>76,33</b>	<b>77,77</b>	<b>75,75</b>
4	Калининский	58,92	61,41	61,76
5	Кировский	32,80	40,17	42,75
6	Колпинский	79,87	81,98	80,12
7	Красногвардейский	61,44	<b>64,97</b>	<b>62,05</b>
8	Красносельский	<b>64,65</b>	<b>66,02</b>	<b>62,23</b>
9	Кронштадтский	53,74	58,82	65,46
10	Курортный	<b>93,59</b>	<b>91,56</b>	<b>90,18</b>
11	Московский	61,34	65,88	65,81
12	Невский	46,56	51,65	53,92
13	Петроградский	27,45	29,13	30,93
14	Петродворцовый	<b>92,39</b>	<b>93,8</b>	<b>91,35</b>
15	Приморский	<b>76,37</b>	<b>76,10</b>	<b>70,16</b>
16	Пушкинский	78,58	90,47	88,64
17	Фрунзенский	53,27	<b>58,04</b>	<b>59,89</b>
18	Центральный	15,91	19,23	21,47

По данным (табл.5) за 10-летний период можно выделить Приморский район города, где наблюдается сокращение зеленых насаждений. В первую очередь это связано

с новым строительством в районе, особенно в микрорайонах Каменка и Новоорловский. Не один год подряд район становился лидером или был в тройке первых по количеству введенного жилья в городе. Также наблюдается застройка в Красносельском районе, который практически постоянно фигурирует в тройке лидеров совместно с Выборгским районом.

В таблице 5 наблюдается динамика озелененности в районах с высоким показателем: Петродворцовый и Курортный. В данных локациях наблюдается частное и малоэтажное строительство, в основном премиум сегмента. Ресурс районов не исчерпан по свободной территории, которую можно застраивать. В перспективе наблюдается увеличение объемов строительства.

В положительной динамике отмечается увеличение зеленых зон во Фрунзенском районе. В данной локации многие «серые зоны» преобразовались за счет редевелопмента территории, произведено благоустройство района по различным адресам.

Анализируя данные (прил.2), видно, что высокие значения привязаны к центральным районам города: Адмиралтейский, Петроградский, Центральный. Минимальные значения приурочены к окраинным районам города: Петродворцовый, Курортный, Кронштадтский, Пушкинский и Колпинский.

По данным светового загрязнения произошло снижение яркостных данных (табл.6). Это связано с тем, что с 2011 года в Санкт-Петербурге проходит программа по замене ламп накаливания на энергосберегающие и светодиодные лампы. Первоначально переход на уличное светодиодное освещение начался в Кронштадтском районе в 2011 году. К 2013 году в городе было примерно 4-5% освещения светодиодными лампами. Количество затрат на электроэнергию снизилось на 20-25%.

По данным (табл.6) из расчетов Приморский район увеличил максимальные значения яркости. В данном районе на протяжении последних лет сохраняется лидерство по строительству, а новые требования планировки предполагают создания комфортной среды, которые связаны и с увеличением уличного освещения. Высокие значения наблюдаются и в Калининском районе, где в настоящее время идет застройка новых микрорайонов: Новая Охта и Ручьи. Помимо этого, в районе происходит редевелопмент территории на месте бывших заводов.

Петродворцовый район увеличил максимальные значения. Это связано в первую очередь со строительством нового порта «Бронка», первый этап которого был введен в эксплуатацию в 2015 г. Как итог, на данном участке сразу прибавилось количество освещенной территории. Например, в Петроградском районе увеличились минимальные значения. Связано это в первую очередь со строительством стадиона «Газпром арена».

Таблица 6. Значения яркости ( $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \times \text{с}}$ ) в Санкт-Петербурге по районам

№	Район	Среднее значение по годам			Минимум по годам			Максимум по годам		
		2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
1	Адмиралтейский	117	113	93	76	55	38	309	370	302
2	Василеостровский	84	71	59	14	11	7	250	265	198
3	Выборгский	43	29	23	3	3	2	152	156	160
4	Калининский	87	71	58	54	39	35	<b>130</b>	127	<b>242</b>
5	Кировский	104	73	50	34	24	16	239	175	109
6	Колпинский	26	17	15	3	2	2	121	101	70
7	Красногвардейский	65	57	47	10	6	10	228	240	131
8	Красносельский	39	28	21	4	4	3	241	149	81
9	Кронштадтский	21	17	10	1	1	1	61	60	47
10	Курортный	7	4	4	1	1	1	92	77	66
11	Московский	73	66	49	5	5	4	181	201	130
12	Невский	79	68	51	14	12	9	<b>135</b>	<b>170</b>	<b>242</b>
13	Петроградский	105	94	79	<b>34</b>	<b>32</b>	<b>38</b>	235	362	208
14	Петродворцовый	24	17	12	4	3	3	<b>131</b>	88	<b>151</b>
15	Приморский	49	32	24	3	3	2	<b>173</b>	228	<b>194</b>
16	Пушкинский	23	14	11	2	2	1	272	132	101
17	Фрунзенский	88	71	54	22	23	13	125	119	108
18	Центральный	145	136	111	75	74	58	314	331	291

Рассматривая динамику населения Санкт-Петербургской агломерации за 10-летний период (прил.3), отмечается многократное увеличение в 10 раз численности людей в Заневском городском поселении (ГП) и Муринском сельском поселении (СП). Данные поселения расположены вплотную к границе города Санкт-Петербурга. Например, в Мурино есть единственная станция метро «Девяткино» в Ленинградской области, а город Кудрово расположен примерно в двух километрах от станции метро «улица Дыбенко». Это вызывает рост численности населения и транспортной инфраструктуры в данных городах из-за близости к Санкт-Петербургу. Другим фактором выступает цена жилья в Мурино и Кудрово. Она ниже на 30–40%, чем в Санкт-Петербурге (рис.32).

На карте (прил.3) наблюдается увеличение населения вдоль транспортных артерий – на Всеволожск и Гатчину. Эти города являются административными центрами и находятся примерно в часе езды на электричке до вокзалов в Санкт-Петербурге. Со стороны Гатчины проходит федеральная автомобильная дорога. Это тоже позволяет быстро добраться в Санкт-Петербург. В городах, удалённых от центра агломерации, цена на жилье будет ниже, чем в Санкт-Петербурге.

Многие люди хотят жить в частных домах. Вокруг Всеволожска и Гатчины много сельских населенных пунктов с индивидуальной застройкой земли. Помимо этого, наблюдается положительная динамика вдоль границ Санкт-Петербурга. Возможно, многие люди не имеют шанса купить земельный участок в Санкт-Петербурге, поэтому выбирают места вблизи города и удобной транспортной инфраструктурой с небольшой ценой.



Рисунок 32. Средняя цена 1 м<sup>2</sup> в Санкт-Петербурге и агломерации (Restate, 2023)

Невысокие цены и небольшие колебания цены за 3 года в Сосновом Бору (рис.32) объясняются расположением вблизи «Ленинградская АЭС». В прошлом город был закрытым. Это на долгое время откладывает след в развитии территории. Помимо этого, город удален от центра Санкт-Петербурга (около 2 часов на электричке). Отток населения в Тосно вероятно связан с расположением дорог на Москву. Данное направление является очень загруженным как автомобильным, так и общественным транспортом. Увеличение числа населения в Кировске связано с транспортной доступностью автомобильным и общественным транспортом. В направлении на восток

расположено много СНТ (Садовое некоммерческое товарищество). Население переезжает из Санкт-Петербурга для проживания на постоянной основе.

Анализирую карту «Динамика застройки Санкт-Петербургской агломерации с 2010 по 2020 год» (прил.4), наблюдается увеличение застроенной территории в Ломоносовском районе. Локация имеет удобное расположение к КАД (Кольцевая автомобильная дорога), хорошую транспортную доступность, близость к Финскому заливу и царским дворцам и паркам. В южном направлении агломерации много сельскохозяйственных земель, которые переводят под малоэтажную или индивидуальную застройку. Основным двигателем локации является рекреационная загородная недвижимость комфорт и бизнес класса. В поселениях Гостилицы, Оржицы и Низино происходит освоение земель под недорогую дачную застройку. На севере агломерации в Выборгском районе Ленинградской области сформированы коттеджные поселки вдоль автомобильных дорог, например, федеральной трассы от Санкт-Петербурга в сторону Выборга. Другим коттеджным кластером выделяется Всеволожский район. Например, Токсовское ГП, Агалатовское СП, Юкковское СП и Рахьинское ГП расположены удобно к Санкт-Петербургу. До центра агломерации хорошо развито транспортное сообщение, как автомобильное, так и общественное.

На примере максимальных и минимальных значений построены графики температуры поверхности Земли, нормализованного вегетационного индекса и светового загрязнения. Каждый график имеет разные значения, несопоставимые между собой ( $^{\circ}\text{C}$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \times \text{ст}}$ , безразмерные величины). Поэтому было принято построить три разных графика, которые при сопоставлении могут указывать линии тренда.

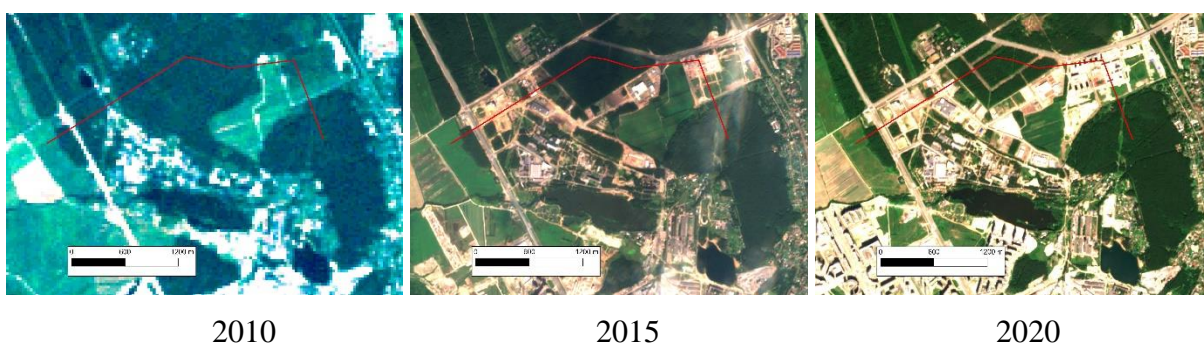


Рисунок 33. Разновременные снимки в микрорайоне Новоорловский

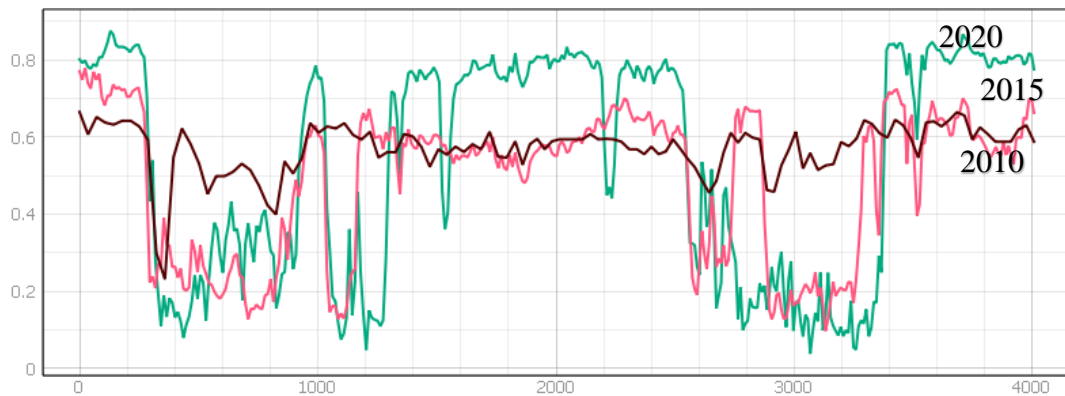


Рисунок 34. График NDVI в микрорайоне Новоорловский

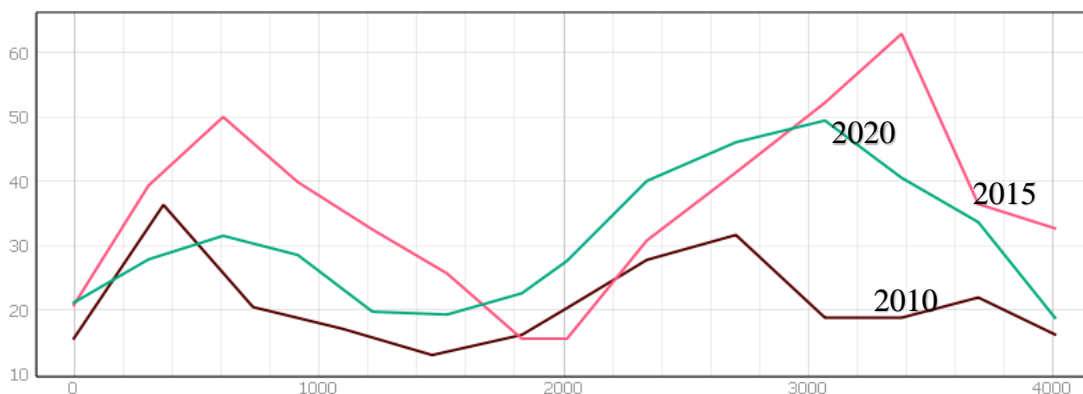


Рисунок 35. График светового загрязнения в микрорайоне Новоорловский

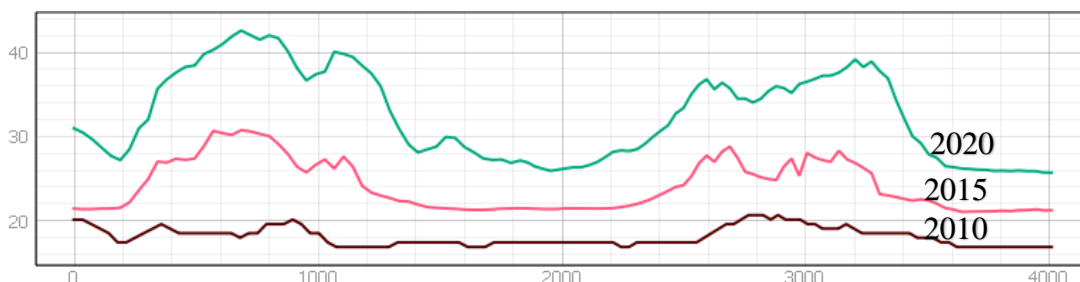


Рисунок 36. График температуры поверхности в микрорайоне Новоорловский

На снимках (рис.33) проведена красная линия в микрорайоне Новоорловский в Приморском районе города. Данная территория была выбрана из-за строительства на месте лесного массива. В левой части снимка располагается особая экономическая зона (ОЭЗ) «Новоорловская», а в правой жилой массив. С 2010 года по сегодняшний день идет освоение данных территорий.

На графике (рис.34) определяются места застройки территории, где индекс растительности в 2015 и 2020 году показал меньшие значения, нежели в 2010 г. Предел значений стал примерно 0.1 – 0.3, что говорит об антропогенных объектах на территории. Увеличение яркостных данных на видоизмененных землях говорит о росте светового загрязнения (рис.35). На графике (рис.36), отмечается повышение температуры поверхности земли в местах строительства объектов. По графику отчетливо



видны продолжительные пики повышения температуры, нежели в 2010 году. Новые максимумы приурочены к местам застройки территории.

Таким образом, при сопоставлении трех графиков (рис.34-36) дается оценка территории и выявляются изменения на ней. На территории микрорайона Новоорловский произошла застройка локации с последующим влиянием на прилегающую территорию и окружающую среду.

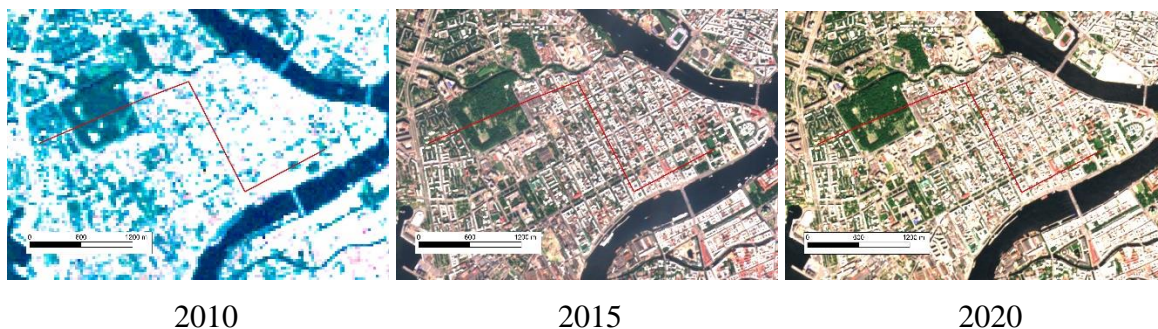


Рисунок 37. Разновременные снимки на Васильевском острове

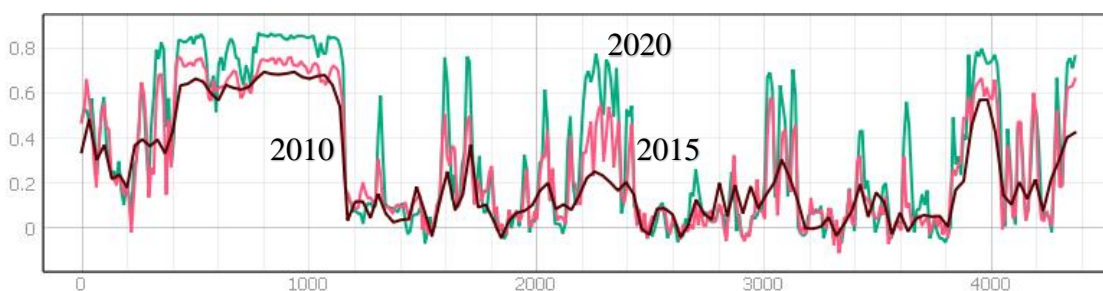


Рисунок 38. График NDVI на Васильевском острове

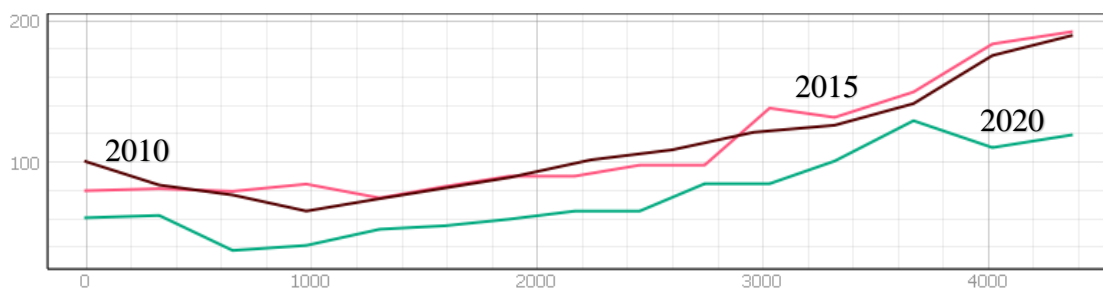


Рисунок 39. График светового загрязнения на Васильевском острове

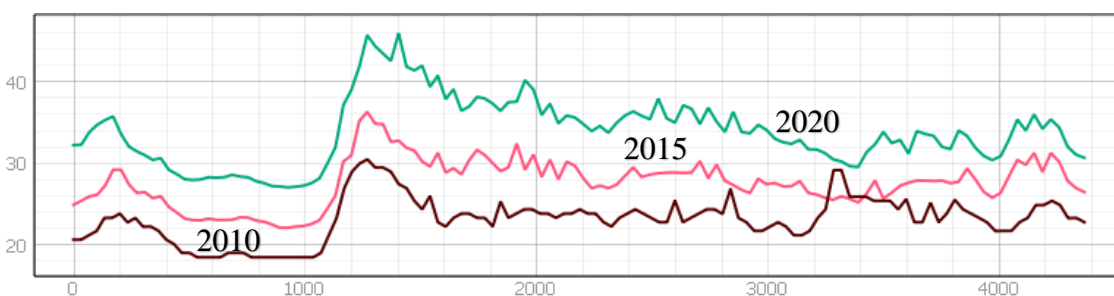


Рисунок 40. График температуры поверхности на Васильевском острове



На снимках (рис.37) проведена красная линия на Васильевском острове в центре. Данная территория была выбрана из-за сформировавшейся городской застройки в прошлые века.

По графику (рис.38) наблюдается, что на всем протяжении рассматриваемой области индекс растительности показывает одинаковый тренд на примере 3 лет. Разница в значениях из-за того, что в 2010 году использовался спутник Landsat 5 с пространственным разрешением 30 м. Рост значений NDVI в 2020 году связан с тем, что погодные условия были благоприятными для вегетации растительности. По графику (рис.39), наблюдается уменьшение яркостных данных на территории в связи с переходом на светодиодное освещение, которое сокращает световое загрязнение. На графике (рис.40) не произошло повышение температуры поверхности в пределах рассматриваемой области. Видна линия тренда на трех временных периодах. Сильная разница в значениях связана с разной температурой рассматриваемого периода.

Таким образом, при сопоставлении трех графиков (рис.38-40) на рассматриваемой области Васильевского острова не наблюдаются изменения.

#### *4.2. Хельсинки*

В ходе расчета доли зеленых насаждений в Хельсинки (прил.5) были получены данные. Высокий процент озеленения наблюдается к близким к центру районам. Данное явление обосновывается подходом в 1920-е годы финского архитектора Э. Сааринена. Он предложил вариант «органической децентрализации города». По его мнению, район децентрализованного большого города станет небольшим населенным пунктом, который будет окружен природой вокруг. Данный принцип децентрализации был применен в генеральном плане Хельсинки от 1918г. (Белкин, 1987). Наименьшая доля растительности располагается в центре города в районах Кампинмалми (32%) и Виронниemi (29%) и Каллио (26%). В других центральных районах Хельсинки процент озелененности свыше 45%. Это связано с тем, что застройка проводилась в раннее время. Высокая доля отмечается на островных районах города, а также в восточной части Хельсинки в районах Kulosaari (96%), Tuomarinkylä (95%) и Östersundom (93%). Связано это с тем, что на границе субъекта преобладает в основном частная индивидуальная застройка и имеется большое количество лесных массивов. Причина низкой застроенности островов связана с тем, что они заселялись позже из-за отсутствия мостов.

Анализируя данные из таблицы 7, делается вывод о небольшом снижении зеленой растительности в различных частях Хельсинки, за исключением районов Вартиокюля,

Каарела, Лааясало, Лауттасаари, Малми, Оулункюля, Пукинмяки. В данных районах наибольшее снижение растительности из-за увеличившегося строительства в Хельсинки. В 2020 г. ввели на 25% больше м<sup>2</sup> жилья, чем в 2016 и 2018 г. (Tilastotietojä Helsingistä 2020, 2020). Удаленные территории стали новыми центрами притяжения с расширением транспортной доступности до центра города. Помимо этого, в самом центре стоимость жилья очень высокая по финским меркам, поэтому многие делают выбор за окраинными территориями Хельсинки.

Проводится редевелопмент территорий. Сносятся старые складские помещения под жилое и общественно-деловое строительство. Тренд на увеличение застраиваемой территории в городе, например, в районе Малми закроют аэродром для малой авиации и застроят его жильем. По прогнозам, рост числа населения будет во многих районах, где не исчерпаны ресурсы (Tilastotietojä Helsingistä 2020, 2020).

Таблица 7. Доля зеленых насаждений в Хельсинки по районам

№	Район	Доля зеленых насаждений, %		
		2010 г.	2015 г.	2020 г.
1	Алппихарью	43,46	49,47	49,45
2	Валлила	37,83	42,08	43,40
3	Ванхакаупунки	76,62	80,80	80,15
4	Вартиокюля	78,50	<b>82,90</b>	<b>80,62</b>
5	Виронниеми	28,19	28,28	29,41
6	Вуосаари	77,96	78,45	77,69
7	Ита-Пакила	91,64	91,70	90,78
8	Каарела	85,83	<b>86,63</b>	<b>83,49</b>
9	Каллио	21,47	26,27	26,24
10	Кампинмалми	28,49	31,29	32,48
11	Кулосаари	96,12	98,70	98,78
12	Лааясало	97,87	98,05	97,95
13	Ланси-Пакила	90,12	91,80	91,42
14	Латокартано	83,12	88,01	87,05
15	Лауттасаари	76,13	<b>79,27</b>	<b>77,92</b>
16	Малми	79,13	<b>82,94</b>	<b>80,95</b>
17	Маунула	84,88	<b>85,24</b>	<b>83,12</b>
18	Меллункюля	82,14	84,62	83,08
19	Мунккиниеми	85,81	<b>91,14</b>	<b>89,25</b>

20	Мюллюпууро	80,12	80,80	79,83
21	Остерсундом	93,11	94,75	93,75
22	Оулункюля	82,58	<b>84,37</b>	<b>81,90</b>
23	Пасила	41,41	44,48	42,89
24	Питаянмяки	69,41	72,44	69,16
25	Пуйстола	79,58	81,78	80,63
26	Пукинмяки	78,10	<b>84,73</b>	<b>83,08</b>
27	Рейола	76,79	79,29	77,95
28	Суутарила	79,84	82,97	82,31
29	Така-Тооло	56,41	63,38	62,56
30	Туомаринкюля	94,01	95,58	95,45
31	Улланлинна	60,78	67,35	64,66
32	Хаага	74,45	<b>79,61</b>	<b>78,20</b>
33	Херттониemi	78,00	84,60	82,57
34	Якомьяки	77,43	84,51	83,59

Высокие значения озелененности (прил.6) наблюдаются в центральных районах города (Валлила, Кампинмалми, Виронниemi) и к удаленными от центра, таких как Пасила (транспортно-пересадочный узел) и Вуосаари (грузовой порт Хельсинки). Наименьшие значения распределены в окраинных (Ита-Пакила, Туомаринкюля, Остерсундом), а также островных районах (Кулосаари, Лааясало, Лауттасаари).

По данным светового загрязнения в Хельсинки отмечается небольшое снижение яркостных данных в целом (табл.8). Это связано с тем, что с 2009 по 2018 год в Хельсинки проходила программа по замене ламп накаливания на энергосберегающие и светодиодные лампы. Первоначально переход на уличное светодиодное освещение начался в окраинных районах и парках, где нет исторических конструкций. Центр города (Каллио, Кампинмалми, Пасила) переходил позднее из-за старых систем освещения, которые мэрия решила сохранить в первоначальном виде, заменив только коммуникации. Для этого были созданы вручную лампы по индивидуальному заказу. Итогом реновации стало заметное сокращение затрат на электроэнергию на 30%.

Таблица 8. Значения яркости ( $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \times \text{с}}$ ) в Хельсинки по районам

№	Район	Среднее значение по годам			Минимум по годам			Максимум по годам		
		2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
1	Алппихарью	55	78	60	44	69	47	79	90	65
2	Валлила	44	65	53	11	12	8	82	93	119
3	Ванхакаупунки	32	42	35	8	13	7	85	80	81
4	Вартиокюля	43	38	39	8	8	5	84	89	70
5	Виронниemi	45	50	45	5	5	5	122	123	112
6	Вуосаари	47	42	40	4	4	4	126	86	79
7	Ита-Пакила	21	35	24	15	24	11	29	48	35
8	Каарела	27	35	25	13	12	7	45	62	47
9	Каллио	<b>61</b>	<b>62</b>	<b>53</b>	8	19	13	74	100	89
10	Кампинмалми	45	56	46	4	4	4	123	183	167
11	Кулосаари	16	23	17	7	7	5	38	47	35
12	Лааясало	18	23	21	1	1	1	43	48	37
13	Ланси-Пакила	25	40	26	17	32	17	39	48	33
14	Латокартано	21	29	20	7	5	5	42	56	41
15	Лаутгасаари	18	20	14	2	2	2	35	76	38
16	Малми	32	44	32	15	19	13	53	70	53
17	Маунула	36	38	28	20	26	16	70	59	51
18	Меллюнкюля	44	43	34	12	24	19	79	59	42
19	Мунккиниemi	16	22	15	4	6	5	47	54	42
20	Мюллюпуру	48	46	33	21	24	15	78	70	42
21	Остерсундом	5	5	4	2	1	1	19	18	15
22	Оулункюля	26	36	28	20	26	21	52	52	48
23	Пасила	<b>82</b>	<b>77</b>	<b>71</b>	29	35	26	143	132	135
24	Питаянмяки	33	42	35	13	17	12	56	66	55
25	Пуйстола	38	42	33	16	23	18	61	66	55
26	Пукинмяки	30	47	32	22	31	17	37	63	42
27	Рейола	29	40	30	8	8	5	64	78	63
28	Суутарила	39	45	32	25	34	22	51	76	60
29	Така-Тооло	<b>63</b>	<b>64</b>	<b>50</b>	17	31	19	63	81	63

30	Туомаринкюля	16	20	14	8	9	7	35	46	29
31	Улланлинна	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>38</b>	9	9	8	93	159	164
32	Хаага	43	50	37	31	35	25	64	78	64
33	Херттониemi	33	38	27	7	8	5	81	83	58
34	Якомяки	38	38	31	27	29	23	47	49	40

Увеличение численности населения вокруг Хельсинки отмечается в муниципалитетах Вантаа, Кауниайнен, Никкиля, Ярвенпя и Эспоо по данным динамики населения агломерации Большой Хельсинки за 10-летний период (прил.7). В 2022 году была полностью открыта ветка метро из Хельсинки в Эспоо. В 2017 г. она частично была запущена. Это могло оказать влияние на увеличение населения в Эспоо. Также для улучшения транспортной доступности открыто кольцевое движение электричек по Вантаа и части Эспоо. На графике (рис.41) показано, что средняя цена 1 м<sup>2</sup> в Хельсинки выше на 1500–2000 евро, чем в соседних муниципалитетах. Это тоже один из факторов роста столичной агломерации.

На карте «Динамика населения агломерации Большой Хельсинки с 2010 по 2020 год» (прил. 7) отмечается рост в Ярвенпя и Керава. Это связано с транспортной доступностью (две железнодорожные линии (около 30 минут на электричке) и автомобильная трасса). Также в данных муниципалитетах стоимость еще ниже, чем в Эспоо и Вантаа. Кроме стоимости жилья, цены ниже на услуги, продукты питания и т.д.

Отрицательная динамика наблюдается в Порнайнен. Данная территория удалена от главных транспортных артерий агломерации.

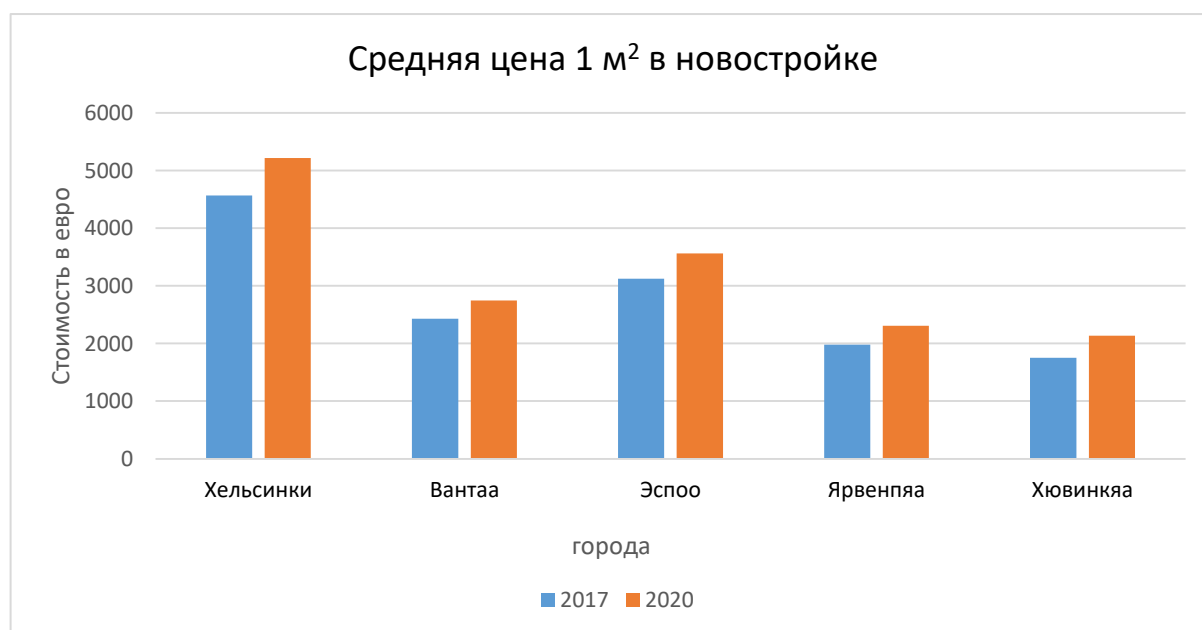


Рисунок 41. Средняя цена 1 м<sup>2</sup> в Хельсинки и агломерации (Asuntojenhinnat, 2023)

Рост численности населения в Киркконумми связан с тем, что власти муниципалитета привлекают новых людей к себе. Во-первых, город расположен недалеко от Хельсинки. Во-вторых, с Киркконумми до центра Хельсинки на электричке около 50 минут. Есть другой вариант, на личном транспорте по автомобильной трассе. В-третьих, город строит новое жилье, вкладывается в развитие инфраструктуры. За последнее время построены новые школы, детские сады, библиотека, а также обновлена водонапорная башня.

По данным карты «Динамика застройки агломерации Большой Хельсинки с 2010 по 2020» (прил.8), видно, что происходит увеличение застроенной территории в Киркконумми и Эспоо. Муниципалитет Киркконумми расположен на побережье Финского залива, имеет множество зеленых зон. Данную территорию часто выбирают для постройки коттеджей и таунхаусов для жизни на природе, но и недалеко от столицы. В соседнем Эспоо рост застройки связан с более низкой ценой по сравнению с Хельсинки (рис.41), появлением новых рабочих мест, наличием университетов для образования. Также сохраняются зеленые зоны, решаются вопросы нейтрально-углеродной экономики замкнутого цикла. Муниципалитет заинтересован в привлечении населения, с которого в дальнейшем они будут получать доходы в виде налогов.

Практически нулевая динамика замечена в Кауниайнене, Порнайнене и Хювинкя. В муниципалитете Кауниайнен ресурсы для строительства новых объектов практически исчерпаны. Порнайнен удален от транспортных артерий, в связи с чем нет высокого спроса на новое строительство. Хювинкя достаточно сильно удалена от ядра агломерации на север.

В Никкиля наблюдается увеличение застроенных территорий в первую очередь в связи с тем, что муниципалитет имеет много зеленых зон и имеет выход к Финскому заливу. Во-вторых, цены на жилье и строительство там ниже, чем в Хельсинки и округе. В-третьих, многие выбирают локацию для индивидуального строительства.

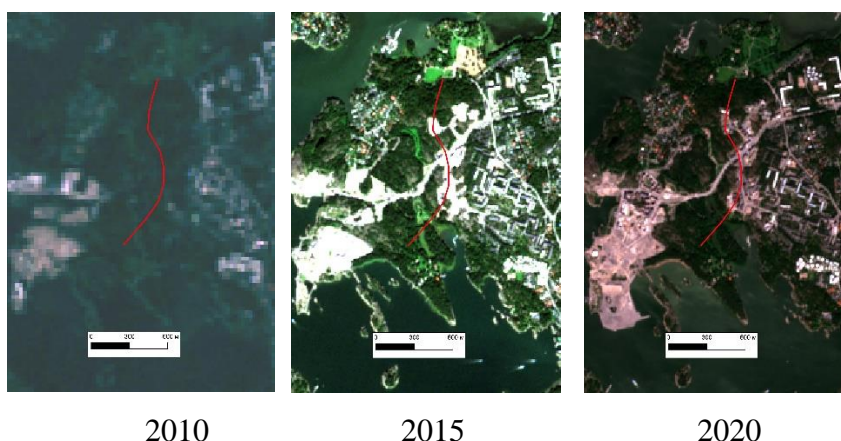


Рисунок 42. Разновременные снимки в Лааясало

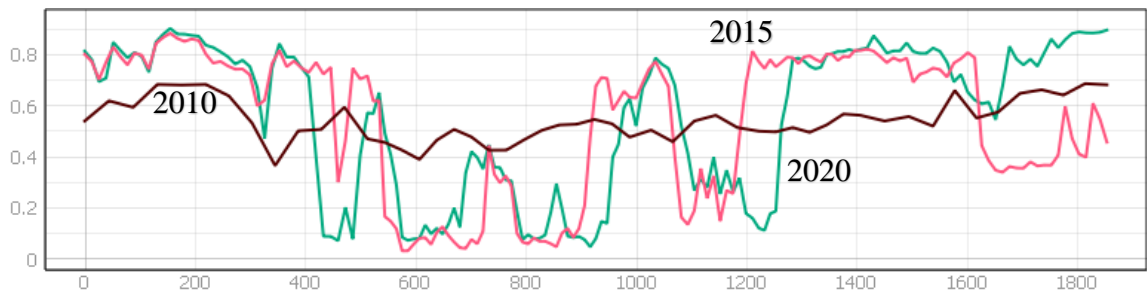


Рисунок 43. График NDVI в Лааясало

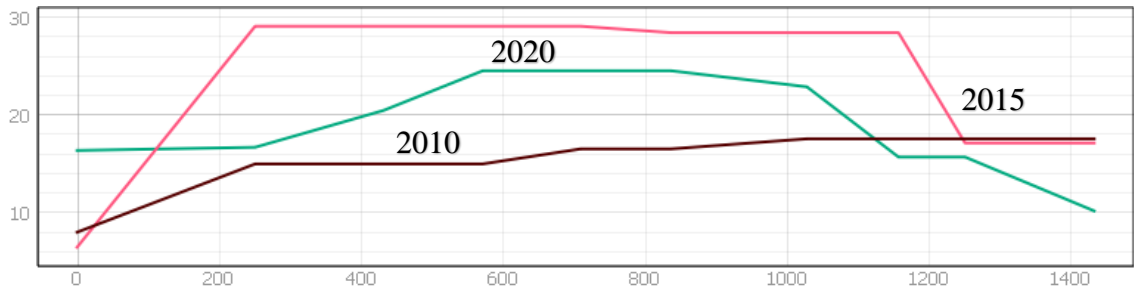


Рисунок 44. График светового загрязнения в Лааясало

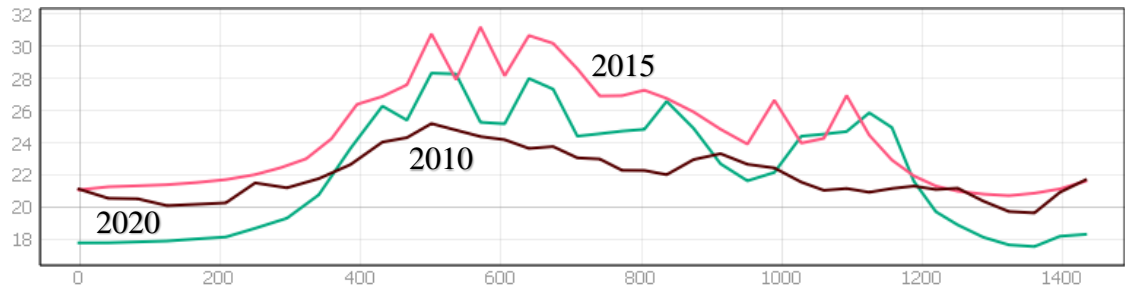


Рисунок 45. График температуры поверхности в Лааясало

На снимках (рис.42) проведена красная линия в районе Лааясало на востоке Хельсинки. Данная территория была выбрана из-за строительства на месте лесного массива. В середине линии построен новый жилой массив. С 2010 года и по сегодняшний день идет освоение данных территорий в районе.

По графику (рис.43) определяются места строительства, так как индекс растительности в 2015 и 2020 году показал меньшие значения, нежели в 2010 г. Предел значений стал примерно 0.05–0.20, что говорит о антропогенных объектах на территории. Анализируя график (рис.44), наблюдается увеличение яркостных данных в 2015 году на видоизмененных территориях, но в 2020 году снижение к 2015 году. Это может говорить о замене светильников на светодиодные. При рассмотрении к 2010 году, произошло световое загрязнение. На графике (рис.45) отмечается повышение температуры поверхности земли в местах строительства новых объектов. Также отчетливо видны пики повышения температуры, нежели в 2010 году, которые соответствуют застройке.



Таким образом, при сопоставлении трех графиков (рис.43-45) на территории района Лааясало произошли изменения территории с лесной растительности на застройку, которая оказывает влияние на окружающую среду.

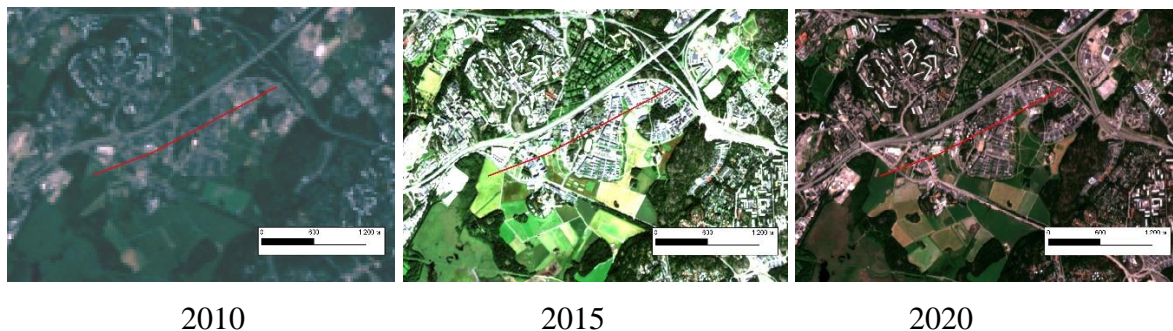


Рисунок 46. Разновременные снимки в Латокартано

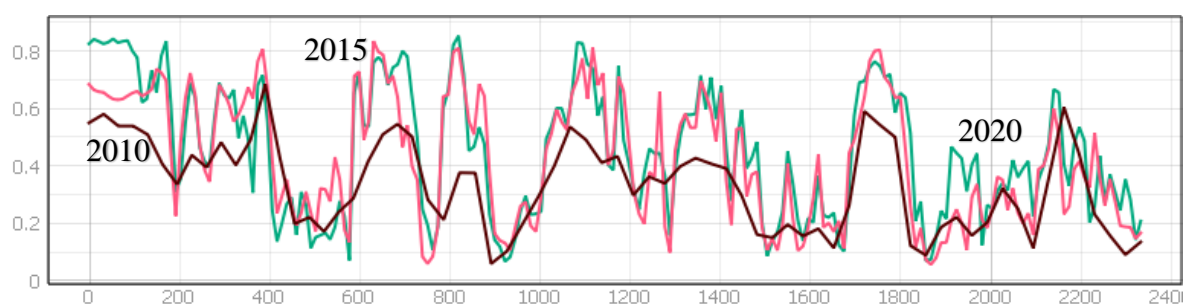


Рисунок 47. График NDVI в Латокартано

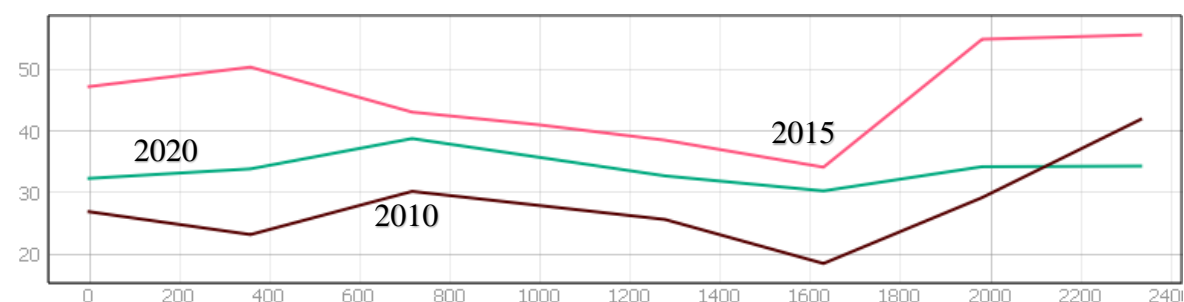


Рисунок 48. График светового загрязнения в Латокартано

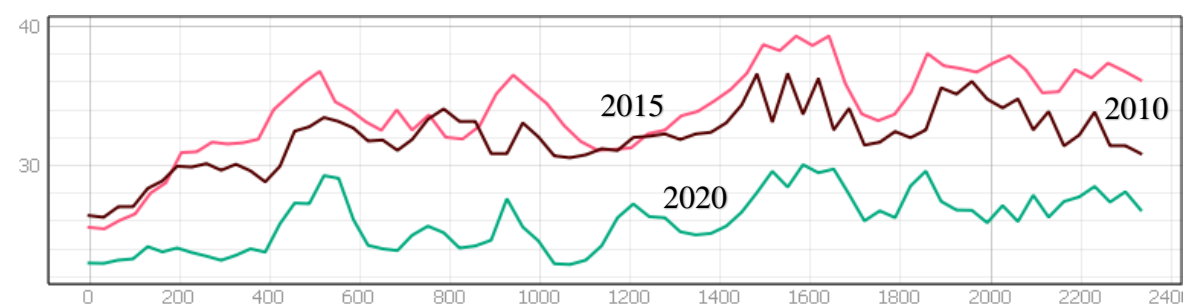


Рисунок 49. График температуры поверхности в Латокартано

На снимках (рис.46) проведена красная линия в районе Латокартано на северо-востоке Хельсинки. Данная территория была выбрана из-за сформировавшейся городской застройки до 2010 года.

По графику (рис.47) наблюдается одинаковый тренд индекса растительности на примере 3 лет. Разница в значениях из-за того, что в 2010 году использовался спутник Landsat 5 с пространственным разрешением 30 м. Рост значений NDVI в 2015 и 2020 году связан с тем, что погодные условия были благоприятными для вегетации растительности. По графику (рис.48), наблюдается уменьшение яркостных данных на территории в связи с переходом на светодиодное освещение, которое уменьшает световое загрязнение. На графике (рис.49) не произошло повышение температуры поверхности в пределах рассматриваемой области. Видна линия тренда на трех временных периодах. Сильная разница в значениях связана с разной температурой рассматриваемого периода.

Таким образом, при сопоставлении трех графиков (рис.47-49) на рассматриваемой области в районе Латокартано не наблюдаются изменения.

#### *4.3. Стокгольм*

В ходе расчета доли растительности в Стокгольме (прил.9) были получены данные о озелененности в городе. По карте «Доля зеленых насаждений в Стокгольме в 2020 г.» видно, что в центре города только 3 района с низкой долей озеленения Сёдермальм (39%), Кунгсхолмен (39%) и Нормальм (27%). Эти районы являются историческим центром Стокгольма. Сёдермальм имеет интересную особенность в виде небольших парковых зон по всему району. Высокая доля растительности наблюдается в районах Эльвшо (84%), Скарпнек (83%) и Фарста (81%), которые располагаются на окраине города Стокгольма. Но Скарпнек имеет границу с Сёдермальмом, который располагается в историческом центре. В окраинных районах города на юге и западе отмечается в основном малоэтажная застройка с частными домами в окружении большого количества парков. В Стокгольме отмечается хороший процент озеленения всего города.

Анализируя данные из таблицы 9, в Стокгольме произошло серьезное снижение зеленой растительности в районе Бромма, Ринкеби-Киста и Фарста. Это связано с увеличившейся застройкой как среднеэтажной, так и малоэтажной (Statistiskårsbok för Stockholm 2022, 2021). Наименьшее снижение наблюдается в историческом центре города (Нормальм, Сёдермальм), где и так мало, что осталось сокращать.

Окраинные районы расширяют процент урбанизированной территории в основном за счет сельскохозяйственных угодий, но есть случаи, когда и за счет лесных массивов, например, в районе Фарста.

Стокгольм в настоящее время является быстрорастущей столицей Европы, что конечно сказывается на росте численности населения, а также и в потребности увеличения застроенных территорий.

Таблица 9. Доля зеленых насаждений в Стокгольме по районам

№	Район	Доля зеленых насаждений, %		
		2010 г.	2015 г.	2020 г.
1	Бромма	<b>78,88</b>	<b>79,23</b>	<b>76,33</b>
2	Кунгсхолмен	36,71	39,12	38,76
3	Нормальм	21,74	23,59	23,66
4	Ринкеби-Киста	<b>80,45</b>	<b>82,41</b>	<b>78,05</b>
5	Сёдермальм	37,03	38,94	38,72
6	Скарпнек	81,58	83,33	83,07
7	Скархольмес	74,32	74,85	73,24
8	Спанга-Тенста	79,44	82,00	81,23
9	Фарста	<b>81,52</b>	<b>82,97</b>	<b>80,75</b>
10	Хагерстен- Лильехольмен	63,56	65,73	64,76
11	Хессельбю-Веллингбю	70,15	70,26	69,76
12	Эльвшо	84,34	85,65	84,24
13	Энскеде-Эрста-Вантёр	77, 79	76,21	75,81
14	Эстермальм	54,47	56,14	55,86

Анализируя данные (прил.10), центральные районы города (Нормальм, Сёдермальм, Кунгсхолмен) имеют высокие значения. Также выше среднего наблюдается в районах с увеличившейся застройкой Ринкеби-Киста, Хагерстен-Лильехольмен и Фарста. Наименьшие значения распределены в окраинных частях Стокгольма, преимущественно на востоке и западе города: Скарпнек и Хессельбю-Веллингбю.

По данным светового загрязнения в Стокгольме отмечается небольшое снижение яркостных данных в целом (табл.10). Это связано с тем, что после 2015 году город перешел на современное энергосберегающее электричество. Затраты на уличное освещение сократились на 25%.

С 2018 году в Стокгольме реализовывались пилотные проекты по «умному освещению» в городе. Целью является экономия ресурсов и контроль за светильниками. Сейчас оператор подает сигнал о включении или выключении уличного сигнала.

Технология на данный момент устарела. Теперь свет сам включается от времени суток и регулируется по необходимости. Также на пульт управления поступает информация о неисправности светильника. До этого рабочим приходилось совершать обходы и выявлять проблемные фонарные столбы или обрабатывать заявки населения о неисправностях. С новыми умными технологиями происходит сохранение бюджетных средств. Помимо этого, на умные светильники устанавливаются датчики для наблюдения за температурой воздуха, загрязнением атмосферы и т.д.

Проект внесет свой вклад в общую стратегию Стокгольма как умного и взаимосвязанного города и имеет несколько четких целей воздействия для повышения экономической и экологической устойчивости. В дальнейшем яркостные значения в Стокгольме должны снизиться, так как в ночное время людей на улице нет, в связи с чем фонари не будут работать на полную мощность.

Таблица 10. Значения яркости ( $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \times \text{ст}}$ ) в Стокгольме по районам

№	Район	Среднее значение по годам			Минимум по годам			Максимум по годам		
		2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
1	Бромма	31	32	24	9	5	4	80	86	65
2	Кунгсхолмен	<b>53</b>	<b>48</b>	<b>43</b>	15	11	14	96	128	104
3	Нормальм	<b>73</b>	<b>90</b>	<b>72</b>	32	30	29	114	176	139
4	Ринкеби-Киста	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>33</b>	5	3	3	72	87	73
5	Сёдермальм	<b>54</b>	<b>56</b>	<b>48</b>	26	23	21	93	147	73
6	Скарпнек	23	23	20	3	4	4	82	71	68
7	Скархольмес	43	30	25	8	4	3	118	91	69
8	Спанга-Тенста	35	38	29	19	9	10	63	80	50
9	Фарста	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>28</b>	11	8	5	76	72	51
10	Хагерстен-Лильехольмен	<b>46</b>	<b>43</b>	<b>35</b>	12	4	7	89	110	76
11	Хессельбю-Веллингбю	21	26	19	2	3	2	49	80	51
12	Эльвшо	48	42	32	24	15	14	74	85	64
13	Энскеде-Эрста-Вантёр	55	51	37	14	11	14	118	122	80
14	Эстермальм	32	31	27	7	5	4	97	122	131

Анализируя динамику населения агломерации Большой Стокгольм за 10-летний период (прил.11), наблюдается увеличение численности населения вокруг столицы в муниципалитетах Сундбюберг, Уппландс-Бро, Сингтуна, Ярфелла, Ханинге и Солна. В 2020 году была открыта ветка метро на северо-восток города через город Солна и Халлонберген. Это могло оказать влияние на увеличение населения в данном направлении. На графике (рис.50) показано, что средняя цена 1 м<sup>2</sup> в Стокгольме свыше 75000 шведских крон, что на 15000–20000 больше, чем в близлежащих муниципалитетах. Это тоже как один из факторов роста столичной агломерации.

На карте «Динамика населения агломерации Большой Стокгольм с 2010 по 2020 год» (прил.11) наблюдается рост и в отдаленных районах агломерации, например, Седертелье или Ханинге. Цена 1 м<sup>2</sup> там ниже на 30000–35000 шведских крон, чем в Стокгольме. Такие территории вдобавок к этому развиваются за счет того, что там проложены железнодорожные ветки, а также имеются автомобильные трассы. Поездка на пригородном поезде от Седертелье или Ханинге до центра Стокгольма занимает меньше 30 минут. Кто проживает в Стокгольме вероятно дольше может добираться до центра города, нежели из пригорода.

Транспортная доступность по карте «Динамика населения агломерации Большой Стокгольм с 2010 по 2020 год» ниже на востоке и северо-востоке агломерации.

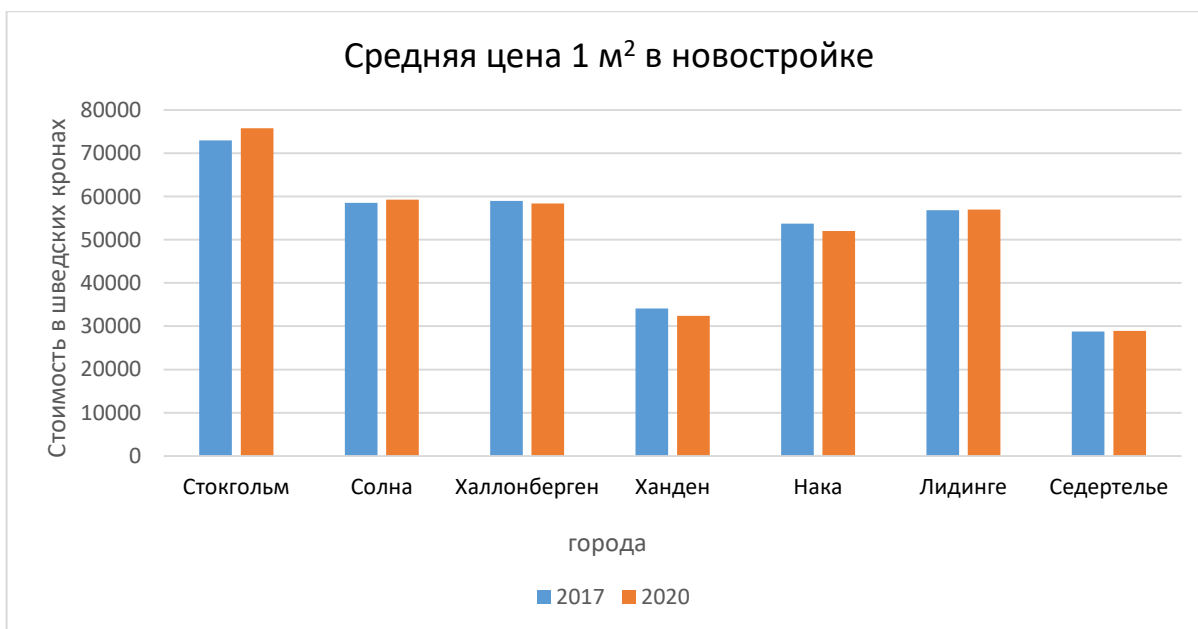


Рисунок 50. Средняя цена 1 м<sup>2</sup> в Стокгольме и агломерации (Maklarstatistik, 2023)

В приграничных муниципалитетах со Стокгольмом цена жилья примерно одинаковая, около 60000 крон (рис.450).

На карте «Динамика населения агломерации Большой Стокгольм с 2010 по 2020 год» (прил.11) наблюдается положительная динамика численности населения в

агломерации Стокгольма. Это еще раз подтверждает, что Стокгольм является быстрорастущей столицей Европы.

Анализируя карту (прил.12), можно сделать вывод об увеличении застроенной территории на северо-востоке и по границам агломерации, в особенности в Нюкварне. Небольшие муниципалитеты на севере и востоке от Стокгольма имеют наименьшую положительную динамику, так как их площадь невелика и ресурсы начинают исчерпываться (Statistiskårsbok för Stockholm 2022, 2021).

Увеличение роста застройки в муниципалитете Нюкварне не случайно. Власти привлекают малый бизнес для создания новых рабочих мест. Как следствие, повышение благосостояния людей и налоговые поступления в бюджет. Перед привлечением новых людей, власти решали вопрос создания новых жилищных условий.

Многие люди расселяются преимущественно вдоль железнодорожной сети и автомобильных трасс, так как это возможность работать в Стокгольме, а жить в агломерации.

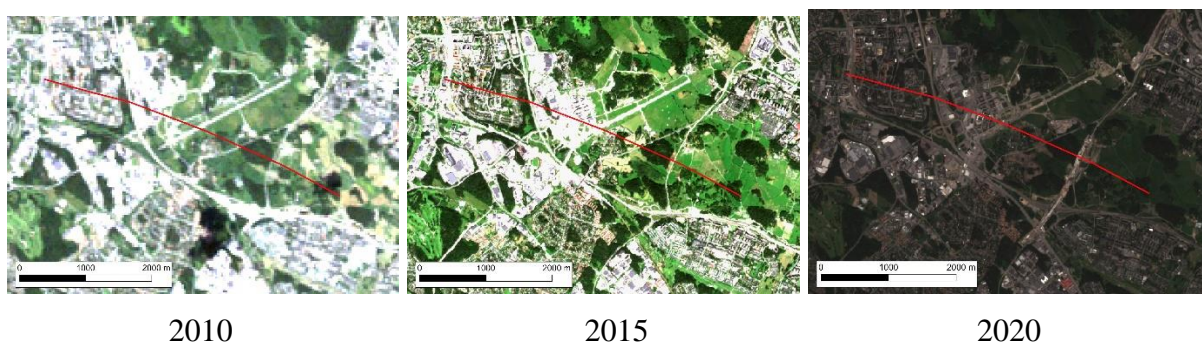


Рисунок 51. Разновременные снимки в Ринкеби-Киста

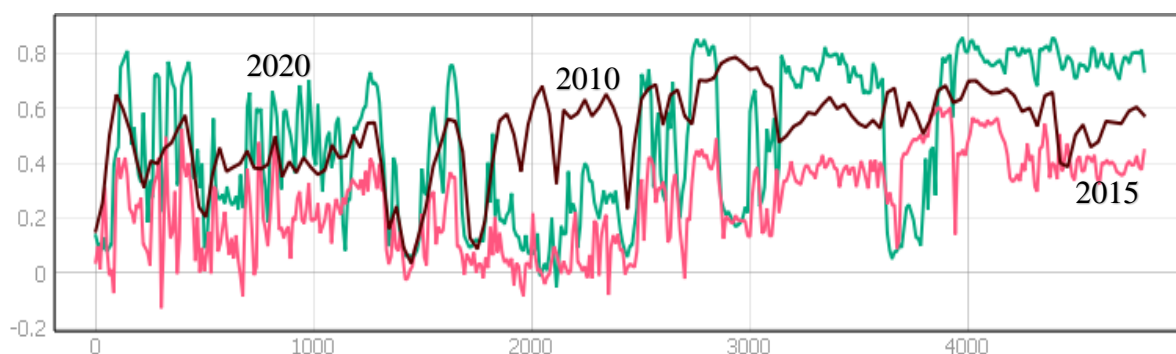


Рисунок 52. График NDVI в Ринкеби-Киста



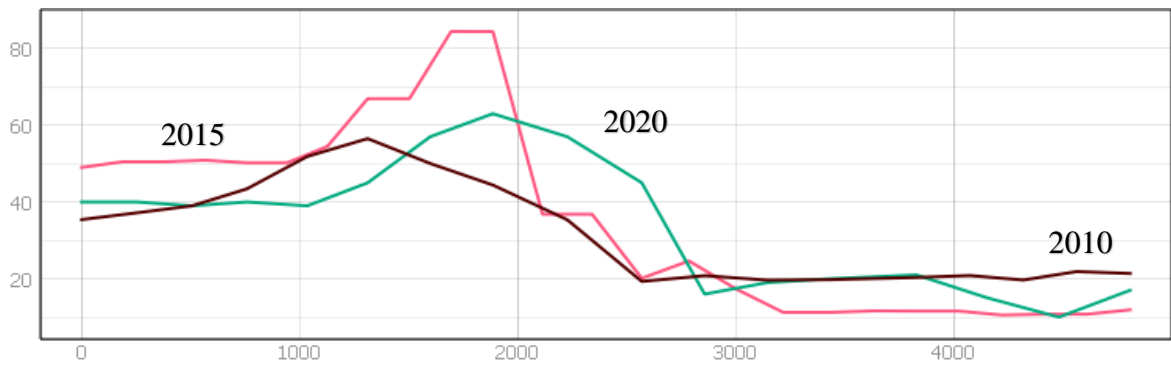


Рисунок 53. График светового загрязнения в Ринкеби-Киста

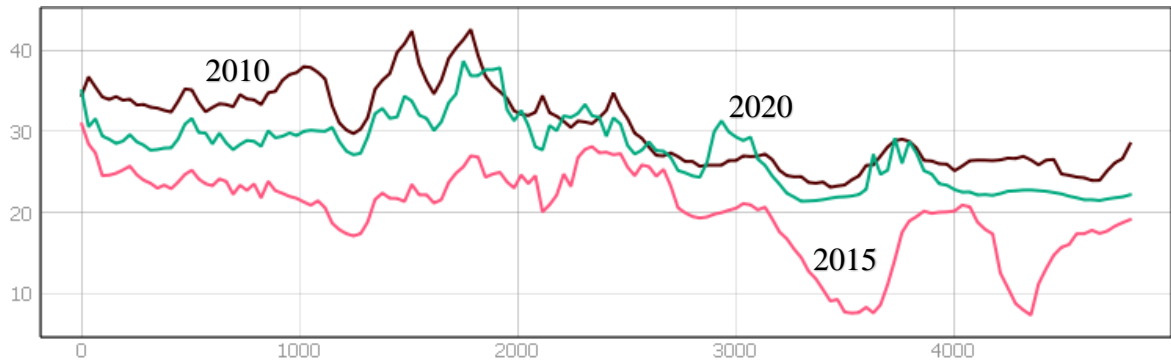


Рисунок 454. График температуры поверхности в Ринкеби-Киста

На снимках (рис.51) проведена красная линия в районе Ринкеби-Киста на западе Стокгольма. Данная территория была выбрана из-за изменения облика территории за счет постройки общественно-деловой зоны и новых транспортных артерий. В середине линии построен новый комплекс.

По графику (рис.52) определяются места строительства комплекса и дорожной сети, так как индекс растительности в 2015 и 2020 году показал меньшие значения, нежели в 2010 г. Предел значений стал примерно 0.05–0.30, что говорит об антропогенных объектах на территории. Анализируя график (рис.53), наблюдается увеличение яркостных данных в 2015 и 2020 году на месте нового комплекса. Но значения яркости снизились в 2020 году, по сравнению с 2015 годом, что может говорить о замене светильников на светодиодные или умное освещение. На графике (рис.54) на данном участке в целом не произошло повышение температуры поверхности земли. Возможно, строители предусмотрели озеленение территории, которое охлаждает поверхность в местах постройки новых объектов.

Таким образом, при сопоставлении трех графиков (рис.52-54) на территории района Ринкеби-Киста произошли изменения, которые оказывают влияние на окружающую среду.

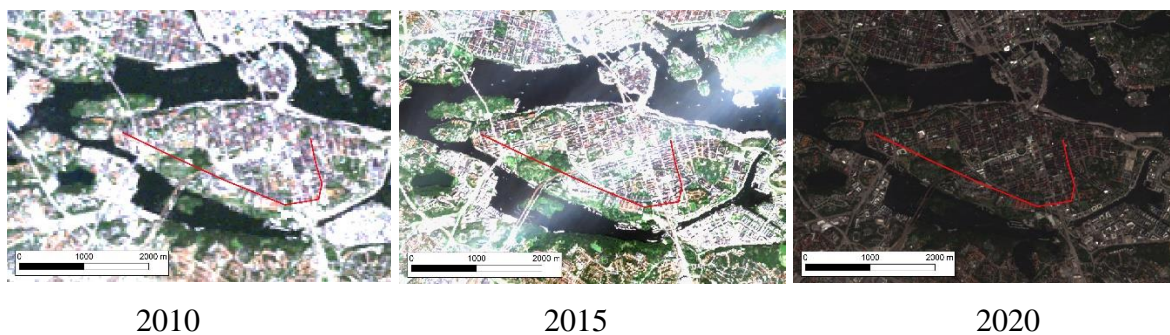


Рисунок 55. Разновременные снимки в Сёдермальме

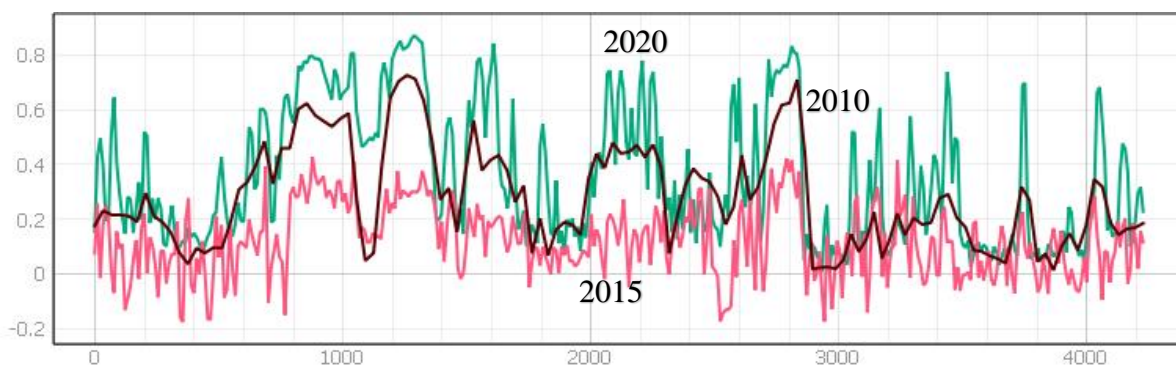


Рисунок 56. График NDVI в Сёдермальме

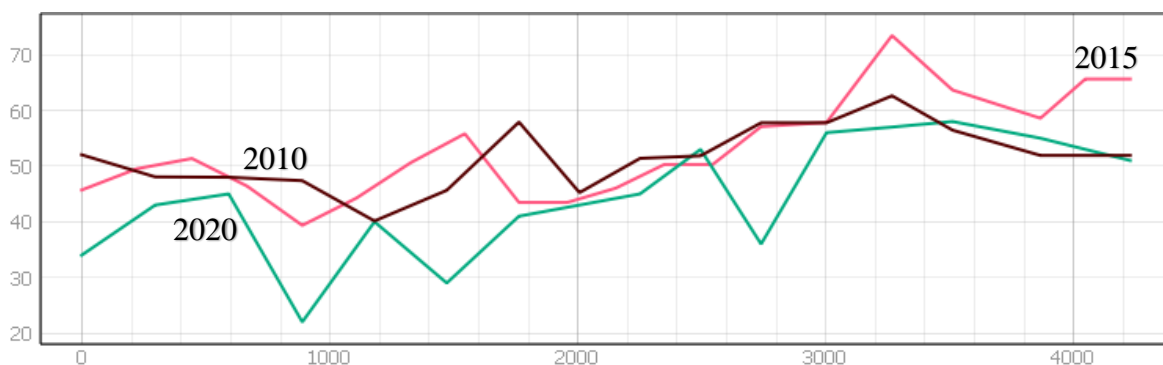


Рисунок 57. График светового загрязнения в Сёдермальме

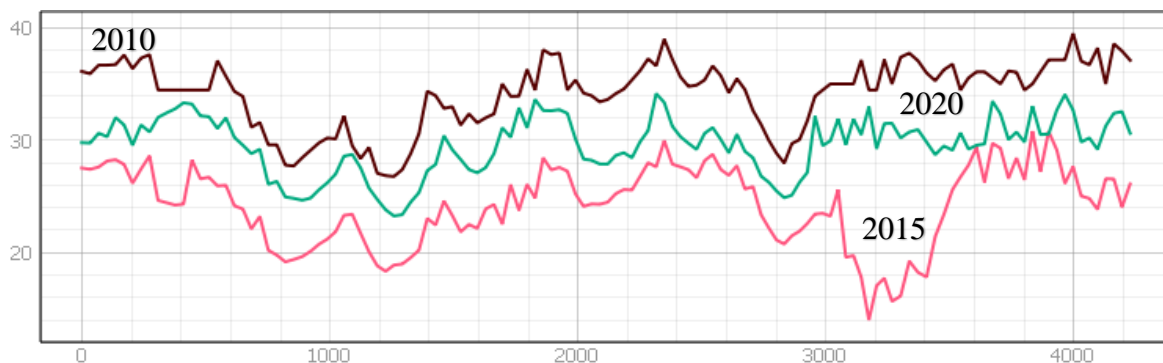


Рисунок 58. График температуры поверхности в Сёдермальме

На снимках (рис.55) проведена красная линия в районе Сёдермальме в историческом центре столицы. Данная территория была выбрана из-за сформировавшейся городской застройки.

По графику (рис.56) наблюдается одинаковый тренд индекса растительности на примере 3 лет. Разницы в значениях из-за того, что в 2010 году использовался спутник Landsat-5 с пространственным разрешением 30 м. В 2015 году из-за неблагоприятных погодных условий снимок взят в конце августа. В это время растительность увядает. Анализируя график (рис.57), наблюдается уменьшение яркостных данных на территории в связи с переходом на светодиодное освещение, которое уменьшает световое загрязнение, а также с внедрением умных светильников. На графике (рис.58) не отмечается повышение температуры поверхности в пределах рассматриваемой области. Видна линия тренда на трех временных периодах. Сильная разница в значениях связана с разной температурой рассматриваемого периода.

Таким образом, при сопоставлении трех графиков (рис.56-58) на рассматриваемой области в районе Сёдермальме не наблюдаются изменения.

#### *4.4. Осло*

В ходе расчета доли растительности в Стокгольме (прил.13) были получены данные о озелененности. По карте «Доля зеленых насаждений в Осло в 2020 г.» видно, что в центре города только 1 района с низкой долей озеленения – Сентрум (26%). Данный район является историческим центром столицы, со сложившейся застройкой в прошлые века. Озеленение району дает парк вокруг Королевского Дворца. Высокая доля растительности наблюдается в районах Вестре-Акер (91%), Сондре Нордстранд (91%) и Нордстранд (88%), которые располагаются на окраине города Осло и граничат с Маркой. Маркой в Норвегии называются территории, которые находятся под охраной (заповедники, ООПТ). Они не относятся не к одному району города, а напрямую подчинены к мэрии города.

Высокая доля озелененности в южных и северных окраинных районах города связана с распространением малоэтажной и индивидуальной застройкой. На востоке города распространены промышленные и общественно-деловые зоны Осло.

Анализируя данные из таблицы 11, можно сделать вывод о снижении зеленой растительности в районе Ална, Гроруд и Стовнер. Это связано с увеличившейся застройкой как среднеэтажной, так и малоэтажной. Без заметных изменений остались районы в центре города – Гамле Осло, Грюнерлокка, Сентрум. Также это связано в первую очередь с уже сформировавшейся застройкой.

Окраинный районы сокращают немного процент озелененности за счет проведения уплотнительной застройки как индивидуальной, так и частной. Помимо этого, на востоке города открываются новые общественно-деловые центры.

Таблица 11. Доля зеленых насаждений в Осло по районам

№	Район	Доля зеленых насаждений, %		
		2010 г.	2015 г.	2020 г.
1	Ална	<b>68,69</b>	<b>68,10</b>	<b>66,53</b>
2	Бьерке	67,14	68,96	68,30
3	Вестре-Акер	93,92	91,93	91,23
4	Гамле-Осло	57,60	58,40	58,21
5	Гроруд	<b>66,71</b>	<b>67,80</b>	<b>66,32</b>
6	Грюнерлокка	53,75	56,04	55,85
7	Нордре Акер	88,60	88,16	86,76
8	Нордstrand	90,83	87,81	87,95
9	Остенсьо	85,57	83,03	83,31
10	Сагене	54,52	57,42	57,97
11	Санкт-Хансхауген	58,06	58,33	57,94
12	Сентрум	23,89	26,11	25,89
13	Стовнер	<b>86,71</b>	<b>85,24</b>	<b>84,56</b>
14	Сондре Нордstrand	91,14	91,25	90,92
15	Уллерн	86,17	84,47	84,04
16	Фрогнер	<b>70,24</b>	<b>70,96</b>	<b>70,06</b>

Анализируя данные (прил.14), отмечаются высокие средние значения в центральных районах города (Грюнерлокка, Санкт-Хансхауген, Сентрум). Наименьшие значения распределены в окраинных районах Осло, преимущественно на севере и юге города, где наибольший процент озеленения: Вестре-Акер, Нордре-Акер, Нордstrand, Остенсьо, Сондре Нордstrand.

По данным светового загрязнения в Осло, наблюдается уменьшение средних яркостных данных по всем районам (табл.12). Это связано с тем, что в Осло происходит постепенная замена светильников. На данный момент процесс остановлен в связи с маленьким сроком службы оборудования. По данным мэрии, снижение светового загрязнения отмечено примерно на 15% по всему городу. Но это не покрывает затраты на замену. Также наблюдается рост максимальных значений в Осло. Это скорее всего новые объекты в городе, которые получили подсветку (табл.8). Данное явление наблюдается в районах Грюнерлокка, Санкт-Хаусхаген, Сентрум и Фрогнер, которые расположены в самом центре Осло.

Таблица 12. Значения яркости ( $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \times \text{с}}$ ) в Осло по районам

№	Район	Среднее значение по годам			Минимум по годам			Максимум по годам		
		2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
1	Ална	53	50	37	15	11	10	116	115	77
2	Бьерке	59	57	32	14	10	5	116	124	59
3	Вестре-Акер	23	23	17	7	5	3	44	52	38
4	Гамле-Осло	30	30	21	2	2	2	87	114	86
5	Гроруд	34	33	19	7	3	5	70	66	51
6	Грюнерлокка	59	62	<b>45</b>	45	46	30	<b>81</b>	<b>101</b>	<b>101</b>
7	Нордре Акер	31	34	23	5	9	5	57	61	47
8	Нордстранд	21	22	17	2	2	1	71	86	66
9	Остенсьо	34	32	21	14	13	10	59	61	36
10	Сагене	52	49	35	42	34	24	58	57	47
11	Санкт-Хансхауген	56	54	<b>52</b>	41	33	24	<b>122</b>	<b>118</b>	<b>149</b>
12	Сентрум	91	118	<b>89</b>	31	50	32	<b>140</b>	<b>180</b>	<b>148</b>
13	Стовнер	36	35	23	15	14	10	55	62	35
14	Сондре Нордстранд	16	17	13	1	1	2	36	45	26
15	Уллерн	31	32	27	15	18	14	50	62	55
16	Фрогнер	26	33	24	2	2	2	<b>103</b>	<b>149</b>	<b>112</b>

Рассматривая динамику населения агломерации Большой Осло за 10-летний период (прил.15), отмечается увеличение численности населения вокруг столицы в южном и северо-восточном направлении в муниципалитетах Вестбю, Валер, Лёренског, Наннестад, Улленсакер. Связано это, во-первых, с тем, что Норвегия вытянута в меридианальном направлении. Магистраль юг-север является транзитной составляющей вглубь Норвегии, так и в другие страны Европы.

Анализируя график цен в различных муниципалитетах агломерации(рис.59), отмечается снижение цен на жилье, по сравнению с Осло. Разница между столицей и близлежащими городами примерно в 30000-40000 норвежских крон за 1м<sup>2</sup>. Это влияет на выбор места для проживания. Это как один из факторов роста агломерации.



Рисунок 59. Средняя цена 1 м<sup>2</sup> в Осло и агломерации (Smartepenger, 2023)

Люди выбирают в приоритете транспортную доступность до столицы страны. Увеличение населения привязано к транспортным узлам, таким как железнодорожные и автомобильные дороги. Это позволяет быстро добираться в Осло. Не исключено, что многие жители Осло добираться до работы дольше, чем те, кто живет в агломерации. Например, поездка на пригородном поезде из столицы до Мосса примерно 40 минут.

Также отмечается невысокая положительная динамика на юго-востоке страны. Низкие показатели говорят о недостаточной транспортной доступности и удаленности от Осло.

Анализируя данные (прил.16), наблюдается увеличение застроенной территории во всех частях агломерации, в особенности в Энебакк, Валер и Ниттендал. Связано это с тем, что муниципалитеты стараются привлечь новых людей на свою территорию. Но для этого необходимо производить застройку, чтобы создать предложение на рынке жилья и новых рабочих мест. Муниципалитет со временем получает выгоды в виде налоговых поступлений в бюджет.

По карте «Динамика застройки агломерации Большой Осло с 2010 по 2020 год» (прил.16), видно, что рост в сельских населенных пунктах: Киркебюгден и Ротнес. Многие люди хотят жить подальше от городской суеты, но в тоже время и недалеко от работы. В небольших поселениях цены на жилье гораздо ниже, чем в столице и близости.



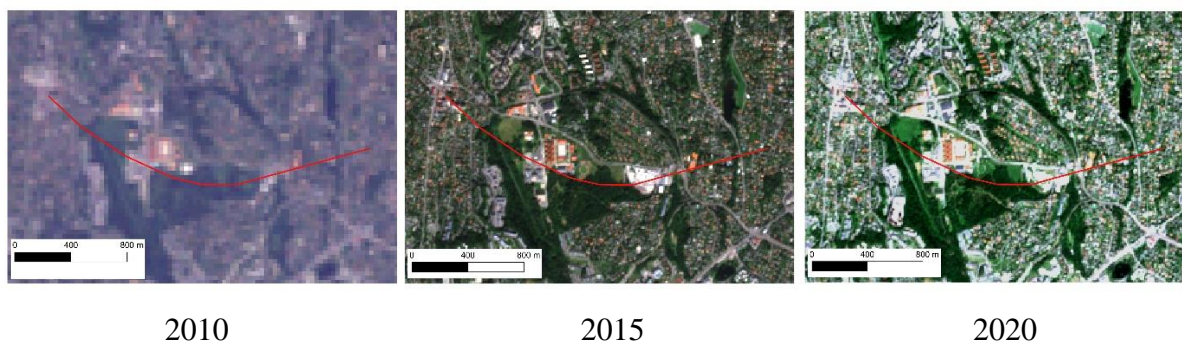


Рисунок 60. Разновременные снимки в Вестре-Акер

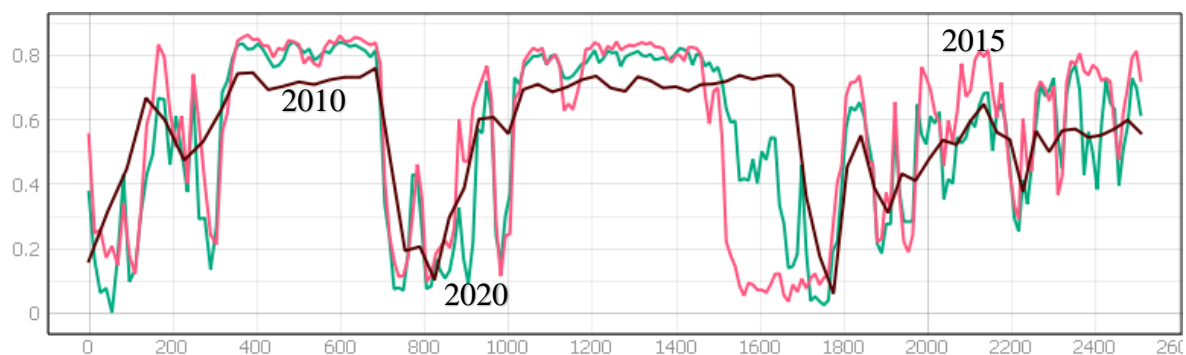


Рисунок 61. График NDVI в Вестре-Акере

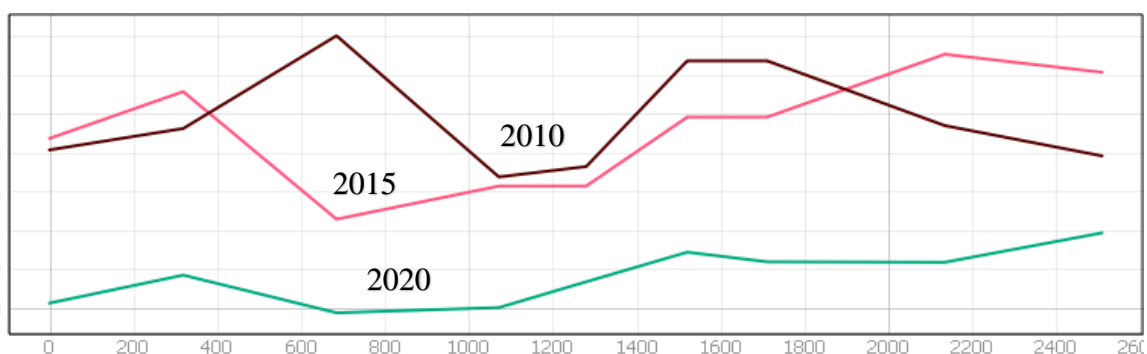


Рисунок 62. График светового загрязнения в Вестре-Акер

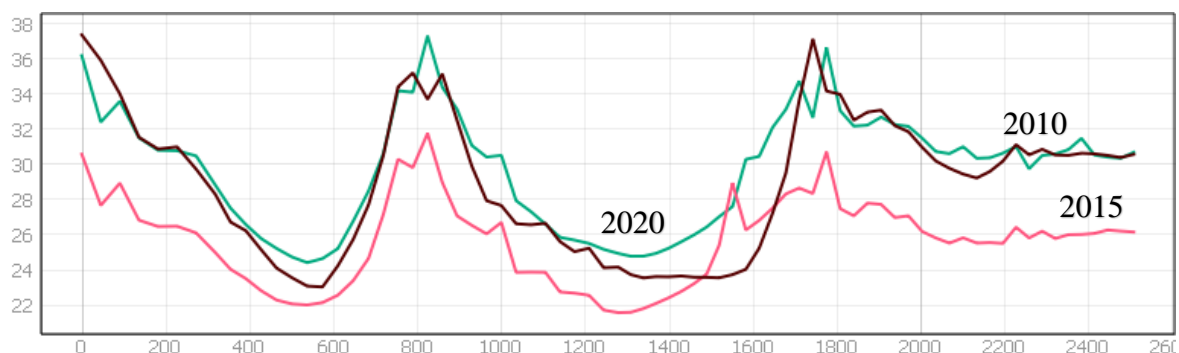


Рисунок 63. График температуры поверхности в Вестре-Акер

На снимках (рис.60) проведена красная линия в районе Вестре-Акер на западе Осло. Данная территория была выбрана из-за изменения облика территории за счет общественно-делового здания. В середине линии построено новое здание.

По графику (рис.61) определяется место строительства здания, так как индекс растительности в 2015 и 2020 году показал меньшие значения, нежели в 2010 г. Предел значений стал примерно 0.05–0.30, что говорит об антропогенных объектах на территории. Анализируя график (рис.62), на данной местности произошло сокращение яркостных данных в 2015 и 2020 году. Уменьшение значений яркости говорит о замене светильников на светодиодное освещение. На графике (рис.63) произошло увеличение температуры поверхности Земли на месте строительства здания.

Таким образом, при сопоставлении трех графиков (рис.61-63) на территории района Вестре-Акер произошло изменение, которое оказывает влияние на окружающую среду.

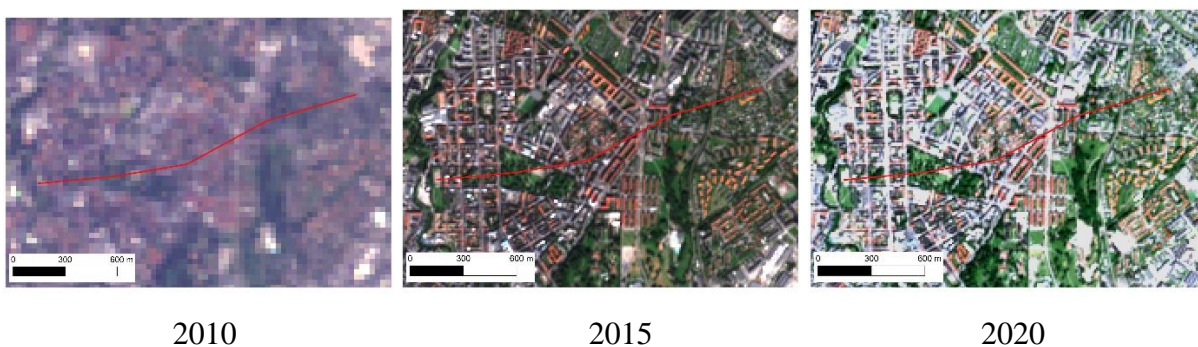


Рисунок 64. Разновременные снимки в Грюнерлокка

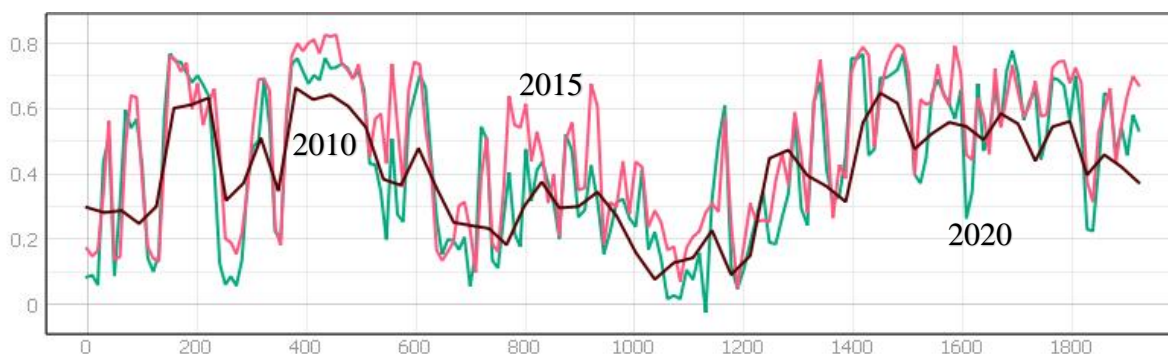


Рисунок 65. График NDVI в Грюнерлокка

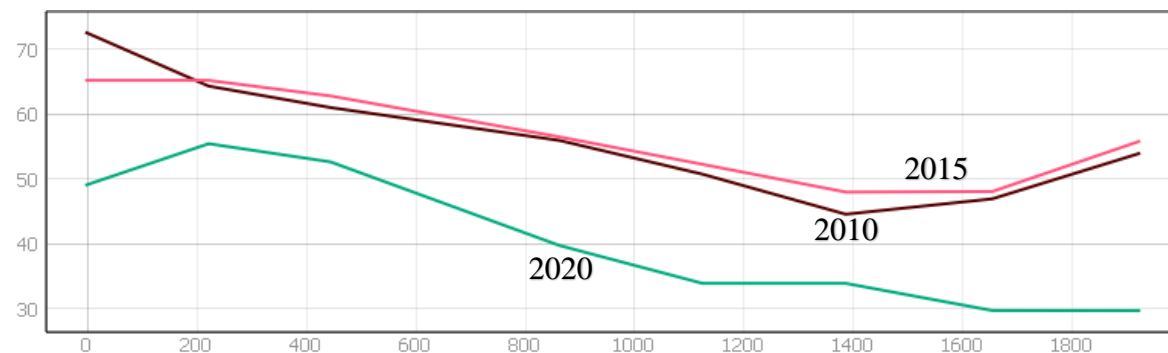


Рисунок 66. График светового загрязнения в Грюнерлокка

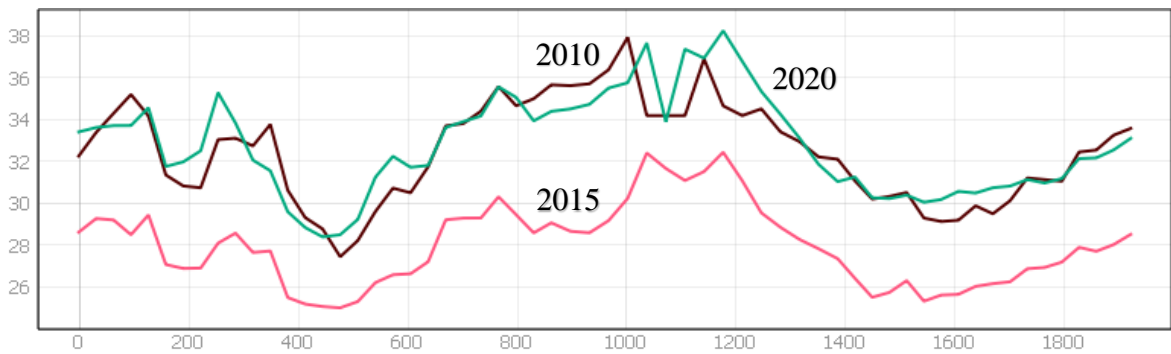


Рисунок 67. График температуры поверхности в Грюнерлокка

На снимках (рис.64) проведена красная линия в районе Грюнерлокка в историческом центре столицы. Данная территория была выбрана из-за сформировавшейся городской застройки.

По графику (рис.65) наблюдается одинаковый тренд индекса растительности на примере 3 лет. Разницы в значениях из-за того, что в 2010 году использовался спутник Landsat-5 с пространственным разрешением 30 м. В 2015 году из-за неблагоприятных погодных условий снимок взят в начале сентября. В это время растительность начинает увядать. Анализируя график (рис.66), наблюдается уменьшение яркостных данных на территории в связи с переходом на светодиодное освещение, которое уменьшает световое загрязнение. На графике (рис.67) не отмечается повышение температуры поверхности в пределах рассматриваемой области. Видна линия тренда на трех временных периодах. Сильная разница в значениях связана с разной температурой рассматриваемого периода.

Таким образом, при сопоставлении трех графиков (рис.65-67) на рассматриваемой области в районе Грюнерлокка не наблюдаются изменения.

#### 4.5. Общие результаты

По фондовому источнику на основе материала статистического центра города Хельсинки (Helsingin tilastollinen vuosikirja 2020, 2020) составили диаграмму изменения численности населения четырех городов: Осло, Санкт-Петербурга, Стокгольма и Хельсинки (рис.68).

По графику (рис.68) видна положительная динамика населения во всех четырех городах. Наибольший прирост населения с 2010 по 2020 год наблюдается в Осло и Стокгольме и составляет 18%, в Санкт-Петербурге и Хельсинки по 11% и 12% соответственно. На следующие десятилетие прогноз динамики численности населения показывает уменьшение прироста: в Хельсинки и Стокгольме по 12%, Осло 7%, Санкт- Петербурге 5%. Таким образом, за период с 2000-2030 год сохраняется тренд на

увеличение численности населения в четырех городах. Рост горожан увеличивает спрос на жилье и транспортную доступность.

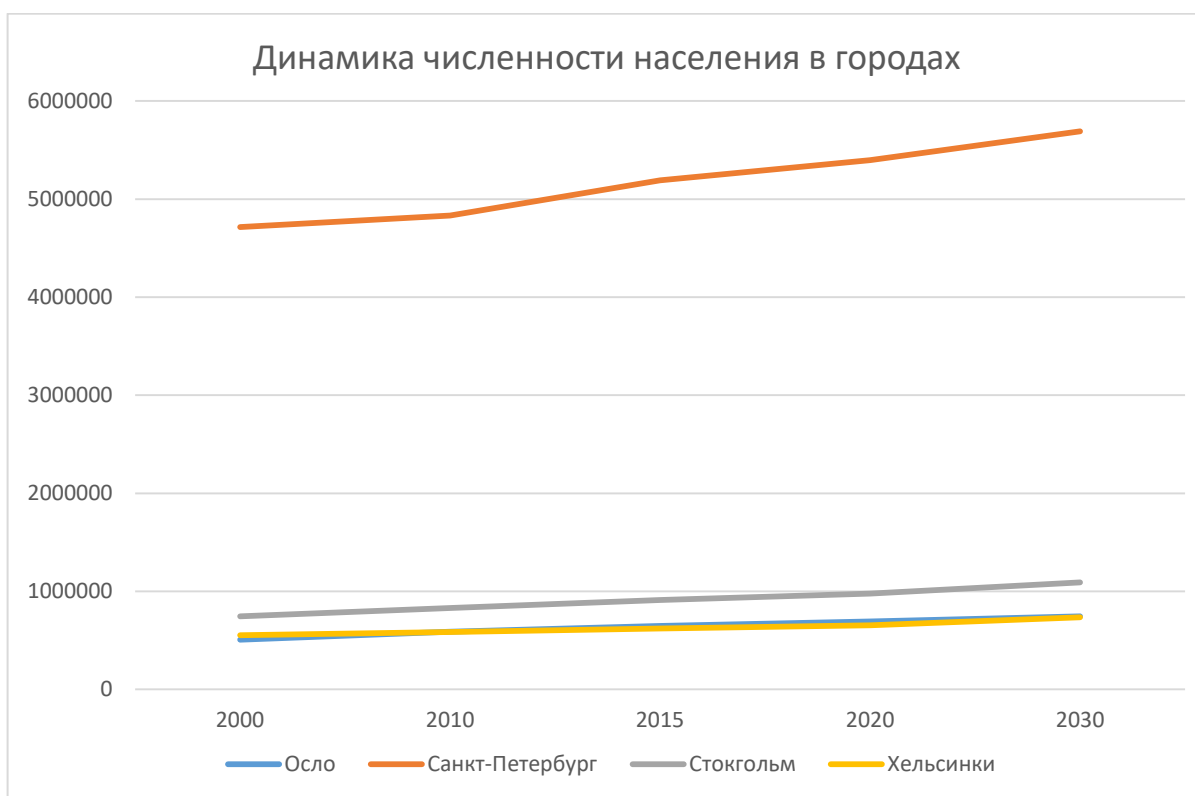


Рисунок 68. Изменение численности населения с 2000 – 2030 г.

По графику (рис.69) виден рост численности населения в четырех агломерациях. Наибольший прирост показала Санкт-Петербургская, которая увеличила численность населения на 36% за 10 лет. Остальные три агломерации показали рост примерно на 15%. Численность населения наибольшая в агломерации Большой Стокгольм, что еще раз подтверждает данные о быстрорастущей столице Европы.

По картам динамики численности населения в агломерациях наблюдается положительная динамика в двух агломерациях: Большой Осло и Большой Стокгольм. В Санкт-Петербургской и Большой Хельсинки агломерациях отмечены отрицательные показатели в некоторых муниципалитетах. Учитывая это, Санкт-Петербургская агломерация за 10 лет сделала наибольший рост среди четырех агломераций. В ней отмечен наибольший прирост среди поселений агломераций: Муринское и Заневское. Оба поселения увеличили численность населения в 10 раз за 10 лет.

По картам динамики застройки агломераций рост наблюдается около 5-15% в среднем в трех агломерациях: Большой Осло, Большой Стокгольм и Большой Осло. В Санкт-Петербургской агломерации прирост отмечен до 100% и выше (Оржицкое СП 150%, Гостилицкое СП 140%). В первую очередь, это связано с увеличением индивидуального строительства

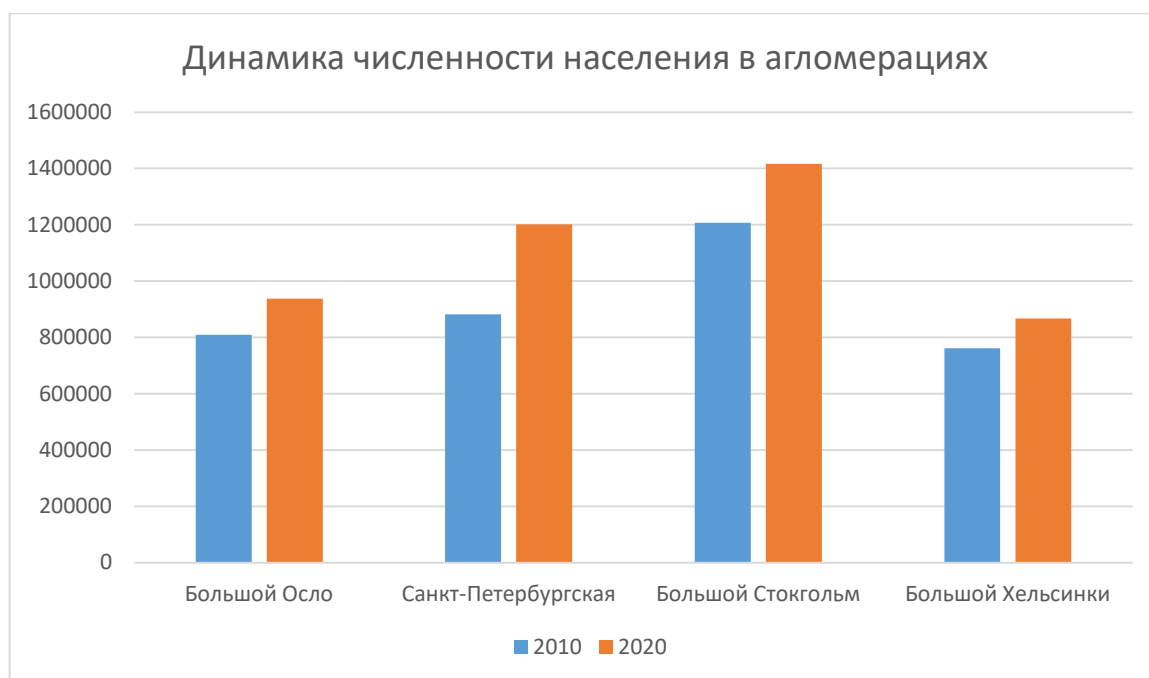


Рисунок 69. Изменение численности населения в агломерациях с 2010 – 2020 г.

На графике (рис.70) показано, что наибольший процент озеленения в городе Осло (81%). Расчеты подтверждают информацию о том, что Осло является самой зеленой столицей Европы. Наименьшее количество озеленения выявлено в городе Санкт-Петербурге, около 60%. В Хельсинки и Стокгольме доля зеленых насаждений примерно 74% и 72% соответственно. В Осло большую площадь имеет Марка с охраняемыми зелеными зонами.

Результаты показали тренд, что во всех городах происходит снижение доли зеленых насаждений в связи с изменениями территорий.

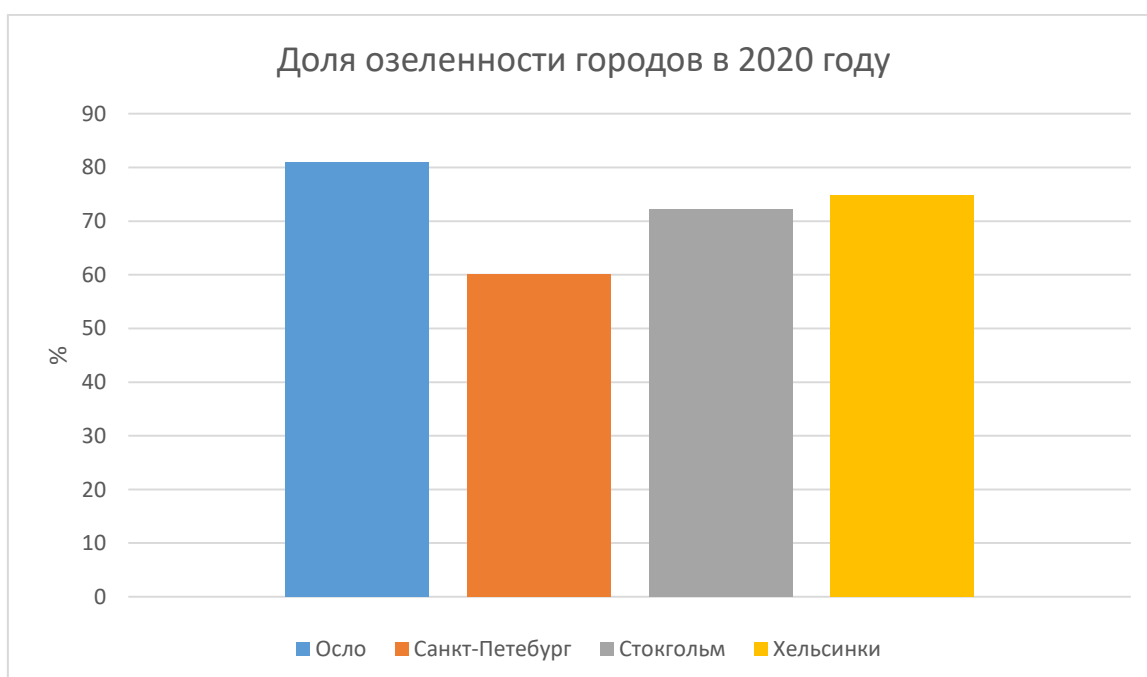


Рисунок 70. Доля озеленности городов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для эффективного управления территориями необходимо знать и понимать процесс расширения городов и агломераций. При принятии управленческих решений важно рассматривать городскую агломерацию как единое урбанизированное образование, использовать агломерационные эффекты на благо развития городов. Только в этом случае возможно эффективное развитие городских агломераций, а иначе города станут непригодными для проживания.

Данная работа была нацелена на выявлении методов и способов, которые могут быть использованы исполнительными органами власти и градостроителями для мониторинга и проведения оценок развития урбанизированных территорий.

Предложенные методы анализа расширения городов и агломераций, проведенные на примере четырех городов, отличающихся по развитию, могут быть применимы и для других крупных городов и агломераций. А полученные данные могут быть использованы для обновления генеральных и территориальных планов, а может и как самостоятельные исследования в рамках градостроительной информации.

И прежде всего, данная работа была сосредоточена на применении и анализе различных данных дистанционного зондирования. Для удобства интерпретации информации использовалась открытая географическая информационная система.

В результате выполнения научного исследования цель была достигнута, а поставленные задачи были решены.

Апробация работы - основные методы и результаты научно-исследовательской работы докладывались:

- «XVIII Большой Географический фестиваль» (Санкт-Петербург, 8 апреля 2022 г.);
- «XIX Большой Географический фестиваль» (Санкт-Петербург, 7 апреля 2023 г.);
- IV всероссийская научно-практическая конференция «ГеоКа» (Санкт-Петербург, 27 сентября 2022 г.);
- открытая международная олимпиада студентов и молодых специалистов «Petropolitan Science (Re)Search» (Санкт-Петербург, 21 апреля 2022 г.), с получение диплома призера олимпиады.



## ЛИТЕРАТУРА

### *Монографии:*

1. Белкин А.И. Городской ландшафт. – М.: Высшая школа, 1987. – 111 с.
2. Лосин Л.А., Кузнецов С.В. Санкт-Петербургская агломерация: этапы формирования и перспективы развития. – СПб.: ГУАП, 2022. – 219 с.
3. Пакина А.А., Лелькова А.К. «Зеленая инфраструктура» как фактор устойчивого развития северных городов: опыт Кировска. - М.: Экономический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 2019. – С. 87-99.
4. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М.: изд-во Техносфера, 2008. -312 с.
5. Шиманюк А.П. Дендрология. – М.: Лесная промышленность, 1967. – 334 с.
6. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. - М.: изд-во Техносфера, 2010. – 560 с.
7. Эффект масштаба. Первый глобальный рэнкинг агломераций / под ред. Х. Галяль, К. Никитин, Е. Шапочка. – PWG, 2017. – 224 с.
8. Hoeven F. D., Wandl A. Hotterdam: How space is making Rotterdam warmer, how this affects the health of its inhabitants, and what can be done about it. - Delft, 2015, 92 p.
9. Howard L. The climate of London, deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighborhood of the metropolis. - London, 1818, 2 vol.
10. Ihlen V. Landsat 8 (L8). Data Users Handbook. - USGS, 2019, 106 p.
11. Susiluoto I. Agglomeration factors in finnish urban regions. - Helsingin kaupunki, kaupunginkanslia, kaupunkitutkimus ja tilastot, 2016. - 36 p.

### *Фондовые материалы*

1. Tilastotietoja Helsingistä 2020. Helsingin kaupunki, kaupunginkanslia, kaupunkitutkimus ja –tilastot. – Helsinki, 2020 – 48 p.
2. Helsingin tilastollinen vuosikirja 2020. Helsingin kaupunki, kaupunginkanslia, kaupunkitutkimus ja –tilastot. - Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy, 2020 - 314 p.
3. Statistiskårsbok för Stockholm 2022. Stockholms stad. – Stockholm, 2021 – 379 p.

### *Статьи*

1. Кресникова Н.И., Васильевых Н.А. Применение данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий для обеспечения территориального планирования // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», 2018. Т. 62. № 2. С. 212–217.
2. Юйлинь ЧЭ. Расширение городов и порождаемые этим ограничения для производства пространства // Социологические исследования, 2017. №7. – С 107-115.

3. Furberg D., Ban Y., Nascetti A. Monitoring of Urbanization and Analysis of Environmental Impact in Stockholm with Sentinel-2A and SPOT-5 Multispectral Data // Remote sensing, 2019. №11.
4. Malik M.S., Shukla J.P., Mishra S. Relationship of LST, NDBI and NDVI using Landsat 8 data in Kandaihimmat Watershed? Hoshangabad, India // Indian Journal of Geo Marine Sciences, 2019. – Vol. 48 (01).
5. Mills G. Luke Howard and the Climate of London // Weather, 2008. – Vol. 63, 153-157 p.
6. Schweitzer F. A growing urban problem // Nature, 2006. - Vol. 441.
7. Spivey A. LIGHT POLLUTION: Light at Night and Breast Cancer Risk Worldwide // Environ Health Perspect, 2010. - Vol. 118.

#### *Электронные ресурсы*

1. Генеральный план Санкт-Петербург: [электронный ресурс]. URL: <https://kgainfo.spb.ru/zakon/generalplan/> (дата обращения 21.01.2023).
2. Информация о функциональных зонах: [электронный ресурс]. URL: <https://www.mos.ru/mka/function/dlia-spetcialistov/terminy-i-opredeleniia/> (дата обращения 27.01.2023).
3. 10-й форум городов в Абу-Даби, ОАЭ: [электронный ресурс]. URL: [http://unhabitat.ru/events/2020/desyataya-sessiya-vsemirnogo-foruma-gorodov-\(vfg-10\)](http://unhabitat.ru/events/2020/desyataya-sessiya-vsemirnogo-foruma-gorodov-(vfg-10)) (дата обращения 01.02.2023).
4. 11-й форум городов в польском Катовице в 2022г.: [электронный ресурс]. URL: <https://wuf11.katowice.eu> (дата обращения 27.01.2023).
5. Международный банк реконструкции и развития: [электронный ресурс]. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS> (дата обращения 22.02.2023).
6. Международная ассоциация ночного неба: [электронный ресурс]. URL: <https://www.darksky.org/light-pollution/> (дата обращения 20.04.2023).
7. ВОЗ об улучшении жизни в городах в будущем: [электронный ресурс]. URL: <https://unhabitat.org/wcr/> (дата обращения 10.03.2023).
8. Рост светового загрязнения быстрее, чем ожидалось по прогнозам: [электронный ресурс]. URL: [https://www.lemonde.fr/en/science/article/2023/01/22/light-pollution-in-the-sky-is-increasing-faster-than-expected\\_6012623\\_10.html](https://www.lemonde.fr/en/science/article/2023/01/22/light-pollution-in-the-sky-is-increasing-faster-than-expected_6012623_10.html) (дата обращения 23.04.2023).
9. Городские острова тепла: [электронный ресурс]. URL: <https://www.epa.gov/heatislands/learn-about-heat-islands> (дата обращения 21.03.2023).

10. Городские острова тепла на ресурсе Королевского метеорологического общества: [электронный ресурс]. URL: <https://www.metlink.org/fieldwork-resource/urban-heat-island-introduction/> (дата обращения 23.04.2023).
11. История города Хельсинки: [электронный ресурс]. URL: <https://www.myhelsinki.fi/fi/info/helsingin-historia/kuoressa> (дата обращения 15.03.2023).
12. История развития Санкт-Петербурга: [электронный ресурс]. URL: <http://urbanica.spb.ru/> (дата обращения 30.03.2023).
13. История Санкт-Петербурга: [электронный ресурс]. URL: <http://www.visit-petersburg.ru/ru/> (дата обращения 30.03.2023).
14. Агломерация Осло: [электронный ресурс]. URL: <https://snl.no/Stor-Oslo> (дата обращения 28.03.2023).
15. История Осло: [электронный ресурс]. <https://www.oslo.com/v/history> (дата обращения 28.03.2023).
16. Osloomap, старые карты на Осло: [электронный ресурс]. <https://ru.osloomap360.com> (дата обращения 28.03.2023).
17. Информация о Осло: [электронный ресурс]. URL: <https://www.oslo.kommune.no/natur-kultur-og-fritid/urbant-landbruk/> (дата обращения 28.03.2023).
18. Развитие региона Стокгольма: [электронный ресурс]. URL: <https://start.stockholm/other-languages/the-city-of-stockholm/> (дата обращения 26.03.2023).
19. История развития Стокгольма и региона: [электронный ресурс]. URL: <https://visitsweden.com/where-to-go/middlesweden/stockholm/> (дата обращения 27.03.2023).
20. Зеленые зоны Стокгольма: [электронный ресурс]. URL: <http://www.stockholm.se/KulturFritid/Park-och-natur/Lekparker-och-parklekar/> (дата обращения 31.03.2023).
21. Столицы Российской империи: [электронный ресурс]. URL: <https://histrf.ru/read/articles/skolko-bylo-stolits-u-rossii> (дата обращения 02.04.2023).
22. Геологическая служба США: [электронный ресурс]. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions> (дата обращения 24.02.2023).
23. Интерфейс Glovis: [электронный ресурс]. URL: <https://glovis.usgs.gov/> (дата обращения 24.02.2023).

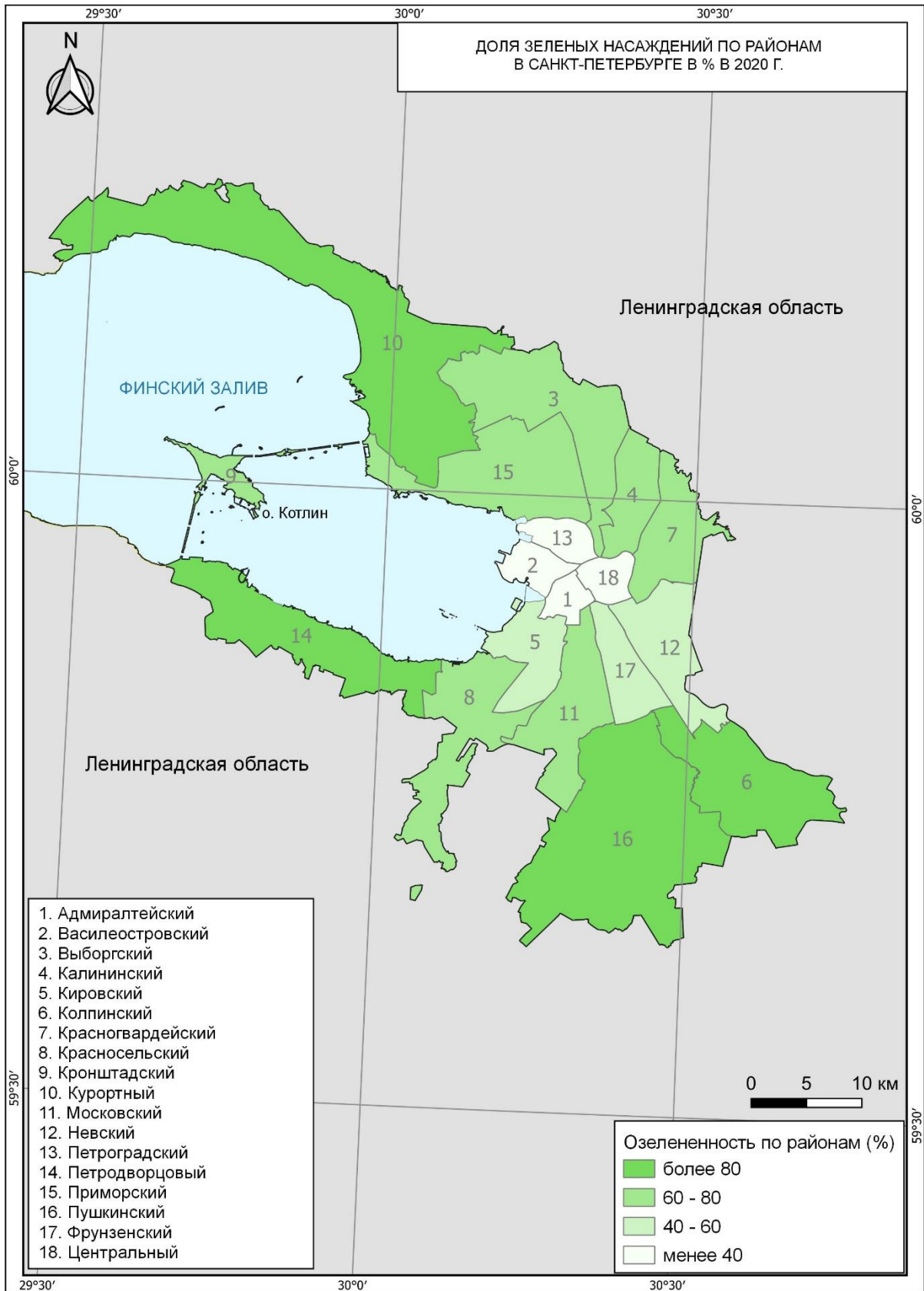
24. Спутник Landsat 5: [электронный ресурс]. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5> (дата обращения 20.02.2023).
25. Copernicus: [электронный ресурс]. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/satellite-description> (дата обращения 25.02.2023).
26. Платформа GHSL: [электронный ресурс]. URL: <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/about.php> (дата обращения 13.03.2023).
27. Слои для города Санкт-Петербург: [электронный ресурс]. URL: <https://data.nextgis.com/ru/region/RU-SPE/base> (дата обращения 06.01.2023).
28. Слои для города Хельсинки: [электронный ресурс]. URL: [https://hri.fi/data/en\\_GB/dataset?vocab\\_geographical\\_coverage=Helsinki](https://hri.fi/data/en_GB/dataset?vocab_geographical_coverage=Helsinki) (дата обращения 06.01.2023).
29. Слои для города Стокгольма: [электронный ресурс]. URL: <https://dataportalen.stockholm.se/dataportalen/> (дата обращения 07.01.2023).
30. Слои для города Осло: [электронный ресурс]. URL: <https://kartkatalog.geonorge.no/?theme=Planning> (дата обращения 07.01.2023).
31. Спутники DMSP и Suomi NPP: [электронный ресурс]. URL: <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/> (дата обращения 07.03.2023).
32. Итоги комитета по строительству в Санкт-Петербурге: [электронный ресурс]. URL: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/komstroy/statistic/development/> (дата обращения 30.04.2023).
33. Строительство в Курортном районе города: [электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4946012> (дата обращения 01.05.2023).
34. Ленсвет о светодиодных лампах: [Электронный ресурс]. URL: <https://asninfo.ru/interviews/227-mikhail-kuritsyn-svetodiodnyye-svetilniki-eto-ne-ranatseya> (дата обращения 19.02.2023).
35. Редевелопмент территорий в Калининском районе Санкт-Петербурга: [Электронный ресурс]. URL: [https://www.novostroy-spb.ru/statyi/krasnyy\\_vyborjets\\_kak\\_bfadevelopment](https://www.novostroy-spb.ru/statyi/krasnyy_vyborjets_kak_bfadevelopment) (дата обращения 02.05.2023).
36. «Газпром арена»: [Электронный ресурс]. URL: <https://zenit-spb.com/hall> (дата обращения 02.05.2023).
37. Restate-динамика цен на жилье в новостройках: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.restate.ru/graph/> (дата обращения 05.05.2023).
38. Пригородное сообщение в Санкт-Петербурге: [Электронный ресурс]. URL: <https://ppk-piter.ru/> (дата обращения 05.05.2023).

39. Загородная недвижимость в Ленинградской области: [Электронный ресурс]. URL: [https://www.bsn.ru/articles/liveestate/3794\\_lomonosovskiy\\_rayon\\_scenariy\\_razvitiya](https://www.bsn.ru/articles/liveestate/3794_lomonosovskiy_rayon_scenariy_razvitiya) (дата обращения 05.05.2023).
40. Застройка аэродрома Малми: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/kentalle-avattiin-luistelurata-kiiivasta-vastustusta-herattanyt-malmin-lentokenttaalueen-rakentaminen-on-alkamassa-helsingissa/8346138> (дата обращения 09.05.2023).
41. Замена натриевых ламп на светодиодные в Хельсинки: [Электронный ресурс]. URL: <https://yle.fi/a/3-6868610> (дата обращения 09.05.2023).
42. Строительство метро в Хельсинки: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hsl.fi/> (дата обращения 10.05.2023).
43. Asuntojen hinnat-динамика цен на жилье в новостройках: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.asuntojenhinnat.fi/myytyjen-asuntojen-tilastot/kunta/helsinki> (дата обращения 10.05.2023).
44. Пригородное сообщение в Хельсинки: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vr.fi/> (дата обращения 10.05.2023).
45. Развитие Киркконумми: [Электронный ресурс]. URL: <https://kirkkonummen-keskustankehittaminen-lokika.hub.arcgis.com/> (дата обращения 11.05.2023).
46. Развитие Эспоо: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.espo.fi/fi/kestava-kehitys> (дата обращения 11.05.2023).
47. Сокращение зеленых зон Стокгольма: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kth.se/om/nyheter/centrala-nyheter/stockholm-vaxer-gronomradena-krymper-1.906139> (дата обращения 13.05.2023).
48. Умное освещение в Стокгольме: [Электронный ресурс]. URL: <https://smartstad.stockholm/uppdrag-och-mal/> (дата обращения 13.05.2023).
49. Метро Стокгольма: [Электронный ресурс]. URL: <https://tunnelbanakarta.se/stockholm-metro-map/> (дата обращения 13.05.2023).
50. Maklarstatistik-статистика цен на жилье в Швеции по муниципалитетам: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.maklarstatistik.se/> (дата обращения 13.05.2023).
51. Шведские железные дороги: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sj.se/en> (дата обращения 13.05.2023).
52. Развитие муниципалитета Нюкварн: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.foretagarna.se/contentassets/1ca93fb4c4e446cb9ceb27b9e474abec/nykvarn.pdf> (дата обращения 12.05.2023).

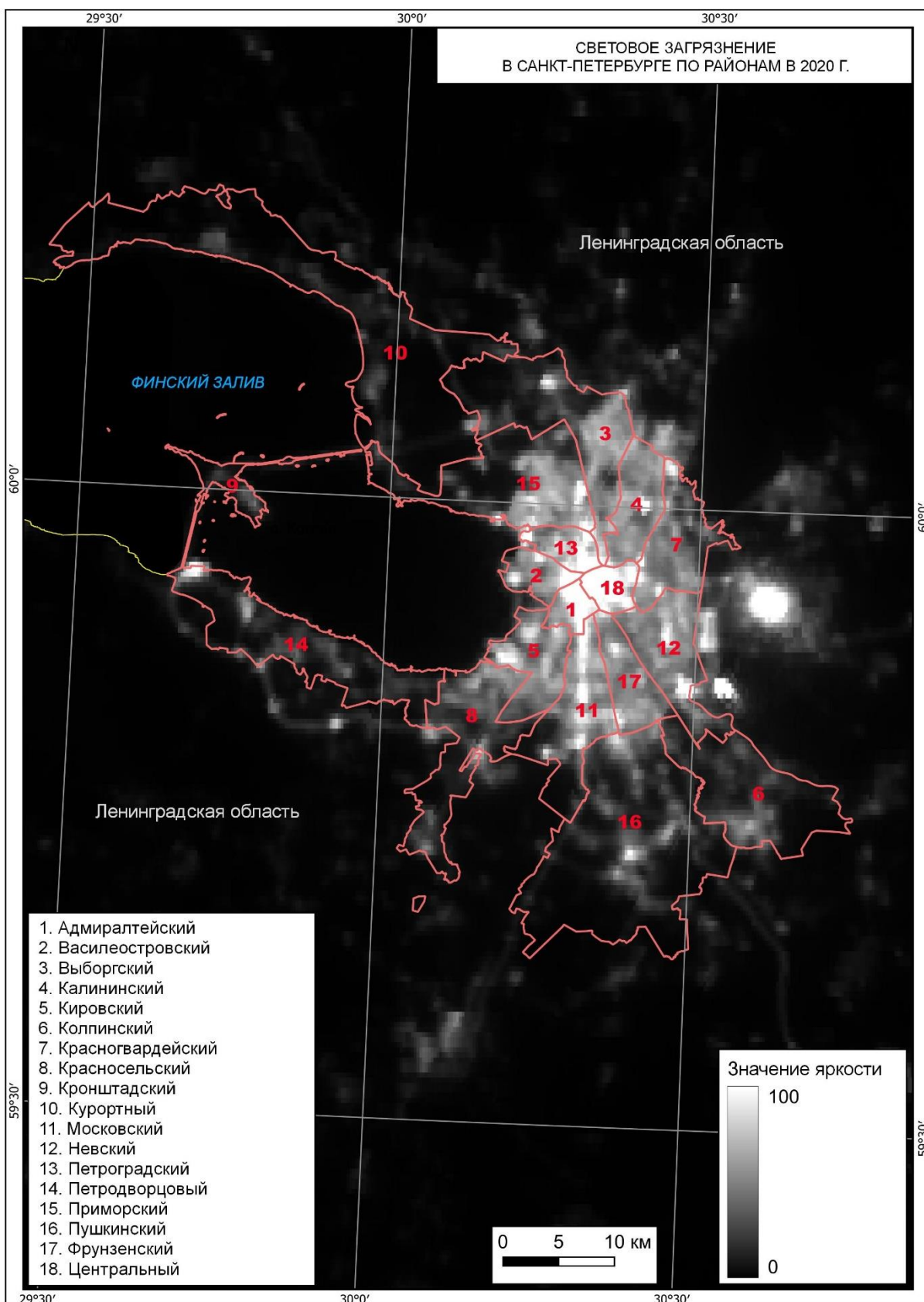
53. Строительство в Осло: [Электронный ресурс]. URL: <https://osu.no/bjorvika> (дата обращения 14.05.2023).
54. Статистика численности населения агломерации Большой Осло: [Электронный ресурс]. URL: Statistisk sentralbyrå, Folkemengd 1. januar 2011 og endringane i 2010. Endelege tal (дата обращения 15.05.2023).
55. Smartepenger-стоимость жилья в муниципалитетах Норвегии: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.smartepenger.no/boligokonomi/3113-kvadratmeterpriser-pa-boliger-i-kommunene> (дата обращения 15.05.2023).
56. Железные дороги Норвегии: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vy.no/en> (дата обращения 15.05.2023).



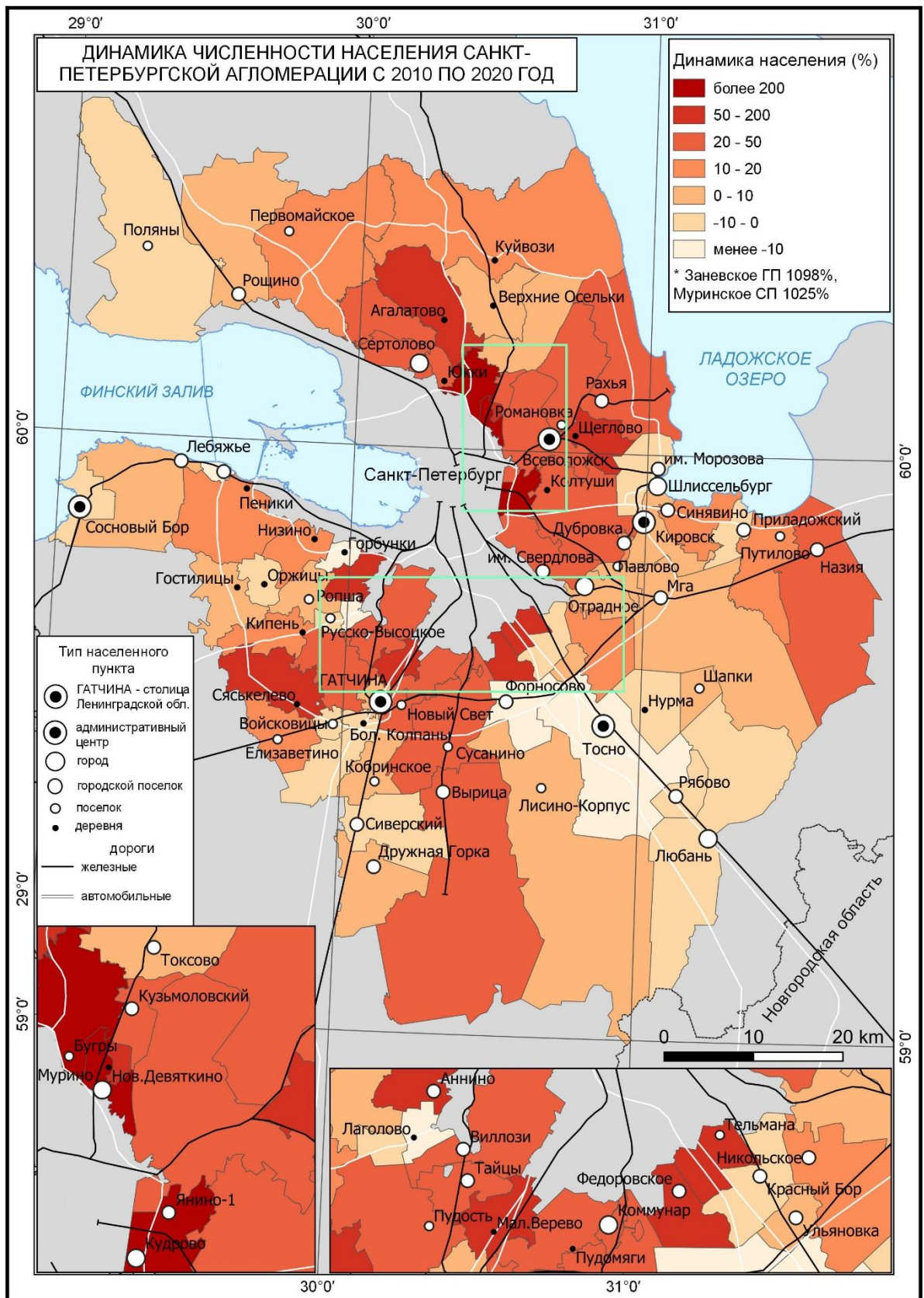
## ПРИЛОЖЕНИЯ



Приложение 1. Доля зеленых насаждений в Санкт-Петербурге в 2020 г.

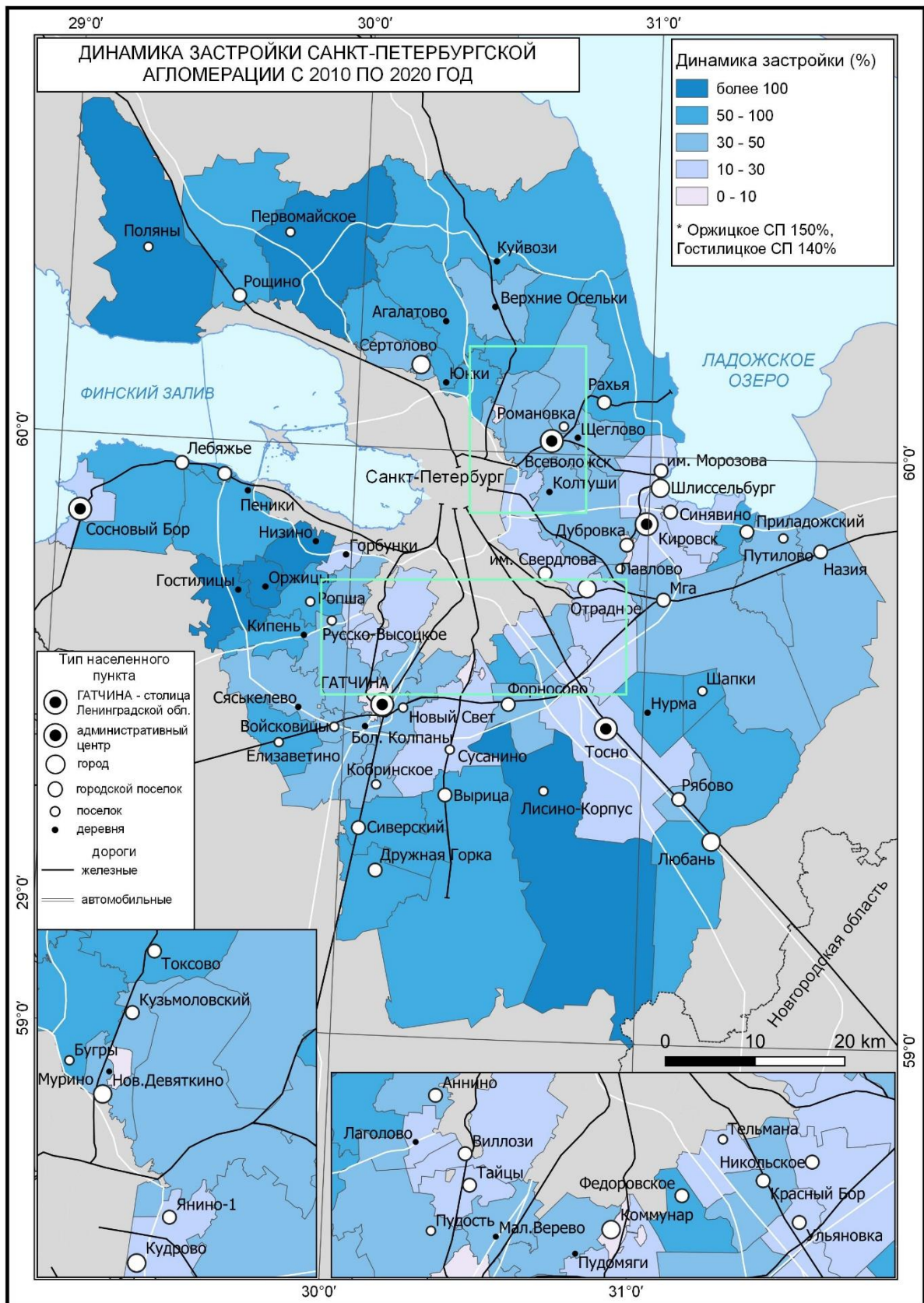


Приложение 2. Световое загрязнение в Санкт-Петербурге в 2020 г.

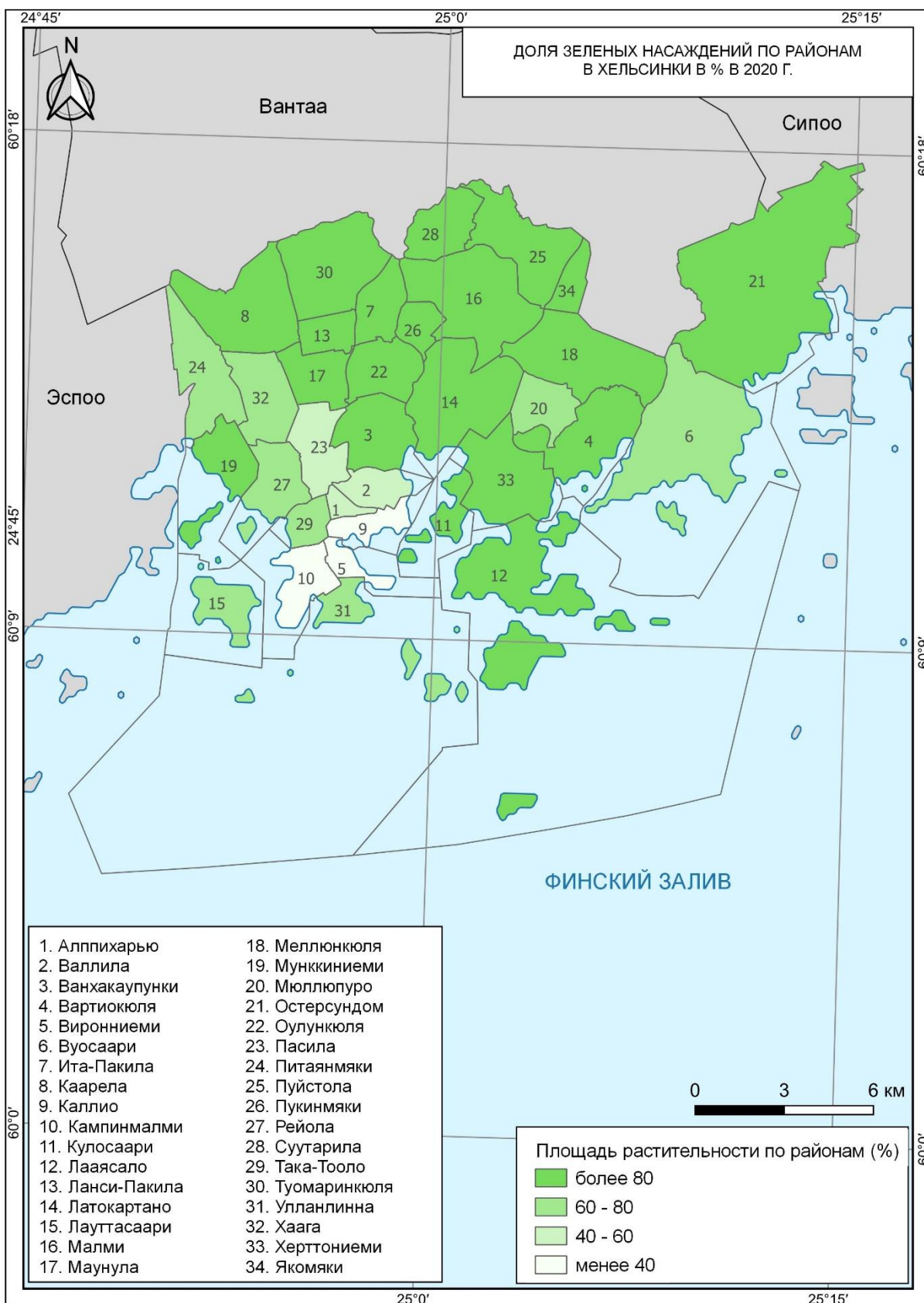


Приложение 3. Динамика населения Санкт-Петербургской агломерации с 2010 по 2020 год

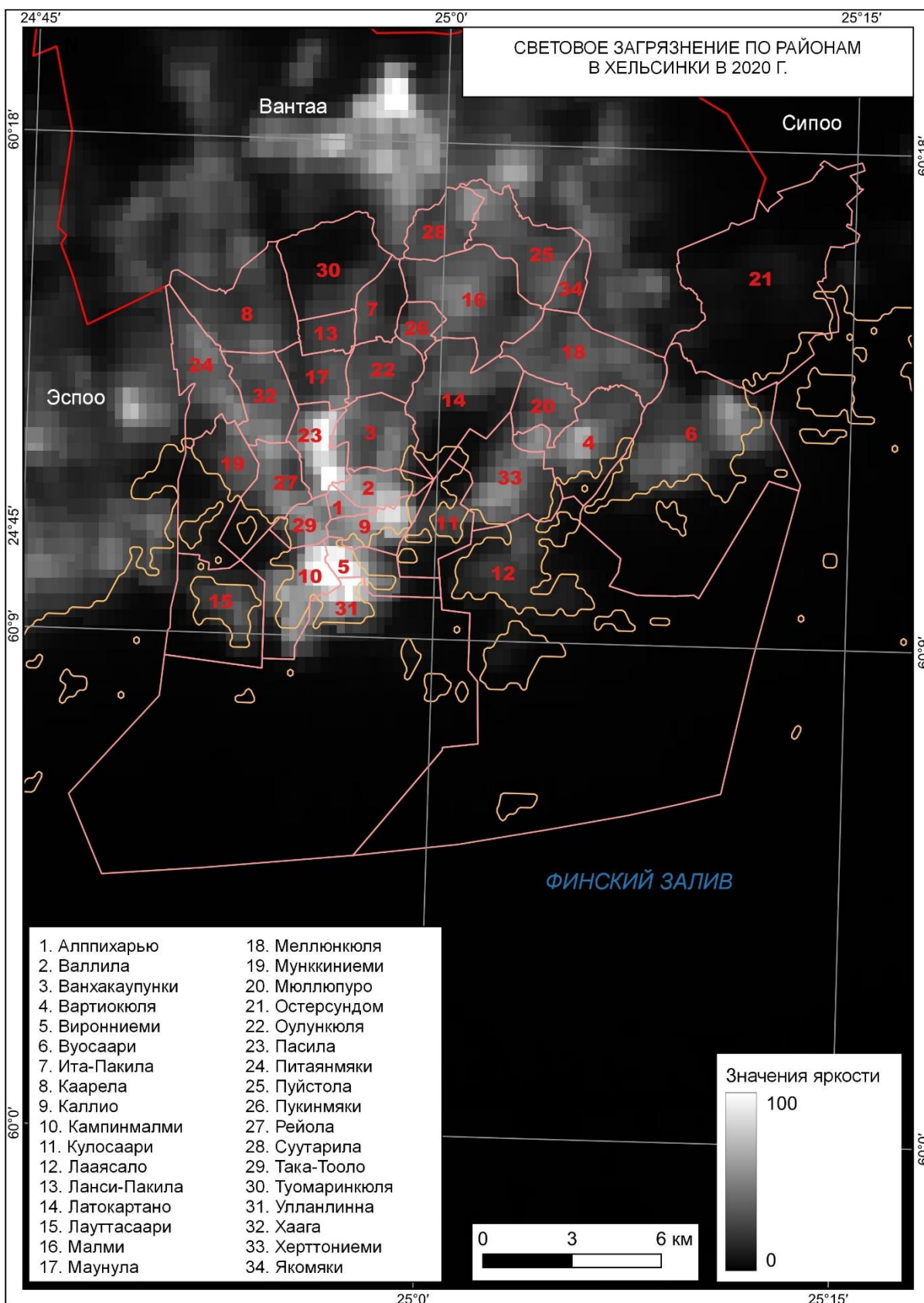




Приложение 4. Динамика застройки Санкт-Петербургской агломерации с 2010 по 2020 год

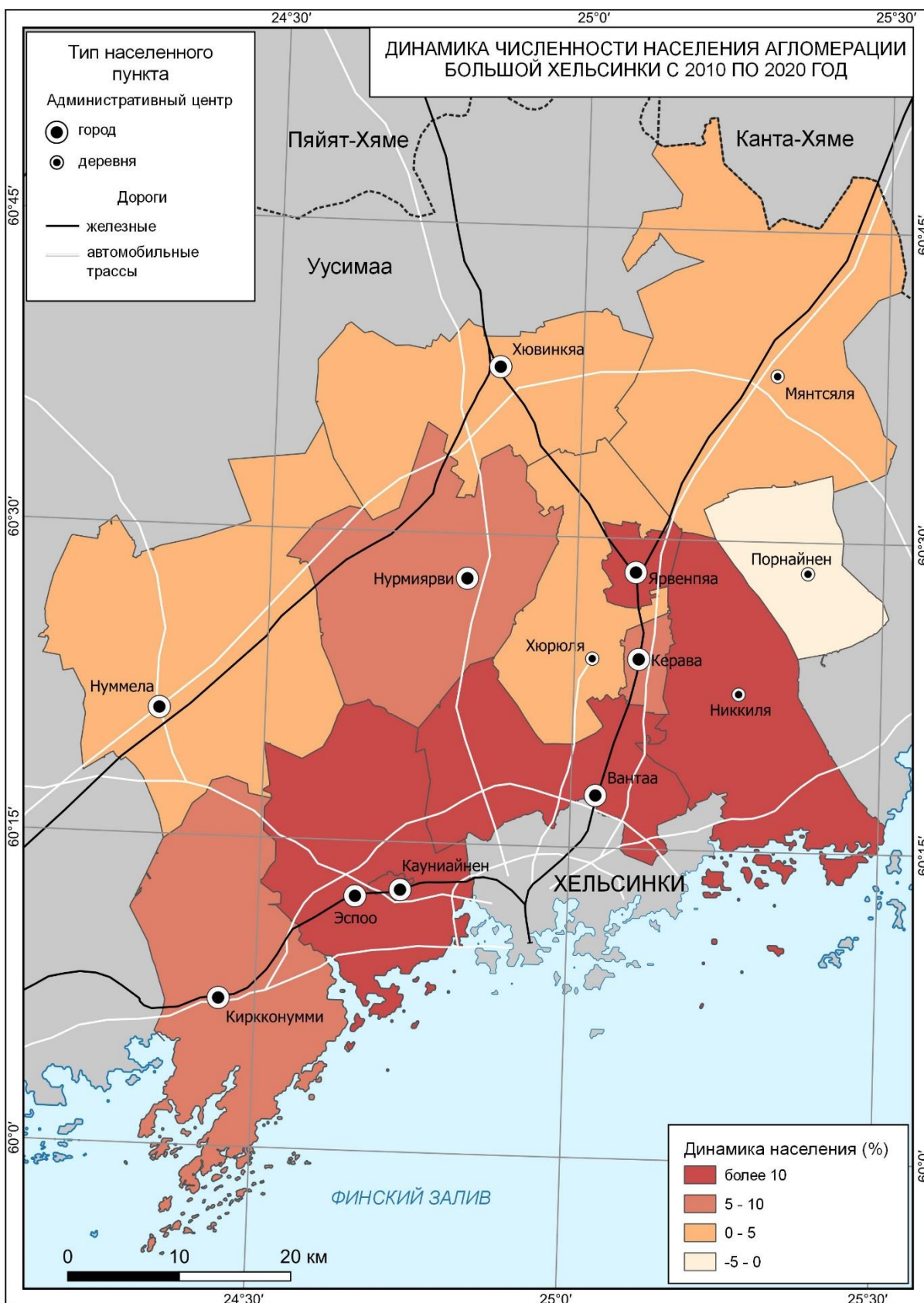


Приложение 5. Доля зеленых насаждений в Хельсинки в 2020 г.

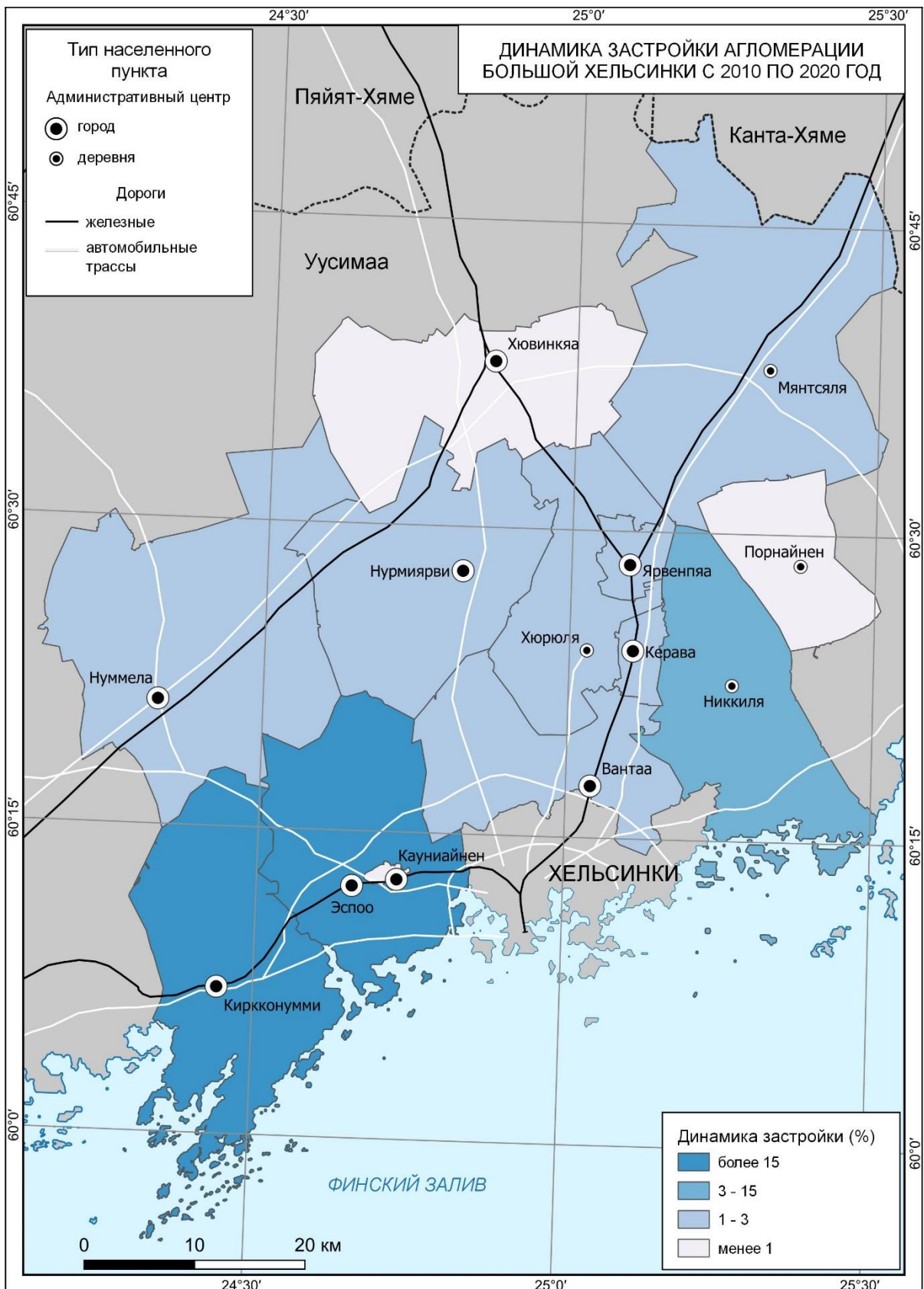


Приложение 6. Световое загрязнение в Хельсинки в 2020 г.

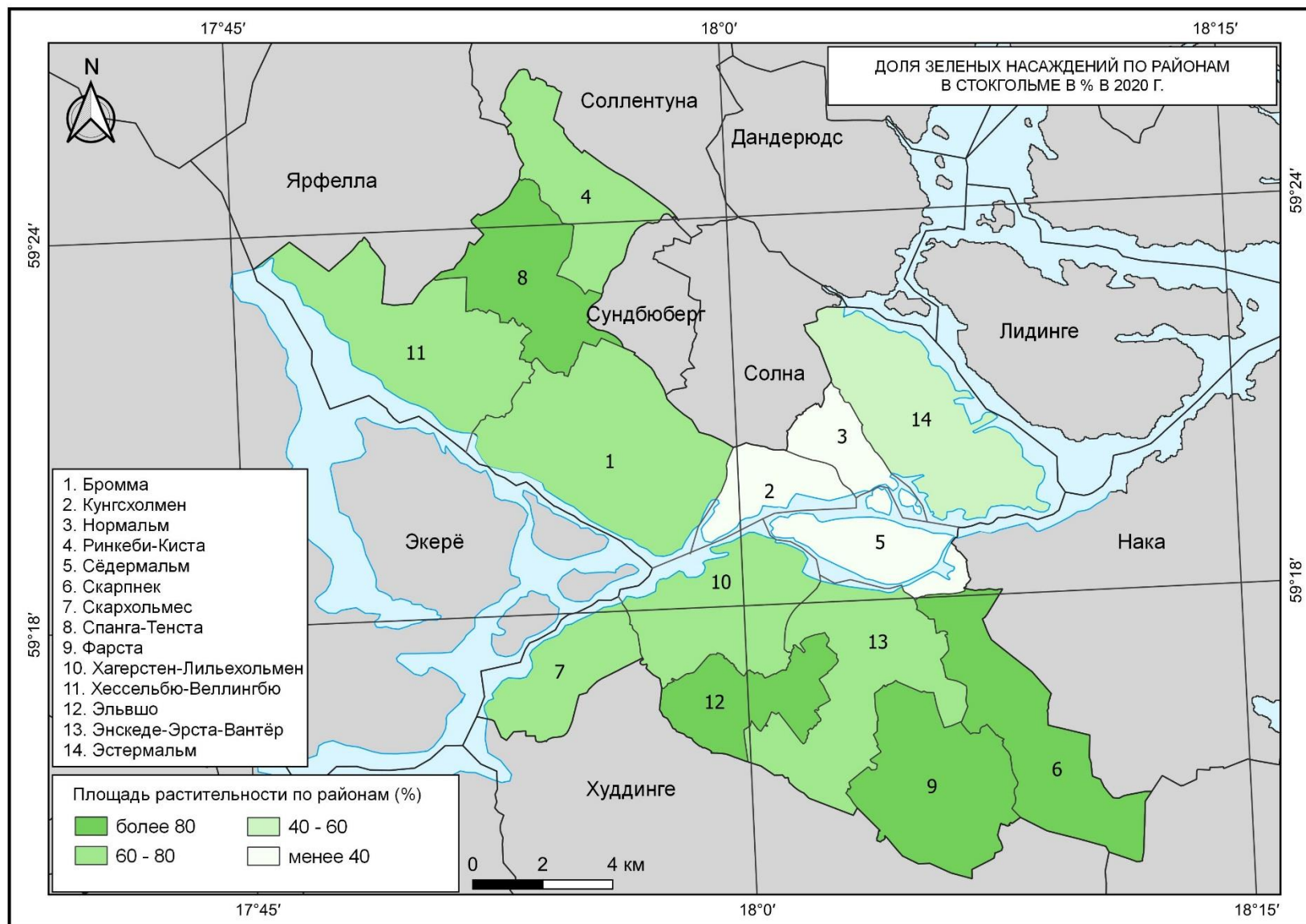




Приложение 7. Динамика населения агломерации Большой Хельсинки с 2010 по 2020 год

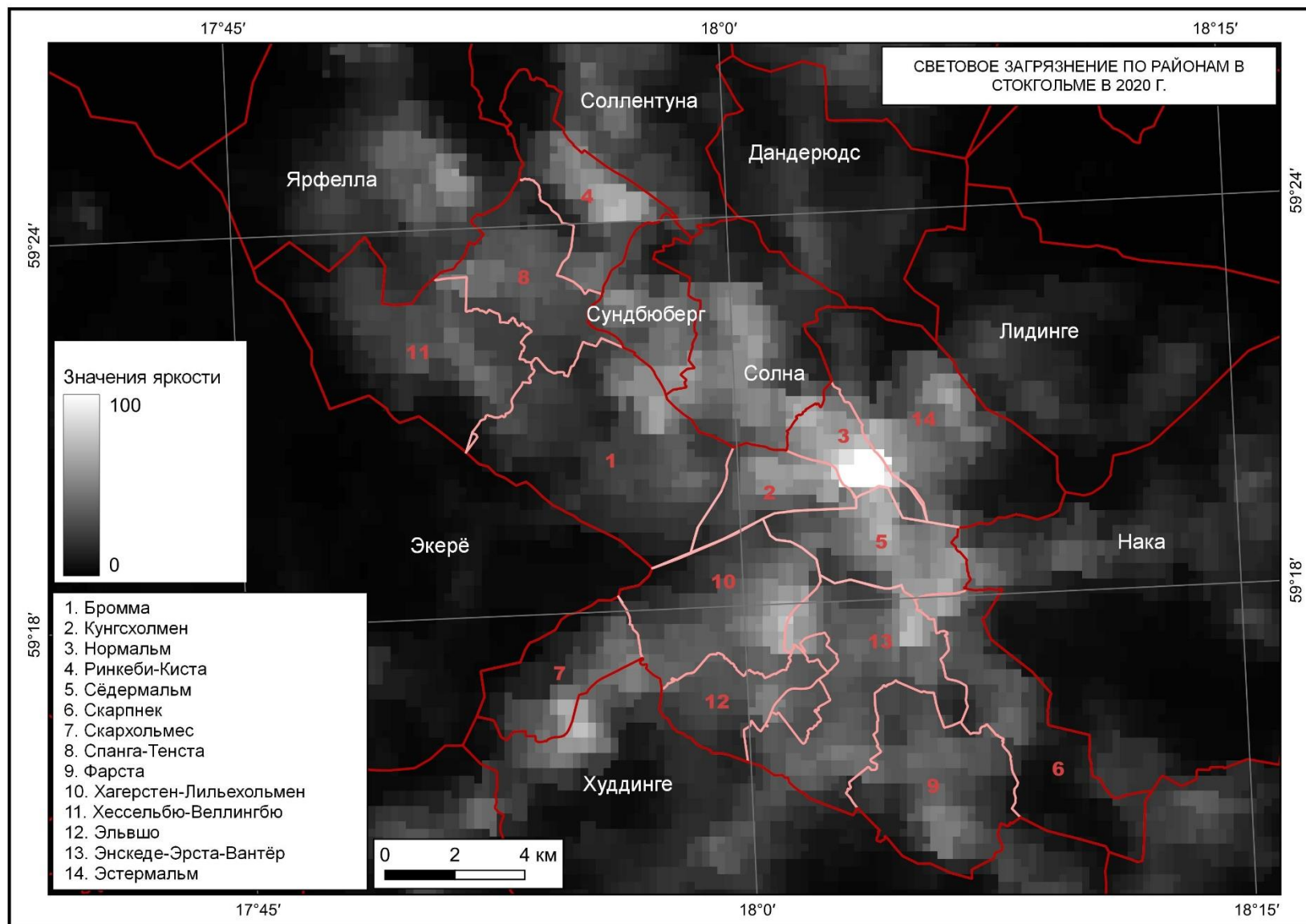


Приложение 8. Динамика застройки агломерации Большой Хельсинки с 2010 по 2020 год

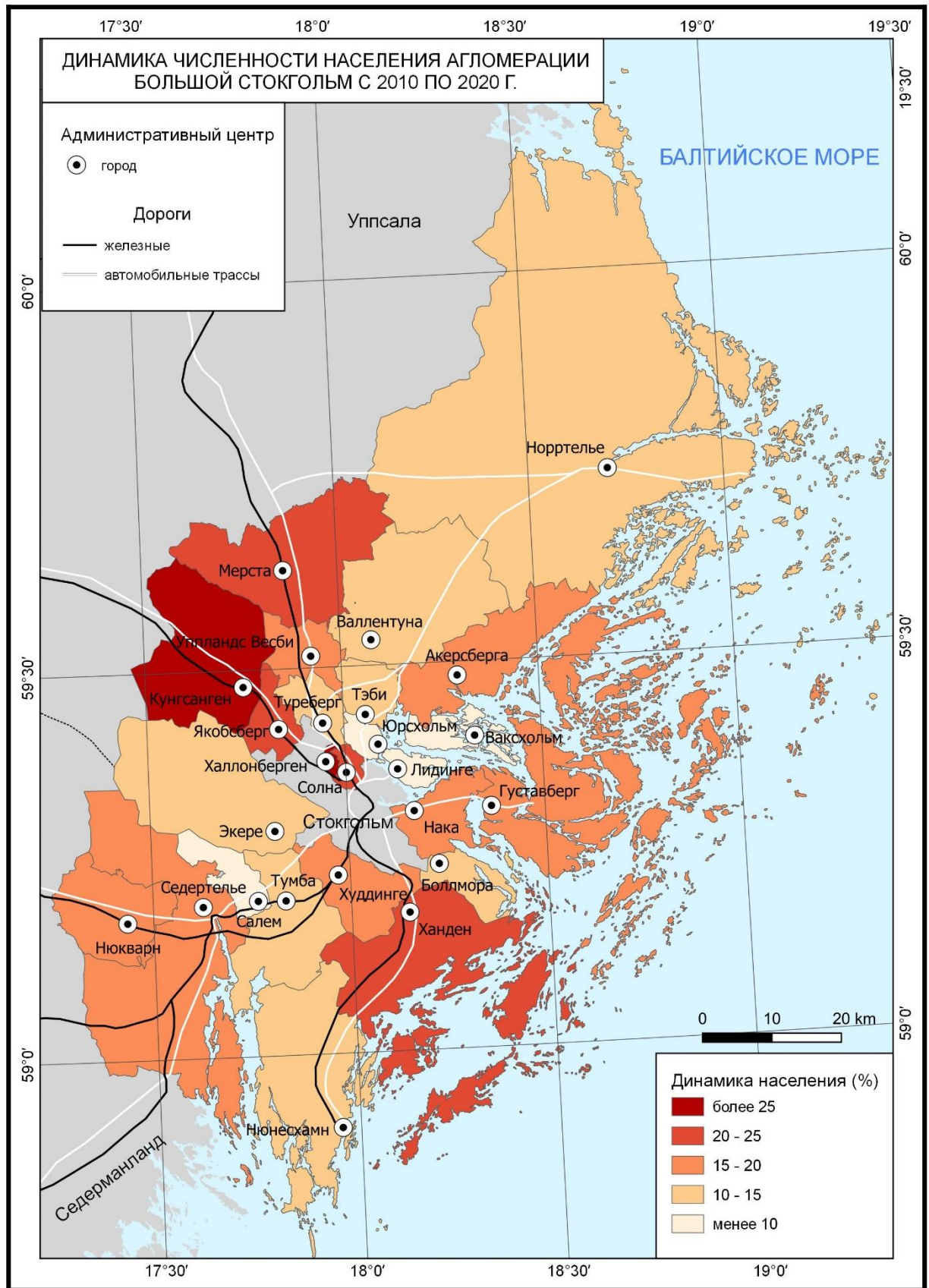


Приложение 9. Доля зеленых насаждений в Стокгольме в 2020 г.

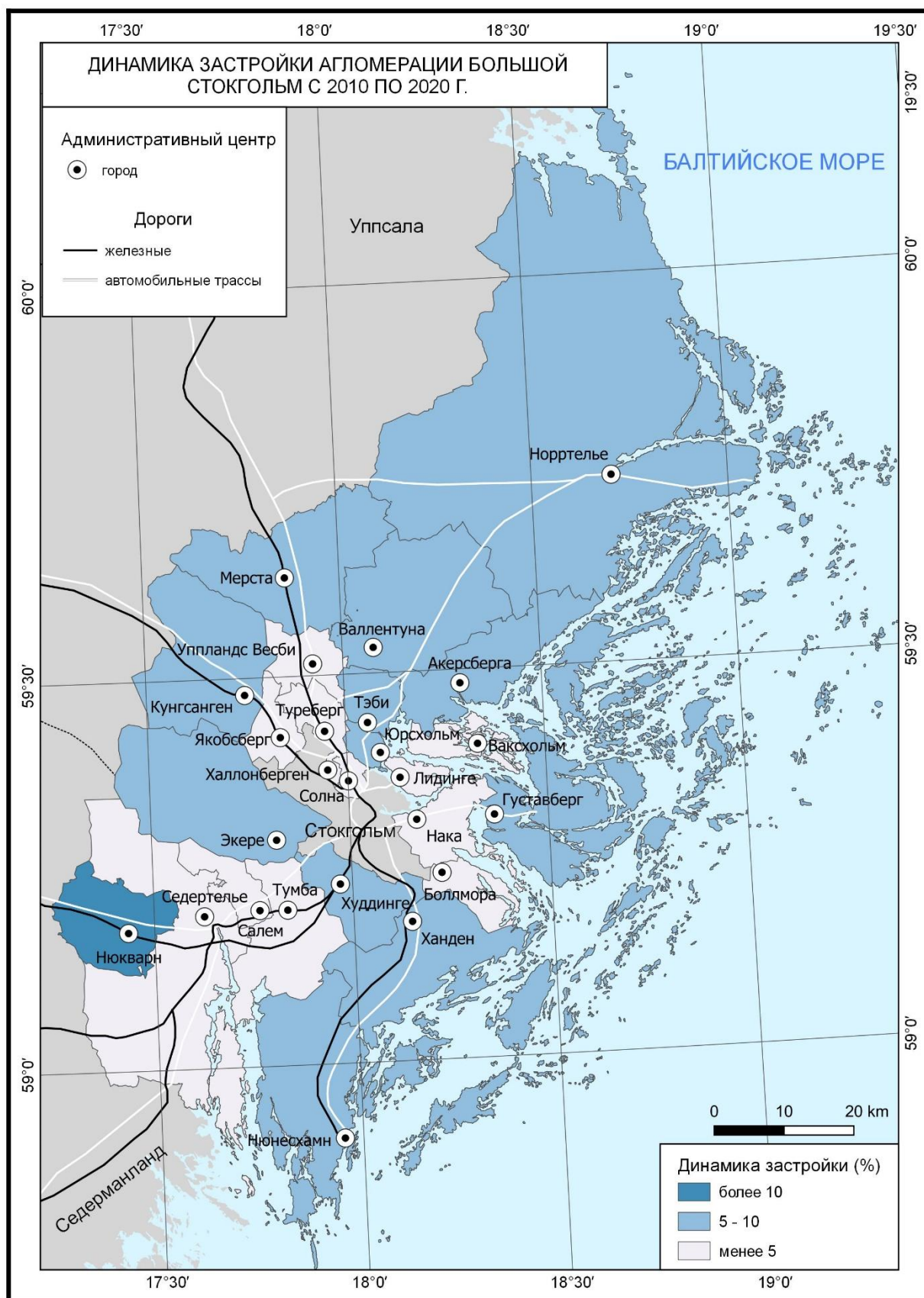




Приложение 10. Световое загрязнение в Стокгольме в 2020 г.

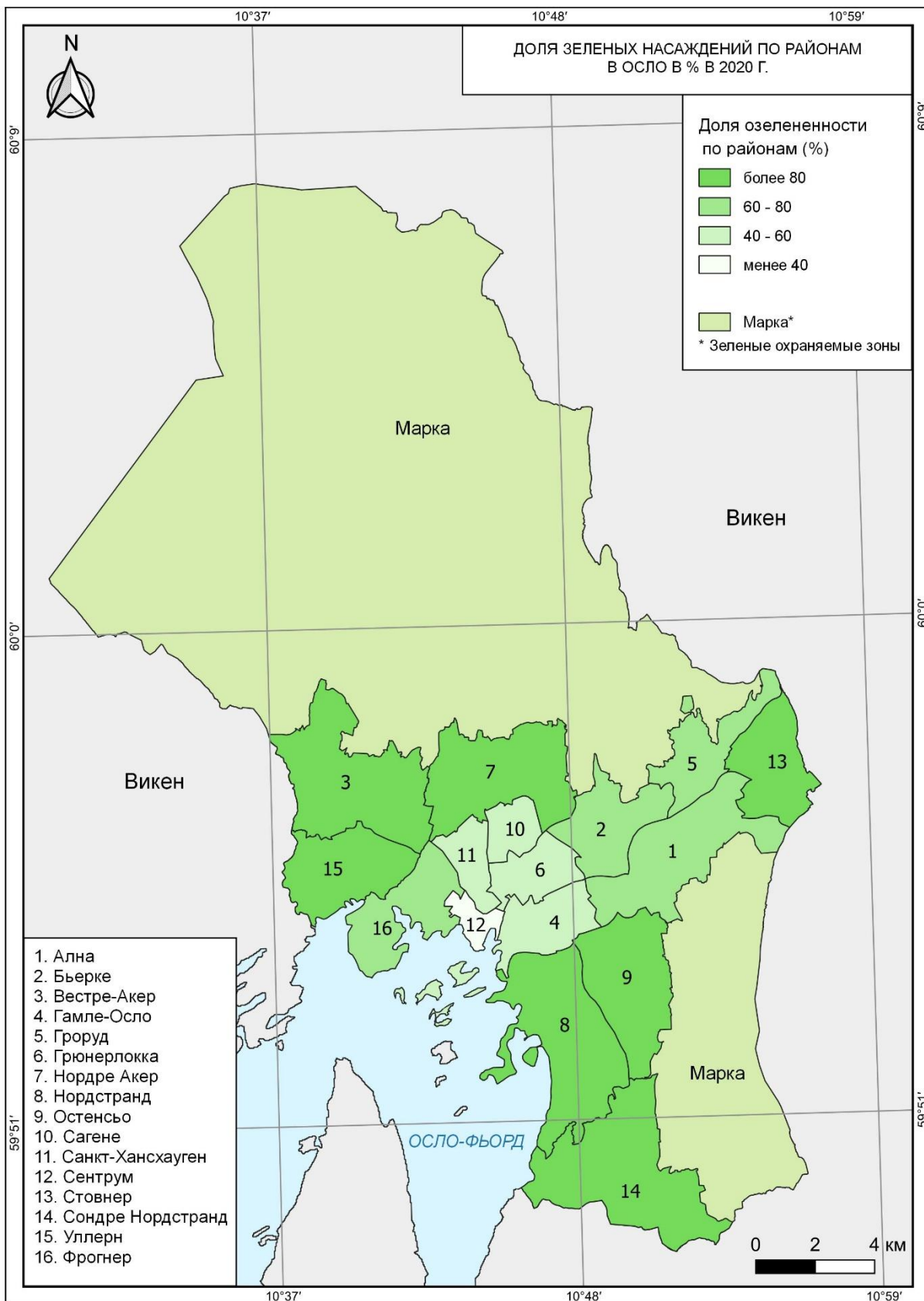


Приложение 11. Динамика населения агломерации Большой Стокгольм с 2010 по 2020 год



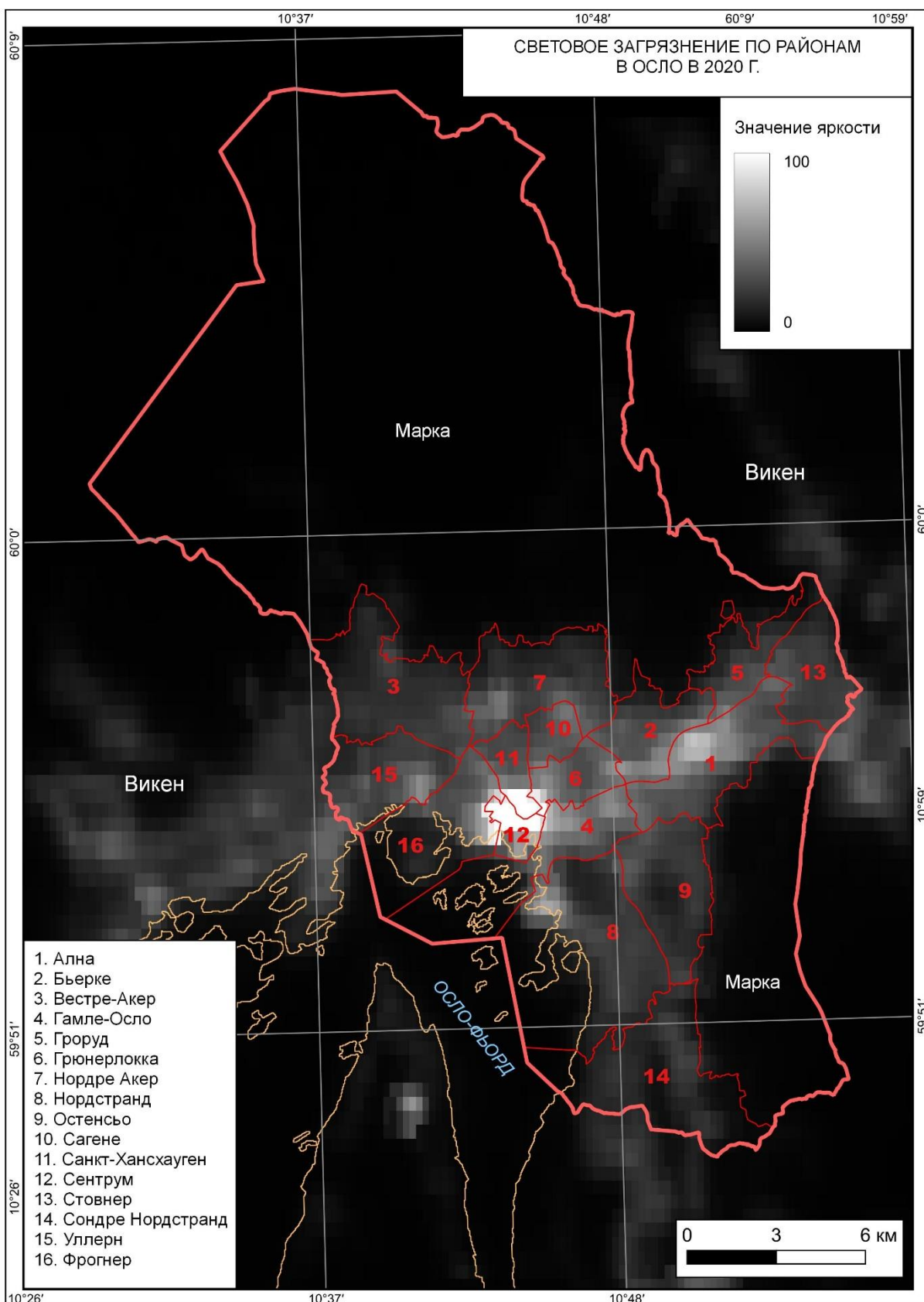
Приложение 12. Динамика застройки агломерации Большой Стокгольм с 2010 по 2020 год



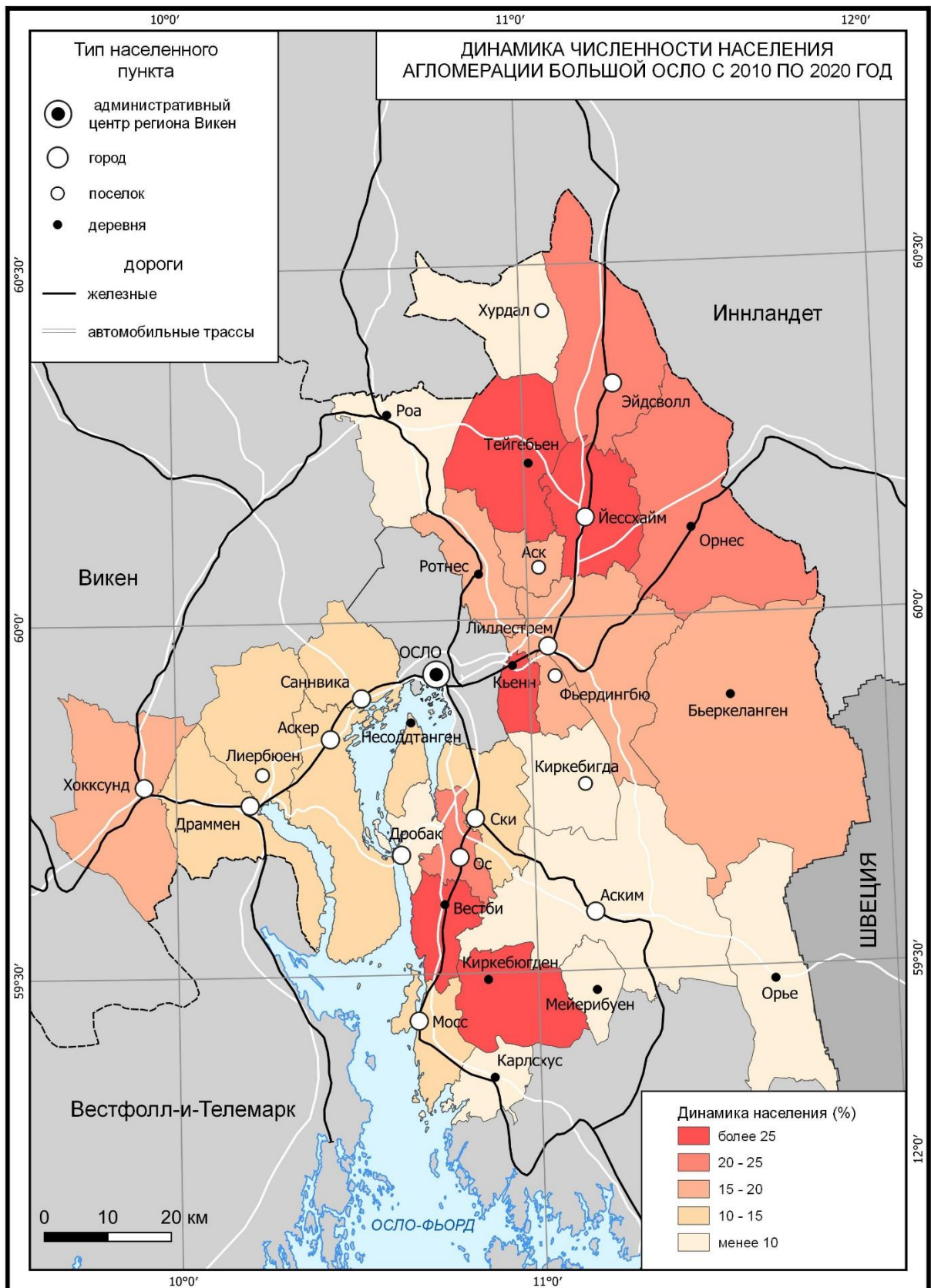


Приложение 13. Доля зеленых насаждений в Осло в 2020 г.

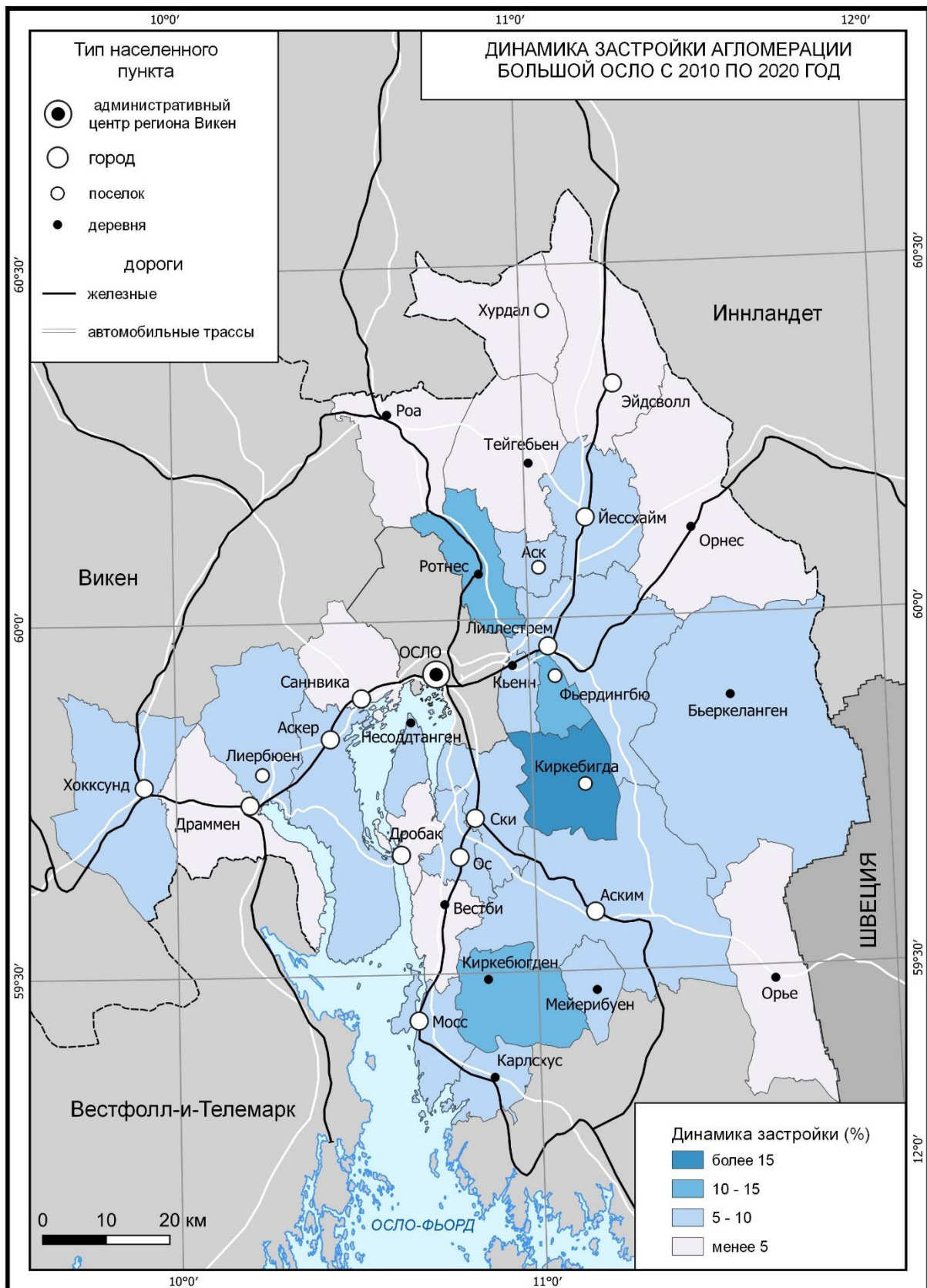




Приложение 14. Световое загрязнение в Осло в 2020 г.



Приложение 15. Динамика населения агломерации Большой Осло с 2010 по 2020 год



Приложение 16. Динамика застройки агломерации Большой Осло с 2010 по 2020 год