

*Cyperaceae* (79) и некоторые другие. За счет адвентивных видов на лидирующие места выходят семейства (*Fabaceae*, *Rosaceae* и др.), характерные для флор более южных территорий. Бореальные семейства, свойственные естественным флорам умеренного пояса Голарктики (например, *Cyperaceae*), наоборот, смещаются к хвосту спектра. В результате антропогенной трансформации современная природная флора Припятского Полесья относится к *Rosaceae*-типу и *Cyperaceae*-подтипу, что говорит о приобретении флорой и растительным покровом Припятского Полесья характерных черт, свойственных более южным фитохорионам.

Важным показателем, позволяющим охарактеризовать процессы, происходящие во флоре в результате антропогенных воздействий, является коэффициент оборота видов, предложенный Дж. Эбботтом и Р. Блэком [1]. В нем отражаются процессы, связанные с исчезновением и появлением как аборигенных, так и адвентивных таксонов в различные периоды развития флоры Припятского Полесья на протяжении минувшего столетия (табл. 2.14).

Таблица 2.14 – Динамика коэффициента оборота видов на протяжении последнего столетия

Фракция флоры	Сравниваемый период	Период развития флоры		
		середина 1950-х	середина 1980-х	начало XXI века
Природная	В отношении начала XX века	0,12	0,23	0,42
	В отношении предыдущего этапа	-	0,13	0,21

Анализ представленных в таблице данных показывает, что природная флора отличается высокой динамичностью. Только за последние полвека коэффициент оборота видов вырос более чем в 3 раза (с 0,12 до 0,42), что свидетельствует о сильном антропогенном воздействии на природные ландшафты и является следствием широкомасштабной осушительной мелиорации с последующим сельскохозяйственным освоением земель, развитием промышленности, транспортной освоенности территории и другими формами антропогенного воздействия.

Таким образом, в результате антропогенной трансформации флоры происходит не только исчезновение уязвимых аборигенных видов и ее насыщение заносными растениями, но и более глубокие преобразования естественной фитосреды, вызванные широким распространением адвентивных таксонов, способных к натурализации.

В целом современные тенденции динамики растительного покрова и флоры центральной части Белорусского Полесья под воздействием антропогенных факторов сходны с таковыми, установленными для других регионов Полесья, например его восточной части [243]. Они наметились еще в конце 1980-х – начале 1990-х годов, когда были завершены широкомасштабные мелиоративные работы. В совокупности эти факторы оказали негативное воздействие на численность и распространение некоторых представителей аборигенной флоры, а также создали благоприятные условия для заноса и более широкого распространения новых адвентивных видов.

#### 2.4. Тепловое загрязнение урбанизированных территорий (на примере города Бреста)

Начиная с постиндустриальной эпохи, во всем мире происходит стремительный рост урбанизации. Естественные ландшафты и экосистемы превращаются в освоенные человеком, застроенные территории, объектами которых являются искусственно созданные элементы: здания, сооружения, дороги, паркинги и т. д. Как правило, такие объекты являются аккумуляторами тепла, имеют малую отражательную способность.

Воздействие урбанизации имеет как локальные, так и глобальные эффекты для окружающей среды. На современные города тратится около 60 % общего водопотребления, 70 % энергии различных видов, 80 % древесины, используемой для промышленных целей. Как следствие, на долю городов приходится большая часть выбросов парниковых газов – около 80 % [10].

За последние 50 лет глобальная урбанизация не только ускорила темпы роста городского населения, но и приняла новые формы развития. Эти изменения внесли большой вклад в освоение экосистем, ландшафтов, а также биосферы, что ускорило наступление так называемой эпохи антропоцена.

Увеличение доли городского населения вызывает потребности в повышении качества жизни и создании комфортной и экологически безопасной городской среды [15]. Комфортность проживания во многом зависит от температурного режима. Как известно, в теплое время года в городской среде присутствует такой феномен, как «городской остров тепла», характеризующийся повышенными температурными показателями в центральной части города в сравнении с эквивалентной территорией в ближайшей сельской местности. Во многом это является следствием трансформации типа и свойств подстилающей поверхности в городской среде. Искусственные поверхности, такие как асфальт, стек-

ло, металл, бетон и керамика, интенсивно вытесняют естественные зеленые зоны, но, к сожалению, не обладают достаточными транспирирующими характеристиками и имеют низкий коэффициент испаряемости, таким образом влияя на энергетический баланс в городской застройке [13].

Эффект «городского острова тепла» впервые был описан в исследовании Люка Ховарда в 1820 г., который отметил разницу температур между городом и сельской местностью, особенно в ночное время [9].

Дисбаланс температуры в теплое время года приводит к таким негативным явлениям, как:

- снижение уровня человеческого комфорта;
- угроза здоровью;
- ухудшение качества воздуха и воды;
- повышенный расход энергии на охлаждение и кондиционирование.

Однако изменения тепловой нагрузки в городской среде можно контролировать качественно и количественно при помощи инновационных технологий, таких как дистанционное зондирование территории. Агентство NASA предоставляет в открытом доступе снимки территорий, полученные при помощи спутников, для детальной оценки ландшафтов, включая урбанизированные территории. Снимки дают представление об объемах, занятых растительным покровом, соотношении урбанизированных и естественных ландшафтов, границах акваторий, а также помогают получить данные о температурах земной поверхности в видимом и тепловом диапазонах.

В качестве подосновы были использованы данные каналов снимков спутника Landsat 8 (действующего с 2013 г. и по настоящее время). Спутник получает снимки в видимом, ближнем и дальнем ИК диапазоне волн с разрешением 15-30-100 м на точку. Сенсоры OLI и TIRS имеют высокое отношение сигнал/шум (SNR) и позволяют снимать до 12 бит на точку [12].

Цифровые данные, полученные при помощи снимков Landsat 8, требуют дешифрования при помощи специализированного программно-аппаратного обеспечения. Основная сложность заключается в получении качественных снимков за определенный временной период, что представляется не всегда возможным из-за погодных условий и повышенной облачности.

Для обработки космических снимков было использовано программное обеспечение ESRI ArcGis Pro. Это приложение позволяет обрабатывать и управлять данными, полученными со спутников, проводить пространственный анализ и визуализировать результаты. Благодаря ArcGis Pro можно комбинировать слои метаданных каналов и получать необходимую информацию. Снимки Landsat 8 обладают диапазоном в 11 каналов, которые допустимо комбинировать между собой [87].

Основные комбинации каналов позволяют получить индексы – рассчитанные из многоканальных изображений. Подобные индексы получаются путем комбинирования, умножения, деления, вычитания и суммирования каналов в разных пропорциях. Индексы привязаны к определенным каналам, расположенным в некоторых конкретных частях электромагнитного спектра.

Для территории Бреста и окрестностей применены следующие индексы для визуализации различных объектов:

– NDVI (нормализованный вегетационный индекс), отражающий наличие и относительную биомассу растительности. Его можно получить, используя красный канал Red (поглощение пигментом хлорофилла) и инфракрасный канал NIR (высокая отражательная способность растительного сырья) [87] (рис. 2.12)

$$NDVI = ((NIR - Red)/(NIR + Red)); \quad (2.41)$$

– MNDWI (модифицированный стандартизированный индекс различий воды), отражающий границы акватории заданной территории. Изображение получается при помощи комбинации каналов Green и SWIR, которые позволяют снизить значения застроенных областей и улучшить визуализацию открытых водных пространств [87] (рис. 2.13)

$$MNDWI = (Green - SWIR)/(Green + SWIR); \quad (2.42)$$

– NDBI (стандартизированный индекс различий застройки), выделяющий области застройки. Комбинация каналов NIR и SWIR (ближний инфракрасный и коротковолновый инфракрасный), приглушающих атмосферные воздействия и разницу в освещенности [87] (рис. 2.14)

$$NDBI = (SWIR - NIR)/(SWIR + NIR). \quad (2.43)$$

Рисунки 2.12–2.14 контрастируют объекты, имеющие различное альбедо, что в итоге дает возможность оценить теплосодержание поверхности. Рисунок 2.12 и индекс NDVI позволяют дифференцировать растительность на древесную (хвойную и лиственную), кустарниковую и травянистую. Водные объекты (рис. 2.13) имеют наибольшую контрастность в случае различий температур воды и

окружающих объектов. По длине реки Мухавец можно оценить ее тепловое загрязнение, например ниже ТЭЦ. Самые яркие – промышленные объекты и городская застройка (рис. 2.14), выделяющие тепло в атмосферу и позволяющие выявить тепловые аномалии города.

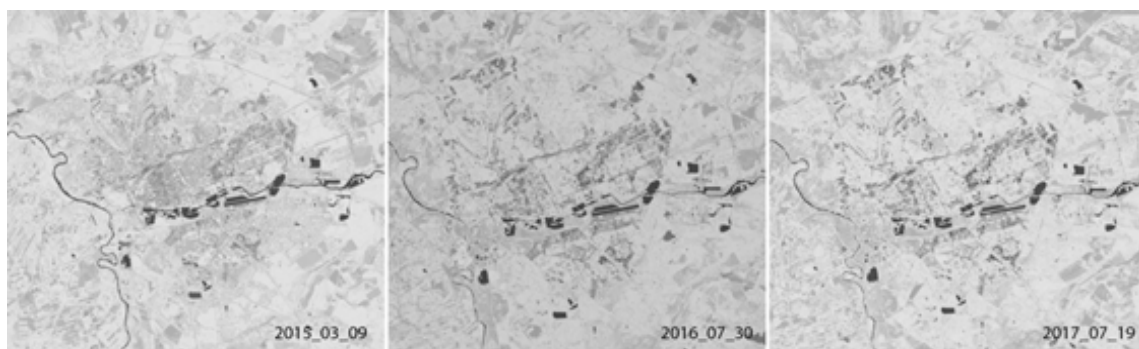


Рисунок 2.12 – Карты визуализации индекса NDVI в г. Бресте за весенне-летний период 2015-2017 гг. (ярко-зеленым оттенком отображена растительность)



Рисунок 2.13 – Карты визуализации индекса MNDWI в г. Бресте за весенне-летний период 2015-2017 гг. (контрастно подчеркнута площадь городской акватории)

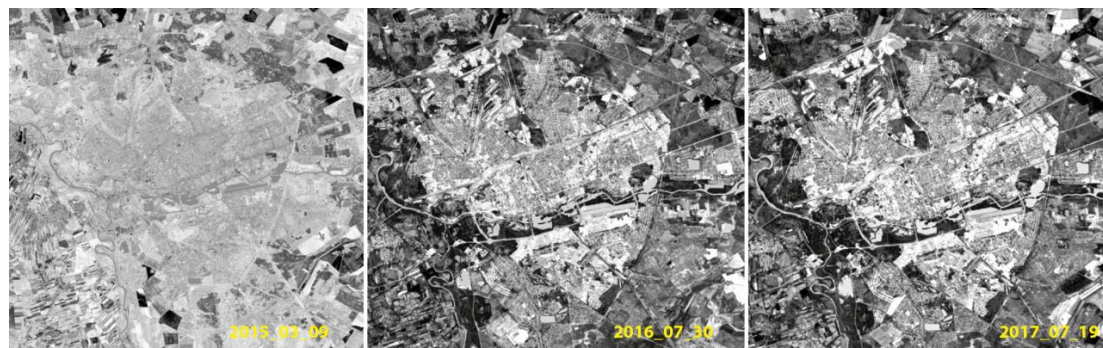


Рисунок 2.14 – Карты визуализации индекса NDBI в г. Бресте за весенне-летний период 2015-2017 гг. (контрастно выделяются объекты промышленного и гражданского строительства, транспортные коммуникации)

Городскому микроклимату г. Бреста как крупного урбанизационного образования характерен перепад средних температур на 1–2 °С по сравнению с сельской местностью в весенне-летний период. На материалах геоснимков NASA нами выявлены основные проблемные места в пределах территории города Бреста и окрестностей и проведен анализ динамики тепловых аномалий.

Для оценки динамики изменения температуры поверхности микроклимата г. Бреста были использованы данные спектрального канала 10 с длиной волны 10,3–11,3 мкм. Исходные данные представляются в виде изображений в калиброванных цифровых значениях DN (digital numbers), их необходимо переводить в значения по градусам Цельсия.

Коррекция материалов производилась на базе программного обеспечения ESRI ArcGis Pro и включала в себя два этапа.

Первый этап – расчет интенсивности спектральной радиации, полученной датчиком, по формуле [11]

$$L\lambda = ML \times Q_{cal} + AL, \quad (2.44)$$

е  $L\lambda$  – интенсивность спектральной радиации (Watts/(m<sup>2</sup> × sr × μm)),  $ML$  – калибровочный коэффициент (RADIANCE\_MULT\_BAND\_10, взятый из txt. файла с метаданными снимка),  $AL$  – дополнитель-

ный калибровочный коэффициент (RADIANCE\_ADD\_BAND\_10 из txt. файла с метаданными снимка),  $Q_{cal}$  – дискретное калиброванное значение пикселя снимка (DN).

Второй этап – конвертация данных в температурные значения по градусам Цельсия. Расчет проводится по следующей формуле [11]

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273,15, \quad (2.45)$$

где  $T$  – температура в градусах Цельсия, °C,  $L_\lambda$  – интенсивность спектральной радиации ( $\text{Watts}/(\text{m}^2 \times \text{sr} \times \mu\text{m})$ ),  $K_1$  – калибровочная константа (K1\_CONSTANT\_BAND\_10 из txt. файла с метаданными снимка);  $K_2$  – калибровочная константа (K2\_CONSTANT\_BAND\_10 из txt. файла с метаданными снимка).

Данные проведенных расчетов были получены в виде тепловых карт (рис. 2.15), подробный анализ которых показал наиболее теплые участки в пределах городской территории [80].

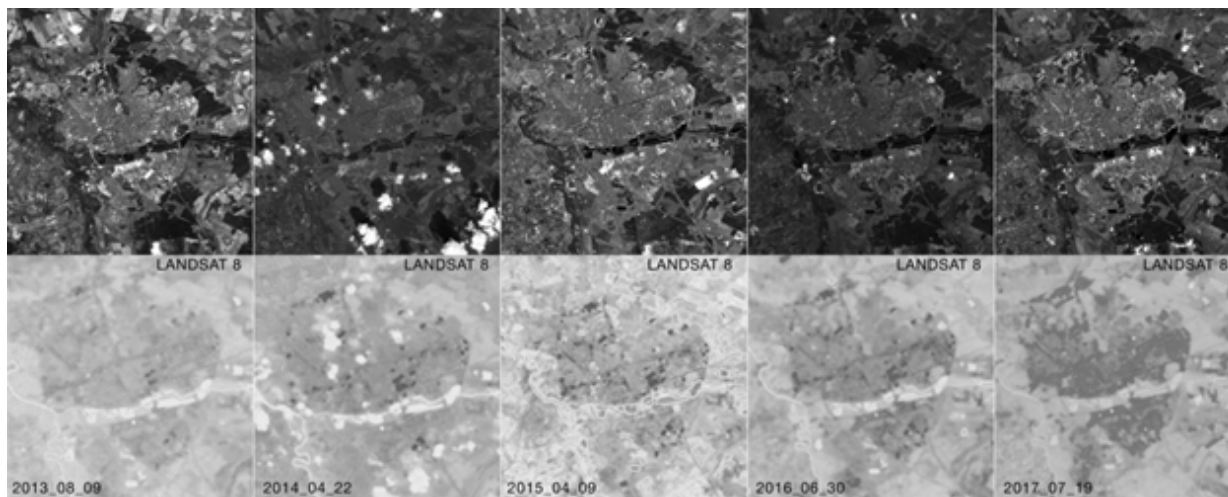


Рисунок 2.15 – Карты динамики изменения температуры подстилающей поверхности в г. Бресте за весенне-летний период 2013-2017 гг.

Таковыми участками являются кварталы, окружающие градообразующую ул. Московскую, а также с развитием города в юго-западном направлении подобные центры выделились и в заречных микрорайонах (рис. 2.16). Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что городские температурные аномалии сосредоточены в месте расположения существующих и бывших производственных территорий, гаражных кооперативов и складских зон. Ярко-красным цветом выделены наиболее значимые из них. Карты доказывают, что основными источниками теплового загрязнения являются именно промышленные производства. Ориентировочная площадь территории, занимаемая ярко выраженными тепловыми аномалиями, составляет около 8–10 % от площади городской застройки.

В восточном направлении выделяется тепловая аномалия по ул. Московской на территории электромеханического завода. Данная территория и ее окружение характеризуются очень малой площадью зеленых насаждений. Большую площадь территории промзоны занимают бытовые корпуса.

В северо-западном и западном направлениях наибольшая тепловая нагрузка приходится на территорию производств «Санта-Бремор» и «Брестский мясокомбинат».

Выполненные расчеты и дешифровка спутниковых карт позволила установить максимальные температуры в ядрах тепловых аномалий г. Бреста (табл. 2.15).

На основе полученных данных просматривается взаимосвязь существующих тепловых аномалий с расположением производственных объектов и технических зон в урбанизационной структуре г. Бреста. Особое внимание следует уделить участку по ул. Московской (рис. 2.17), так как данная территория используется в качестве общественно-торговой зоны и существует вероятность большего негативного воздействия на посетителей торговых объектов, проживающих вблизи данной территории людей.

В работе [5] разделяются все типы поверхностей на 4 группы, согласно их пиковой дневной температуре:

- деревья, трава, растительность представлены наиболее холодными поверхностями с характерной максимальной дневной температурой ( $T_{veg}$ );
- искусственно созданные покрытия, такие как дороги, тротуары, парковки, являются более теплыми. Максимальная температура представляется как ( $T_{пав}$ );



- темные и серые городские поверхности обладают максимальной температурой ( $T_{d_{pav}}$ );
- кровли представляются самыми горячими поверхностями в городской среде с максимальной дневной температурой ( $T_{roof}$ ).

Рассматриваемая территория по ул. Московской интегрирует в себе различные типы подстилающих поверхностей (рис. 2.17) [80].



Рисунок 2.16 – Карта-схема размещения тепловых аномалий г. Бреста

Таблица 2.15 – Максимальные температурные показатели в точках тепловых аномалий г. Бреста

Дата	Температура, °C
2013.08.09	42,6
2014.04.22	42,5
2015.04.09	36,5
2016.06.30	34,7
2017.07.19	43,9

Зная значения максимальных дневных температур, получаем среднюю пиковую температуру территории с градацией по типу ( $T_i$ ) согласно формуле [5]

$$T_i = T_{veg} S_{veg} + T_{lpav} S_{lpav} + T_{d_{pav}} S_{d_{pav}} + T_{roof} S_{roof}, \quad (2.46)$$

где  $T_i$  – максимальная температура подстилающей поверхности, °C,  $S$  – площадь подстилающей поверхности, %.

Полученные данные зональной статистики на основе рисунка 2.14 отражены в таблице 2.16. Результаты показывают градацию территории в зависимости от типологии подстилающей поверхности с учетом вклада каждой в общую площадь исследуемой территории.



Рисунок 2.17 – Карта исследуемого участка территории электротехнического завода по ул. Московской (пунктирной линией выделена территория завода; оранжевая линия – кровли; зеленая линия – растительность; остальная территория – искусственные покрытия: тротуарная плитка, асфальт и др.)

Таблица 2.16 – Оценка теплового эффекта на территории электромеханического завода по ул. Московской

Тип подстилающей поверхности	Площадь поверхности, %	Температура поверхности, °С
Деревья, трава, растительность	16	15-38
Светлые искусственные покрытия	20	49-60
Тёмные искусственные покрытия	14	60-71
Кровли	50	66-88
Территория завода по ул. Московской	100	54-72

Оценка поверхностной температуры городских территорий, основанная на дистанционном зондировании с использованием снимков спутников серии Landsat, подходит для наблюдения и контроля микроклимата городских и сельских районов. Подобные данные спутниковых снимков дают последовательную информацию за многолетний период благодаря непрерывному функционированию, таким образом позволяя выявить направление и динамику изменений, существующих в городской среде.

Проведенные расчеты позволяют сделать комплексную оценку эффективности мероприятий, направленных на повышение уровня человеческого комфорта. Полученные результаты показали, что основной путь снижения температурных негативных явлений заключается в изменении функционального зонирования территории и изменении площади искусственных подстилающих поверхностей. Одним из способов может стать увеличение доли покрытий, обладающих повышенным альбедо, например, светлые строительные материалы, светлый асфальт и тротуары. Также следует стремиться к уравниванию площади зеленых зон и искусственных поверхностей, хотя это не всегда осуществимо ввиду уже сложившейся планировки и высокой плотности застройки. Тогда оздоровлению территории также может способствовать применение зеленых кровель и фасадов, что позволит регулировать температурный режим в течение всего вегетационного периода растений в теплое время года.

## 2.5. Влияние промышленности Белорусского Полесья на качество атмосферного воздуха региона

В современных условиях практически во всех странах мира существуют экологические проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды промышленным сектором и автотранспортом. Масштаб загрязнения зависит от специфики работы предприятия. Промышленный комплекс Белорусского Полесья представляют около 400 крупных основных предприятий различных отраслей.

Исторически сложившаяся аграрная специализация экономики региона отражается и на структуре промышленности, где наибольший удельный вес занимает пищевая промышленность (46 % от общего объема промышленного производства). Динамично развивающийся агропромышленный ком-