

Санкт-Петербургский государственный университет

ФЕДОРОВА Елизавета Николаевна

Выпускная квалификационная работа

**«Оценка климатического риска «жара» для территории Санкт-Петербурга в
условиях изменения климата»**

Уровень образования: бакалавриат

Направление подготовки 05.03.04 «Гидрометеорология»

Основная образовательная программа СВ.5021.2019 «Гидрометеорология»

Научный руководитель:

и.о. заведующего кафедры
климатологии и мониторинга
окружающей среды, д.г.н.

Павловский Артем Александрович

Рецензент:

доцент кафедры
метеорологических прогнозов,
Российский государственный
гидрометеорологический
университет, к.г.н.

Цепелев Валерий Юрьевич

Санкт-Петербург

2023

Оглавление

Введение.....	3
1. Климатический риск «жара»	5
1.1. Климатический риск и подходы к его оценке.	5
1.2. Влияние жары на здоровье и среду обитания человека	9
1.3. Городской остров тепла.....	14
2. Материалы и методы исследования	16
2.1. Объект исследования.....	16
2.2. Исходные данные	17
2.3. Методы исследования	18
3. Волны жары и другие показатели жаркой погоды в Санкт-Петербурге.....	23
4. Результаты оценки климатического риска «жара» для территории Санкт-Петербурга ..	32
Заключение.....	37
Благодарности.....	39
Литература	40
Приложения	42

Введение

Происходящие климатические изменения оказывают существенное влияние человека, на все сферы его жизнедеятельности. Изменение климата происходит под воздействием совокупности антропогенных и естественных факторов, а его важным последствием является увеличение повторяемости и интенсивности опасных явлений погоды (ОЯ), которые вызывают чрезвычайные ситуации, сопровождающиеся человеческими жертвами и экономическими потерями (*Третий оценочный доклад об изменениях климата..., 2022*).

Анализ информации о бедствиях, произошедших вследствие геофизических, метеорологических, климатических, гидрологических, биологических опасных природных явлений, а также техногенных катастроф, Международной базы данных о чрезвычайных ситуациях (EM-DAT) показывает, что с природными опасными явлениями связано 62% всех зарегистрированных бедствий, 80% смертей и 99% экономических потерь. За последние 50 лет зафиксировано 11072 случая (50%) бедствий, причиной которых были метеорологические, климатические и гидрологические опасные явления, в результате которых погибло 2,06 миллиона человек (45%), а экономический ущерб составил 3,64 триллиона долларов США (74%) (*Атлас смертности и экономических потерь..., 2021*).

С экономической точки зрения более целесообразно инвестировать в адаптационные мероприятия, снижающие уровень опасности климатических рисков. В целях принятия обоснованных решений при разработке мероприятий по адаптации к изменениям климата, необходимо наличие информации, как о самом опасном метеорологическом явлении, так и об объектах возможного воздействия (*Кобышева, Акентьева, Галюк, 2015*).

В качестве объекта исследования был выбран город федерального значения Санкт-Петербург, так как он является крупнейшей городской агломерацией и одним из важнейших экономических, промышленных, культурных, научно-образовательных, транспортных центров Российской Федерации. Санкт-Петербург, как крупнейший мегаполис Северной Европы, также имеет важнейшее международное значение (*Санкт-Петербургская агломерация: ..., 2022*).

Следует отметить, что в проекте регионального плана адаптации Санкт-Петербурга к изменениям климата, в котором рассматривается 17 климатических рисков, к числу наиболее значимых опасных метеорологических явлений для данной территории относится «жара» (классифицируется как риск «весьма опасного уровня»).

«Волной тепла» называется некоторый относительно продолжительный период, когда наблюдается устойчивая жаркая погода (*Виноградова, 2015*). Ежегодно волны тепла оказывают большее влияние на здоровье человека (*Lane et al., 2015*). Около 30% мирового населения, как минимум, 20 дней находятся под воздействием климатических условий, которые обуславливают увеличение количества смертей (*Mora et al., 2017*).

Так, жара 2010 г., произошедшая на территории европейской части Российской Федерации, по числу смертей (55 736) вошла в десятку наиболее катастрофических явлений за 1970-2019 гг. Суммарно 2 волны тепла в Европе в 2003 и 2010 гг. вызвали 127 946 смертей. Для Германии, Италии и Испании доля смертей, вызванных экстремальными температурами, в 2003 г. составила более 90 % (95, 94 и 90% соответственно) от всех зафиксированных летальных случаев (*Атлас смертности и экономических потерь..., 2022*).

Оценка термических условий в больших городах остается одним из актуальных вопросов прикладной климатологии, так как в них неблагоприятные последствия, вызванные опасным метеорологическим явлением «жара» усиливаются эффектом наличия городского острова тепла. Суммарно это приводит к снижению уровня комфортности проживания горожан (*Голубева, 2022*). Антропогенно-измененные климатические условия мегаполисов существенно повышает вероятность возникновения опасных метеорологических явлений: сильная и продолжительная жара. Например, *Imada et al. (2019)* показали, что волна тепла, от которой пострадала Япония в июле 2018 г., не возникла бы без антропогенного влияния.

Цель работы: оценить уровень опасности климатического риска «жара» для территории Санкт-Петербурга с учетом особенностей функционально-планировочной структуры его административных районов.

Задачи:

- изучить различные методологические подходы к оценке климатического риска «жары», как опасного метеорологического явления, и её влиянию на социальную сферу и отрасли экономики;
- определить показатели интенсивности, распространенности и продолжительности воздействия «жары» в Санкт-Петербурге по данным наблюдений за температурным режимом в городе;
- проанализировать пространственное распределение риска – выделить наиболее и наименее уязвимые районы города.

1. Климатический риск «жара»

1.1. Климатический риск и подходы к его оценке.

В соответствии с Методическими рекомендациями по оценке климатических рисков, утвержденных приказом Минэкономразвития России от 13.05.2021 № 267, климатический (климатообусловленный) риск – совместная характеристика вероятности опасных проявлений климатического фактора и его воздействия (в виде вреда или ущерба) на объект этого воздействия, которая выражается в величине ущерба (в натуральном и (или) стоимостном выражении), характерного для повторяемости заданных значений опасного климатического фактора.

Исходя из определения и структуры (рис. 1) климатического риска, о нем можно говорить в случае, когда на территории наблюдается какое-либо опасное явление/неблагоприятные условия погоды и существует объект, который находится под вероятным воздействием и уязвим к ним.

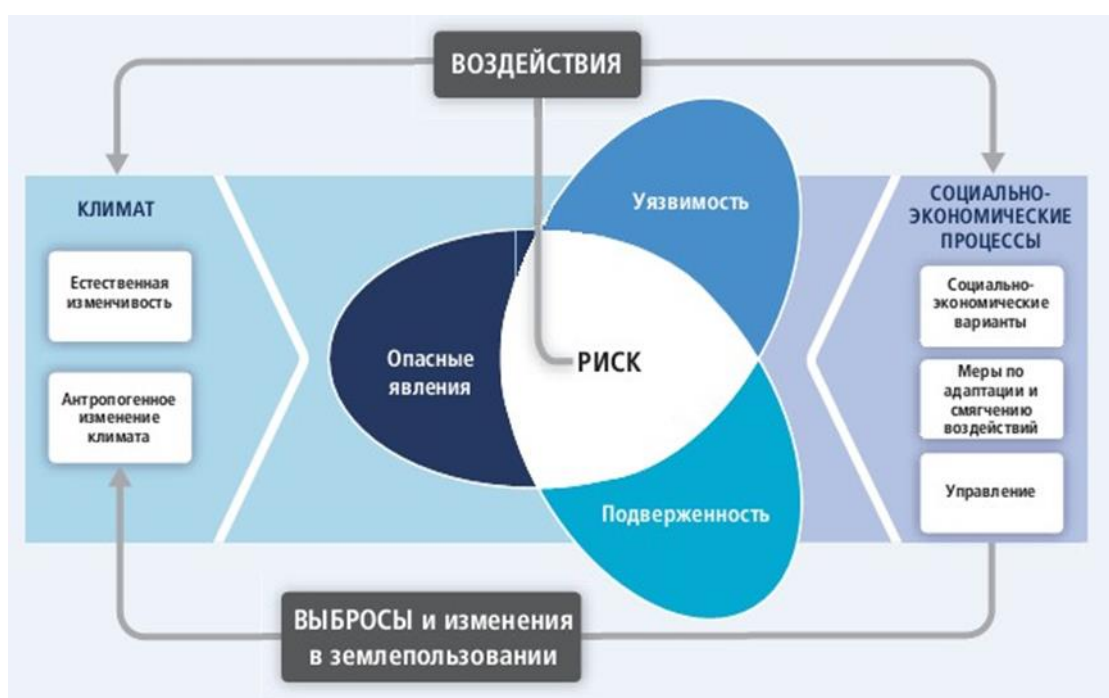


Рис. 1. Концепция климатического риска [МГЭИК, 2014].

Анализ климатических рисков состоит из таких этапов, как идентификация видов риска, их количественная оценка и прогноз. На первом этапе необходимы определенные знания применения климатической информации, так как иногда учитывается не только само ОЯ, но и последствия этого ОЯ – техногенное событие или распределение событий, оказывающих влияние на реципиент, которым может быть:

- объект или система объектов
- процесс, комплексный процесс
- территория
- отрасль экономики

Характеристика видов реципиентов неодинакова, а также зависит от определенной задачи. Описание объекта включает его назначение и особенности устройства, процесса – его назначение и время протекания, территории – её границ, отрасли – инфраструктуру (Кобышева, Акентьева, Галюк, 2015).

Прогноз рисков не может быть осуществлен без качественного мониторинга как гидрометеорологический условий, так и свойств реципиента (подверженность, чувствительность, потенциал адаптивности), что отражает его уязвимость, которая меняется с течением времени.

Для количественной оценки рисков существуют 2 основных подхода – эмпирический и вероятностный.

Концепция, на которой основан эмпирический подход, представляет собой математическую интерпретацию риска (рис. 2). Таким образом, данный подход учитывает подверженность объекта, включая ее в величину уязвимости. В таком случае риск можно определить с помощью формулы:

$$P = p \times U, (1)$$

где p – вероятность природного явления; U – уязвимость некоторого объекта, подвергающегося воздействию ОЯ.

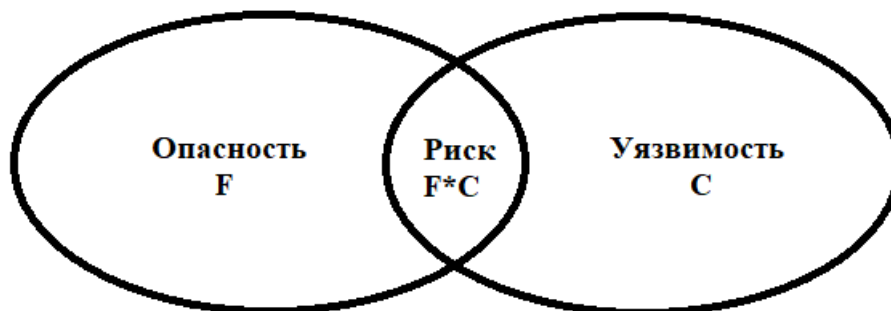


Рис. 2. Модель риска. F – частота возникновения опасности, C – условная вероятность уязвимости реципиента риска от опасности (Кобышева, Акентьева, Галюк, 2015).

Социальной риск $P_{\text{соц}}$ выражается через соотношение между числом людей, подвергшихся воздействию источника опасности, и вероятностью такого события. Рассматривая отдельные случаи ОЯ, определяется средняя площадь, которую оно охватывает, или радиус корреляции данного явления, когда нет возможности найти среднюю площадь.

Вероятность природного явления определяется формулами 2 и 3, одна из которых применяется в случае, когда ОЯ зафиксировано 1 раз, другая – когда ОЯ наблюдалось несколько раз в году, соответственно.

$$p = n/N \quad (2),$$

где n – число ОЯ на данной территории за весь период наблюдений, N – число лет наблюдений.

$$p = N'/N \quad (3),$$

где N' – число лет с ОЯ.

Формула для расчета риска нанесения социального ущерба выглядит следующим образом:

$$P_{\text{соц}} = p \times \frac{s}{S} \times t_{\text{ср}} \times m \times K \quad (4),$$

где s – средняя площадь воздействия данного явления (км^2), S – площадь административной области (км^2), $t_{\text{ср}}$ – количество суток, когда воздействовали ОЯ или НГЯ, m – численность населения административной области (чел.), K – коэффициент агрессивности.

Для нахождения вероятности лет с явлением, а не вероятности самого явления, риск, вычисленный по предыдущей формуле, следует умножить на максимальное число явлений в году.

Общая формула для определения социального риска или вероятности поражения конкретного реципиента:

$$P_{\text{соц}} = p \times \frac{s(i)}{S} \times \frac{s}{S} \times t_{\text{ср}} \times m \times K \quad (5),$$

где s_i – площадь реципиента (км^2).

Чтобы перейти к экономическому риску требуются количественные сведения об ущербах, продолжительности каждого ОЯ и его вкладе в ущерб за период, равный продолжительности воздействия.

Данный подход допустимо использовать, когда изменение метеорологических характеристик происходит стационарно по математическому ожиданию и/или дисперсии, в противном случае необходима его коррекция.

Второй подход – вероятностный – предполагает оценку рисков посредством расчета вероятности превышения интенсивности ОЯ, неблагоприятного явления погоды (НУП) или аномального климатического условия (АКУ) и соответствующих им максимальных потерь. Такая методика направлена на рассмотрение вероятности неблагоприятных последствий от воздействия ОЯ, НУП или АКУ, где повторяемость заменяется на вероятность, которая оценивается с помощью некоторой модели распределения (модели нормального распределения, Пуассона, Гумбеля, Парето).

Ключевыми понятиями, используемыми в количественной модели риска являются:

- годовая частота происшествий, появления события – вероятность появления ущерба (ARO)
- ожидаемый единичный ущерб – стоимость ущерба от одного явления (SLE)
- ожидаемый годовой ущерб (ALE), определяется как произведение ARO и SLE:

$$ALE = ARO \times SLE \text{ (6).}$$

Величину ARO можно выразить как отношение события к количеству лет. Например, если событие происходит 1 раз в 3 года, то данный показатель будет равен 1/3, а если 2 раза в год, то $ARO = 2$. Таким образом, не имеет ограничений сверху.

Множитель SLE равен произведению количественного значения актива (AV) на фактор воздействия (EF), который определяется как размер ущерба или влияние на значение актива в %:

$$SLE = AV \times EF \text{ (7).}$$

Следовательно, риск ущерба от того или иного явления рассчитывается на основе данных о частоте его появления и порога интенсивности, которая может быть зафиксирован ущерб. Однако расчет может осложниться вследствие распределения величин не только по времени, но и по географическому пространству (*Кобышева, Акентьева, Галюк, 2015*).

1.2. Влияние жары на здоровье и среду обитания человека

Наиболее опасным последствием жары является ее влияние на увеличение количества смертей и здоровье человека. Данной теме посвящено множество исследований, в которых доказано, что жара воздействует на заболевания системы кровообращения, общую смертность, физиологические реакции в организме человека. Перегрев кожных покровов вызывает активизацию потовых желез, усиление периферического кровотока для ликвидации избытка тепла. Вследствие чего может возникнуть риск дегидратации, снижение артериального давления и увеличение частоты сердечных сокращений (Виноградова, 2015).

В периоды жаркой продолжительной погоды возрастает число смертей от заболеваний системы кровообращения (инфаркт), органов дыхания, эндокринной системы (диабет) и цереброваскулярных болезней (инсульт). Наиболее подверженными группами населения являются лица старше 65 лет и/или страдающие хроническими заболеваниями. Установлены связи между температурой воздуха в летний период и общей смертностью, смертностью от отдельных причин (заболеваний системы кровообращения, органов дыхания, пищеварения, нервной системы, травм, утопления и самоубийств) и числом обращений за экстренной медицинской помощью (Ревич и др., 2015).

Исследования волн жары и их влияния в РФ начинались с изучения взаимосвязей аномально высоких температур воздуха и смертности в отдельных городах. Например, в Твери была выявлена зависимость таких показателей здоровья, как число обращений за экстренной медицинской помощью, общая смертность, смертность от травм, утоплений, самоубийств, от температуры в летний период. Увеличение максимальной дневной температуры на каждый градус относительно определенного порогового значения сопровождалось ростом числа обращений за медицинской помощью, смертности от отдельных причин на 10%, общей смертности на 8% (на 1 случай дополнительной смерти ежедневно).

Примером влияния жары на северные регионы РФ может служить дополнительная смертность (289 случаев) в Архангельске во время волн тепла за период 1999-2008 гг. В то же время в Якутске в 1999-2007 гг. среднегодовое число аномально жарких летних дней больше такого же показателя за базовый период (1961-1990 гг.) в 1,7 раза. При этом наблюдалось увеличение суточной смертности от ишемической болезни сердца и инфарктов более чем в 2 раза, от естественных причин – примерно в 1,5 раза относительно фонового уровня.

Стоит отметить лето 2010 г., когда на территории европейской части России была зафиксирована устойчивая волна жары в течение 40 дней вследствие блокирующего антициклона. Такая ситуация оказалась опасна для здоровья из-за воздействия гипотермии – аномально высоких температур на протяжении продолжительного непрерывного периода. Исходя из месячных данных Росстата о смертности населения по регионам, за данный период дополнительная смертность была равна 54 тысячам случаев. В 32 регионах, не включая Москву, в течение периода с среднемесячной температурой июля, превышающей многолетнюю норму на 6°C, показатель смертности увеличился на 16 тысяч случаев, из которых 10,5 тысяч связаны с заболеваниями системы кровообращения. В Санкт-Петербурге рост смертности составил 1,5 тысяч случаев (30% по сравнению с значениями аналогичного периода 2009 г.). Максимум потерь населения наблюдался не в июле 2010 года, а в августе в связи с еще большей жарой в Липецкой, Воронежской, Тамбовской, Рязанской областях, в Поволжье и на юге РФ (Ульяновская, Саратовская, Волгоградская, Ростовская области, Калмыкия), распространением аномально жаркой погоды до Урала и загрязнением атмосферного воздуха продуктами горения вследствие пожаров. В общей сложности, рост смертности в 43-х субъектах РФ, которые находились под воздействием продолжительной жары, составил 38 тысяч случаев (32,6%). В ряде субъектов (Волгоградская, Воронежская, Липецкая, Ростовская, Рязанская, Саратовская, Тамбовская, Ульяновская области, Мордовия, Татарстан и Чувашия) число смертей от заболеваний органов кровообращения увеличилось в 1,5-2 раза. Связь между температурой воздуха и смертностью от всех причин в 2010 г. была исследована на примере города Воронеж. В результате чего сделан вывод о том, что с ростом температуры после пороговой величины на 1 °C величина смертельных исходов увеличивалась на 3% с лагом до 4 дней. А также жара 2010 г. вызвала у миллионов людей повышение уязвимости к инфекционным и простудным заболеваниям и риска эпидемий в последующий осенне-зимний период (Ревич, 2017).

Аномально жарким летом 2010 г. в Москве, когда превышение многолетней среднесуточной температуры более чем на 5°C было зафиксировано в течение 45 суток, произошел резкий рост смертности – на 11 тысяч, по сравнению с предыдущим аналогичным периодом. Ситуация осложнялась высоким уровнем загрязнения воздуха из-за мощного антициклона и дыма от лесных пожаров и горящих торфяников. С помощью моделирования зависимости показателя смертности от температуры и загрязнения воздуха в Москве было выявлено, что дополнительная смертность в примерно 70% случаев объяснялась длительным воздействием высоких температур, другая часть (30%) – влиянием

загрязнения при высоком температурном стрессе, иначе говоря, сочетанием 2-х исследуемых опасных факторов (*Ревич и др., 2015*).

По данным работы для города Красноярск, за 12 лет были выявлены 64 волны тепла и на основе корреляций между температурой воздуха и смертностью сделан вывод о мгновенном характере влияния. В 1999-2005 гг. статистически значимо возросли 7 показателей смертности – болезни системы кровообращения в возрастных группах 30-64 лет (наиболее значимый, 56%) и от 65 лет и старше, болезни органов дыхания в возрастной группе 30-64 лет, внешние причины в возрастных группах 18-29 лет и 30-64 лет и все естественные причины в возрастных группах 30-64 года и от 65 и старше. В другой период, с 2010 по 2014 гг., наблюдался значимый рост по 5-ти показателям – болезни системы кровообращения в возрастных группах 30-64 и от 65 лет и старше, болезни органов дыхания в возрастной группе от 65 лет и старше, внешние и все естественные причины возрастной группе 30-64 лет и 0-17 лет. Прирост для последней категории составил 23%, что является наибольшей величиной из представленных. Сравнивая воздействие волны тепла и холода в Красноярске, можно сказать, что они существенно влияют на здоровье населения, однако в риск воздействия от тепловой волны в период 1999-2005 гг. был выше, чем от холодной, обратная ситуация сложилась в 2010-2014 гг. Наиболее уязвимой оказалась возрастающая группа от 30 до 64 лет, независимо от причин смерти, а показатели относительного риска смертности от заболеваний органов кровообращения преобладали над другими причинами смерти (*Черных, 2017*).

На примере Нью-Йорка был сделан вывод, что большая часть случаев смерти от теплового воздействия происходила в помещениях. Для изучения влияния аномально жаркой погоды на характеристики воздуха в помещении были проанализированы изменения температуры и влажности в летний период в 285 домах Нью-Йорка с низким и средним уровнем дохода. В результате чего обнаружена линейная зависимость между температурой воздуха и уровнем индекса тепла. Моделирование 10-дневной тепловой волны 2006 года в Нью-Йорке и 9-дневной, аналогичной более экстремальной 2003 года в Париже показала, что многие дома во время продолжительной жары имеют опасно высокие уровни индекса тепла, причем жилые помещения людей со средним и низким уровнем дохода подвергаются большему воздействию, поэтому возникает необходимость улучшения управления температурно-влажностным режимом помещений (*Quinn et al., 2014*).

По данным анализа влияния наблюдающихся и прогнозируемых климатических изменений на различные отрасли энергетики, наблюдается суммарный положительный эффект, по большей части обусловленный снижением потребности в отоплении. Это характерно не только для умеренных широт, но и для северных субтропических широт и более заметно на урбанизированных территориях из-за возникновения городского острова тепла. В то же время с увеличением числа экстремальных проявлений погодно-климатических процессов (волны тепла и холода) в период их воздействия существенно осложняется функционирование энергетических объектов. Дефицит генерирующих мощностей может быть вызван пиком потребления энергии в самые холодные дни в умеренных широтах. Для южных районов особенно опасны периоды с аномально высокой температурой воздуха, так как появляются локальные пики потребления электроэнергии преимущественно вследствие использования кондиционеров, сложности в работе атомных и тепловых электростанций в связи с повышением температуры воды, которая необходима для охлаждения конденсаторов паротурбинных блоков. Наблюдалось большое количество инцидентов по всему миру, особенно в последние десятилетия, когда ограничивали электроснабжение или полностью не обеспечивали энергией из-за вынужденной приостановки работы тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электрических станций.

За последние годы зафиксировано неравномерное повышение зимнего и летнего энергопотребления, а также его пиковых значений, что обусловлено совокупностью социально-экономических факторов (рост рекреационной инфраструктуры и обеспеченности кондиционерами, уменьшение доли промышленных потребителей) в сочетании с природно-климатическими (повышение температуры воздуха и в летний, и в зимний период). Например, в Московской энергосистеме, имеющей высокий уровень социально-экономического развития, в последние полтора десятилетия прослеживается возникновение локального максимума в летний период, при этом скорость его роста превышает увеличение годового (зимнего) пика на 30%. Таким образом, происходит выравнивание внутригодовой неравномерности, которое в долгосрочной перспективе может спровоцировать негативные эффекты. Преобладание темпов роста летних нагрузок энергосистем над увеличением зимних максимумов вызывает формирование годового пика потребления энергии летом, подобно существующему в Кубанской энергосистеме (Клименко и др., 2020).

С ростом температуры наружного воздуха снижаются показатели работы ТЭС и АЭС (мощность, КПД), что объясняется термодинамикой их энергетических циклов (Клименко и др., 2020). Аналогично, производство возобновляемой энергии часто

становится менее эффективным (*Viguié et al., 2020*). Следовательно, возникает ситуация одновременного снижения выработки электростанций и увеличения спроса на электроэнергию, при которой возможна нехватка мощностей для производства энергии. Особенно такие обстоятельства могут возникнуть в условиях роста летних температур воздуха, наблюдающихся на всей территории России. К тому же, есть угроза нарушения межсистемных связей, которые обеспечивают энергодефицитные регионы (*Клименко и др., 2020*).

Предполагая, что электроэнергия используется массово для охлаждения зданий (для поддержания температуры 23 °С во всех зданиях) с оптимальным уровнем эффективности и учетом выделения тепла, моделирование показывает увеличение дополнительного потребления энергии во время волн жары в Париже на 2,4% относительно показателей 2017 г. А также с учетом того, что кондиционирование помещений происходит только во время продолжительной жары с целью предотвращения негативного воздействия и поддержания комфортных условий. При использовании кондиционеров в дни, не связанные с жарой, расход электроэнергии будет заметно больше.

Помимо увеличения затрат электроэнергии на кондиционирование, стоит учитывать, что функционирование кондиционеров сопровождается выделением тепла, нагревая наружный воздух, таким образом усугубляя его термические характеристики, усиливая волну жары и приводя к снижению уровня теплового комфорта. Характер проявления данного эффекта зависит от времени суток и особенностей волны жары, в основном её интенсивности. Благодаря этому, в среднем, продолжительность периода с высоким тепловым стрессом может быть увеличена на 20 мин в сутки (*Viguié et al., 2020*).

Аномально высокие температуры также оказывают негативное влияние на транспортную систему – состояние средств передвижения и путей сообщения. Например, в жару увеличивается нагрузка на узлы и агрегаты автомобилей, что вызывает различным сбоям в работе и поломкам, особенно в условиях городских пробок, может привести к отказу тормозов и электропроводки. На автомобилях без системы ABS в жару эффективность торможения снижается, возможны затиранья и перекося колодок. Системы автомобилей с ABS также могут иметь проблемы датчики, которые вмонтированы на тормозном узле колеса, посылают ложный сигнал блоку управления, считая колеса заблокированными. К тому же возрастает расход топлива из-за работы кондиционера.

Дорожное покрытие в таких условиях подвергается не меньшему воздействию. При высоких температурах и высокой большой пропускной способности не исключена

деформация даже качественного асфальта, образование колеиности. Подобная ситуация с железнодорожными путями, деформация рельсов вызывает сложности в работе транспорта. Например, по данным СМИ (<https://www.spb.kp.ru/online/news/3499732/>), «десятки людей получили солнечные удары, а на проспекте Васильевского острова днем 6 июня 2019 года случился транспортный коллапс».

Помимо неудовлетворительного состояния транспортных путей, причиной сложностей может быть ограничения скорости движения поездов (не более 50 км/ч) из-за высокой температуры воздуха, вследствие чего возникают задержки в 8-12 мин (<https://spb.mk.ru/social/2021/07/11/elektrichki-na-sestroreckom-napravlenii-zamedlilis-izza-zhary.html>).

1.3. Городской остров тепла

Особенность Санкт-Петербурга как крупнейшей агломерации – наличие эффекта городского «острова тепла», что может усугублять негативное воздействие волн тепла. Аномальная жара в июле 2010 года привела к росту смертности на территории значительной части ЕТР, но в наибольшей степени смертность возросла именно в Санкт-Петербурге – на 1,5 тыс. случаев, или на 30% по сравнению с аналогичным периодом в 2009 г. (Ревич, 2017). Около 80% опрошенных жителей Санкт-Петербурга чувствовали себя во время жары «плохо».

Эффект городского острова тепла – явление, при котором город испытывает более высокие нагрузки от влияния температуры, чем сельские и пригородные районы. Это связано с плотной и вертикальной застройкой, ограниченным растительным покровом, преобладанием темных поверхностей (крыш, тротуаров), поглощающих более 80% солнечной радиации, которая превращается в тепло. К тому же, в городах сосредоточена активная человеческая деятельность, которая сопровождается выделением дополнительного антропогенного тепла (выхлопные газы от транспортных средств, вследствие производственных процессов) (Vanos et al., 2014). Данный эффект приводит к росту ночных температур воздуха, так как температура воздуха, как правило, медленнее понижается здесь ночью из-за высокой теплоотдачи поверхностями зданий и дорожных покрытий.

Острова тепла могут снизить качество воды из-за термического загрязнения. Точно так же, как горячие поверхности в городских районах нагревают окружающий воздух, они

также передают тепло ливневой воде и городские ливневые стоки нагревают ручьи, реки и озера, потенциально нанося вред водной флоре и фауне.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Объект исследования

Санкт-Петербург располагается на Северо-Западе Восточно-Европейской равнины в пределах Приневской низины, занимая ее основную часть. Высоты варьируются от 0 до 176 м. Современный рельеф города является следствием последнего оледенения (осташковского или валдайского) и эрозионно-аккумулятивной деятельности гидрологических объектов – водотоков и водоемов, а его развитие происходит посредством преобразования существовавших здесь ранее послеледниковых морских и озерных бассейнов. Приневская низина и территория, прилегающая к северному и южному побережьям Невской губы Финского залива, характеризуется террасированностью из-за последовательного понижения уровней водоемов (*Атлас особо охраняемых природных территорий Санкт-Петербурга, 2016*).

Город имеет высокий уровень обеспеченности водными ресурсами, 1/10 его территории представлена водной поверхностью. Насчитывается 385 водотоков общей протяженностью около 800 км и 620 водоемов общей площадью 3300 га, главным из которых является река Нева.

Зелёный фонд Санкт-Петербурга занимает около 30% городской территории. Почти половина всех зеленых насаждений города сосредоточена в городских лесах в пригородных районах (*Геологические и экологические риски Санкт-Петербурга..., 2014*). Растительный покров города и его окрестностей сформировался под влиянием ледникового рельефа, близости Балтийского моря и многочисленных озер, самым большим из которых является Ладожское озеро.

Исследуемый район находится в зоне умеренного климата, который имеет черты переходного – от океанического к континентальному с умеренно холодной зимой и теплым летом. Частая смена воздушных масс различного характера, а именно морских, арктических и континентальных определяет быструю смену погодных условий, что является одной из главных особенностей климата Санкт-Петербурга. Также стоит отметить влияние Финского залива, таких крупных водоемов как Ладожское и Онежское озера и ряд наблюдаемых опасных метеорологических явлений – сильные ветры, включая шквалы и смерчи, туманы, сильные морозы и жара, снегопады и метели, гололед, кратковременные интенсивные ливни и продолжительные дожди, град, грозы, лесные пожары, засухи и наводнения (<http://www.meteo.nw.ru>).

Санкт-Петербург является самостоятельным субъектом Российской Федерации в составе Северо-Западного федерального округа. Территория города подразделяется на 18 административных районов (рис. 3), в границах которых располагаются 111 внутригородских муниципальных образований, 9 городов (Зеленогорск, Колпино, Красное Село, Кронштадт, Ломоносов, Павловск, Петергоф, Пушкин, Сестрорецк) и 21 посёлок. Площадь Санкт-Петербурга на 1 января 2018 года по данным Комитета имущественных отношений составляет 144 631,82 га, население – 5 377 503 человек по состоянию на 1 января 2022 года (<https://petrostat.gks.ru/folder/27595>).

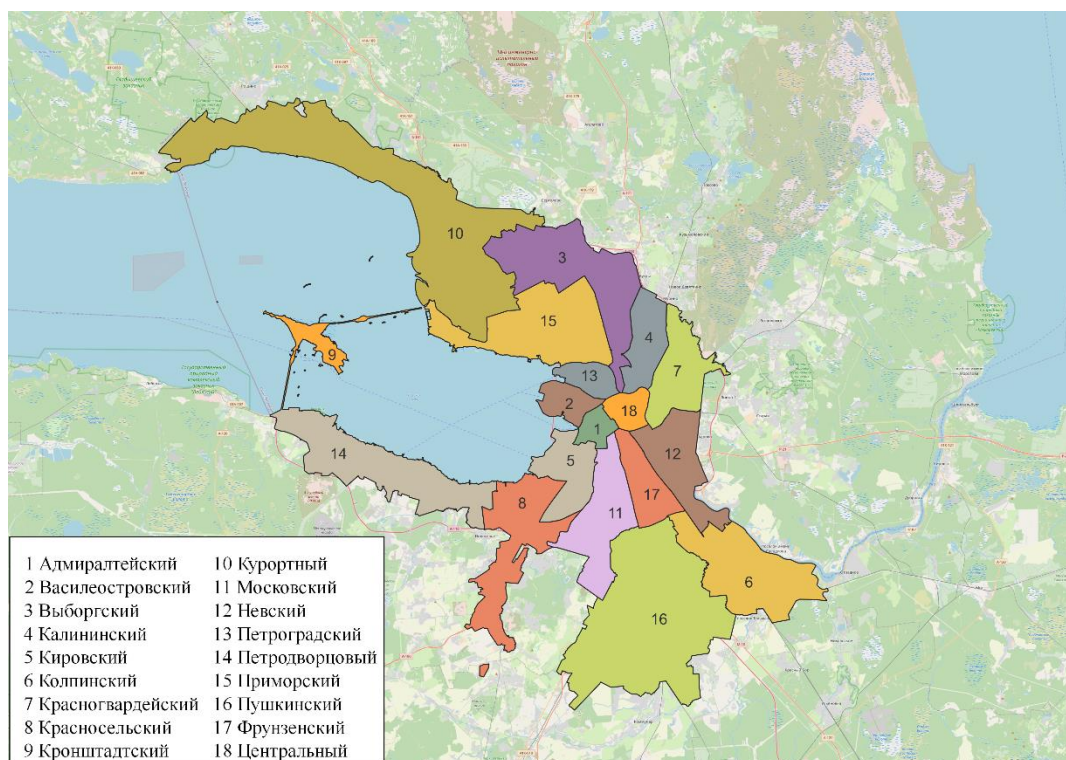


Рис. 3. Административно-территориальное деление Санкт-Петербурга.

2.2. Исходные данные

Термический режим Санкт-Петербурга и показатели жаркой погоды проанализированы на основе массивов срочных данных температуры воздуха и относительной влажности за период 1971-2020 гг. и суточных – только температуры воздуха (средняя, максимальная, минимальная) за период 1960-2022 гг, находящихся в открытом доступе на сайте Всероссийского Научно-исследовательского института Гидрометеорологической Информации - Мировой центр Данных (ВНИИГМИ-МЦД) (<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>).

При расчете риска была использована информация о социально-экономических показателях, размещенная на официальных сайтах Управления Федеральной службы

государственной статистики по Санкт-Петербургу и Ленинградской области и Администрации Санкт-Петербурга в виде справок по районам или нормативных документов (табл. 1).

Таблица 1. Сведения об основных демографических и социально-экономических показателях Санкт-Петербурга, использованных в работе.

Показатель	Актуальность сведений	Источник
Численность населения по районам, чел.	По состоянию на 1 января 2022 года	Официальный сайт Управления Федеральной службы государственной статистики по Санкт-Петербургу и Ленинградской области (https://78.rosstat.gov.ru/folder/27595)
Численность населения в возрасте 65 и более лет, чел.		Статистический бюллетень «Возрастно-половой состав населения Санкт-Петербурга на 1 января 2022 года» (https://78.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/14000622_Возраст-пол%20нас%20СПб%202022.pdf)
Обеспеченность населения территориями зеленых насаждений, м ² /чел.		Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга (https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/kki/provedenie-inventarizacii-territorij-znop/pokazateli-obespechennosti-territoriyami-zelenyh-nasazhdenij)
Площадь районов		Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга (https://www.gov.spb.ru/gov)

2.3. Методы исследования

С целью наиболее полного представления о термическом режиме, в частности относительно аномально высоких температур воздуха, были обработаны и проанализированы следующие метеорологические параметры:

- средние максимальные температуры воздуха за май-август, рассчитанные путем осреднения максимальных суточных температур воздуха для каждого месяца и всего периода за 1960-2022, 1961-1990, 1991-2020 гг., а также по десятилетиям (1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020 гг.)
- отклонения средних максимальных значений температуры по десятилетиям от климатической нормы (1961-1990 гг.) – полученные с помощью вычитания нормы из средних максимальных температур по десятилетиям для каждого месяца (май, июнь, июль, август) отдельно.

В соответствии с принятым МГЭИК определением климатического риска, важным этапом оценки вероятности возникновения и воздействия жары, является способ ее идентификации, как опасного метеорологического явления. В зависимости от особенностей районов исследования авторы статей, посвященных исследованию характеристик волн жары и их последствиям, используют для ее определения различные критерии. Например, в работе (*Ревич, 2015*) пороговое значение среднесуточной температуры приземного воздуха, превышение которого в течение некоторого времени можно классифицировать как волну жары, для Москвы было принято за 23,6°C, для Архангельска 21°C, для Афин 30°C, для Хельсинки 23,6°C.

Согласно определению Всемирной метеорологической организации (ВМО) волной жары является период продолжительностью 5 и более дней, когда ежедневная максимальная температура воздуха превышает среднюю максимальную за 1961-1990 гг. на 5°C и более.

В работах, касающихся температурного воздействия на здоровье человека, пороговое значение определяется как температура воздуха на уровне 97 (*Ревич, 2015*) или 98 (*Ревич, 2017*) процентиля многолетнего распределения среднесуточных температур. В таких случаях повышение смертности происходит при аномальных температурах в течение 5-7 дней и более.

Критерии, по которым А.Т. Бароуз выделял волны жары – превышение или достижение максимальной суточной температурой (ы) воздуха 32°C и продолжительность от 3 последовательных дней. Для стран Северной Европы волна жары – период, когда максимальная суточная температура превышает 25°C в течение 5 и более дней и, по крайней мере, в 3 из этих дней наблюдалась температура воздуха выше 30°C. В соответствии с (*Виноградова, 2015*) характерными параметрами для европейской территории РФ можно считать превышение (максимальной) температурой воздуха 30°C и продолжительность от 5 дней.

Также на официальном портале Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды дано определения явлениям «продолжительная жара» – положительные температурные аномалии (на 7°C и более) относительно среднесуточных норм в течении 5 и более суток – и «сильная жара» – превышение максимальной температурой воздуха 35°C любой продолжительности (<http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=759>).

Для анализа результатов и подбора наиболее показательной методики идентификации волн жары в Санкт-Петербурге расчет проведен в соответствии со всеми вышеперечисленными подходами. Продолжительность представляет собой сумму дней за год, в течение которых наблюдались волны жары, а число случаев – количество волн жары за год.

С помощью срочных данных за 1971-2020 гг. были составлены таблица различных сочетаний температур воздуха по градациям, начиная с 20°C с шагом 2°C, и относительной влажности по градациям (с 20% с шагом 5%) – температурно-влажностные комплексы по тридцатилетиям (1971-2000, 1981-2010, 1991-2020 гг.)

Оценка опасности сочетания проводилась на основании значений индекса жары (HI), рассчитанного по формуле 8 (*The heat index equation...*, 1990):

$$HI = -42,379 + 2,04901523 \times T + 10,14333127 \times R - 0,22475541 \times T \times R - 6,83783 \times 10^{-3} T^2 - 5,481717 \times 10^{-2} \times R^2 + 1,22874 \times 10^{-3} \times T^2 \times R + 8,5282 \times 10^{-4} \times T \times R^2 - 1,99 \times 10^{-6} \times T^2 \times R^2, \quad (8)$$

где T – температура воздуха, F; R – относительная влажность воздуха, %.

Затем определялся уровень опасности в соответствии с классификацией (рис. 4), а точнее его переходы к более опасному.

Temperature (F) versus Relative Humidity (%)						
°F	90%	80%	70%	60%	50%	40%
80	85	84	82	81	80	79
85	101	96	92	90	86	84
90	121	113	105	99	94	90
95		133	122	113	105	98
100			142	129	118	109
105				148	133	121
110						135

HI	Possible Heat Disorder:
80°F - 90°F	Fatigue possible with prolonged exposure and physical activity.
90°F - 105°F	Sunstroke, heat cramps and heat exhaustion possible.
105°F - 130°F	Sunstroke, heat cramps, and heat exhaustion likely, and heat stroke possible.
130°F or greater	Heat stroke highly likely with continued exposure.

Рис. 4. Значения индекса жары при различных сочетаниях температуры воздуха и классификация уровней опасности (<https://web.archive.org/web/20110629041320/http://www.crh.noaa.gov/pub/heat.php>).

Для каждой волны жары, идентифицированной по критериям (Ревич, 2017), были найдены средние суточные амплитуды температуры, которые представляют собой разность максимальный и минимальной температур за сутки.

Изменения характеристик проанализированы посредством линейного тренда. Выводы о значимости или незначимости тренда были сделаны на основе оценки коэффициента корреляции по критерию Стьюдента, где использовалась формула:

$$t^* = \frac{|r|}{\sigma_r}, \quad (9)$$

где r – коэффициент корреляции, σ_r – средняя квадратическая погрешность расчета коэффициента корреляции;

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{N-2}}, \quad (10)$$

где N – длина ряда.

Если рассчитанное $t^* >$ табличного $t_{кр}$ с уровнем значимости 5%, то коэффициент корреляции считался значимым, что свидетельствует о существовании статистически значимой прямой между переменными (временем и определенной характеристикой). Если $t^* > t_{кр}$, то гипотеза об отсутствии взаимосвязи переменных принималась (Практикум по дисциплине..., 2010).

На основе данных официальной статистики были найдены 2 показателя:

- доля населения в возрасте 65 лет и более, в %, как отношение численности населения в возрасте 65 лет и более к всей численности населения района умноженное на 100%
- плотность населения, чел./км², как отношение численности населения района к его площади.

Таким образом, единицы измерения каждого социально-экономического показателя различны и с целью возможности дальнейшего сравнения уязвимости районов и значений риска была проведена нормализация по формуле:

$$x_{i,norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (11)$$

где $x_{i,norm}$ – нормализованное значение показателя, x_i – i -ый значение показателя, x_{min} – минимальное значение, x_{max} – максимальное значение.

В случае, когда большее значения показателя уменьшает значение риска:

$$x_{i,norm} = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \quad (12).$$

Величина риска для каждого района рассчитаны с помощью формулы (1), где p – вероятность, вычисленная по формуле (2), а Y – среднее нормализованное значение социально-экономических показателей.

В работе использованы 2 программных продукта – Microsoft Excel для проведения расчетов и QGIS 3.26.3 для получения картографических материалов.

3. Волны жары и другие показатели жаркой погоды в Санкт-Петербурге

Охарактеризовать ситуацию с волнами жары на территории Санкт-Петербурга можно с помощью непосредственно их показателей и изменчивости, предварительно проанализировав значения максимальных температур воздуха.

Средняя максимальная температура воздуха в период май – август за 1960-2022 гг. составляет 20,0°C, при этом самым жарким месяцем является июль – 22,7°C (табл. 2). Показатели средних максимальных температур за периоды 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг., то есть 2 климатические нормы, – значительно отличаются, последняя больше предыдущей на 1°C для всего рассматриваемого периода и на 1,4°C для наиболее жаркого месяца – июля.

Значения максимальных температур, осредненных по десятилетиям, увеличиваются как в целом за теплый период (в данном случае май-август), так и отдельно в каждый месяц, особенно в июле – наибольшие наблюдаются в последнее десятилетие. Их отклонения от нормы – средних максимальных температур за 1961-1990 гг. за летние месяцы и май – преимущественно положительные в каждом месяце (рис. 5). К последнему десятилетию возросла величина отклонений, в июле она достигла 1,9°C, а также уменьшились количество и значение отрицательных отклонений. Наличие пикового значения 2,5°C, за 2001-2010 гг. объясняется аномально высокими температурами лета 2010 г.

Таблица 2. Средние максимальные температуры воздуха за различные периоды для мая, июня, июля, августа.

	Май	Июнь	Июль	Август	За весь период
1960-2022	16,0	20,4	22,7	20,8	20,0
1961-1990	15,6	20,1	21,9	20,0	19,4
1991-2020	16,3	20,5	23,3	21,4	20,4
1961-1970	15,4	20,3	21,6	20,4	19,4
1961-1970	15,2	20,3	21,4	20,2	19,3
1971-1980	15,3	20,3	22,2	20,1	19,5
1981-1990	16,4	19,7	22,1	19,8	19,5
1991-2000	15,1	20,7	22,4	20,8	19,7
2001-2010	16,5	19,7	24,4	21,9	20,6
2011-2020	17,3	21,1	23,0	21,7	20,8

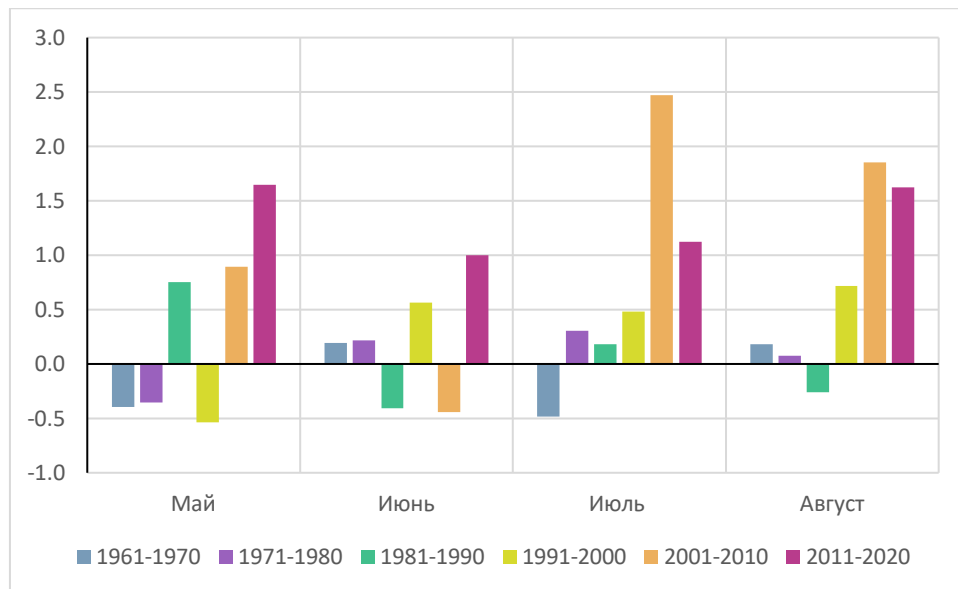


Рис. 5. Отклонение максимальных температур за летние месяцы, осредненные по десятилетиям, от нормы (1961-90 гг.).

Идентификация волн жары (или опасного метеорологического явления «продолжительная жара») на территории Санкт-Петербурга проводилась с помощью различных подходов, отличающихся значениями и/или характером критериев.

Расчет в соответствии с критериями ОЯ «продолжительная жара», представленными на официальном портале Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, (рис. 6) позволяет говорить об увеличении частоты данного ОЯ за последние 25 лет. При этом продолжительность имеет положительный значимый тренд, произошло ее увеличение за рассматриваемый период, в отличие от количества – продолжительная жара наблюдалась не более 2 раз в год и не имеет тенденции к уменьшению или увеличению.

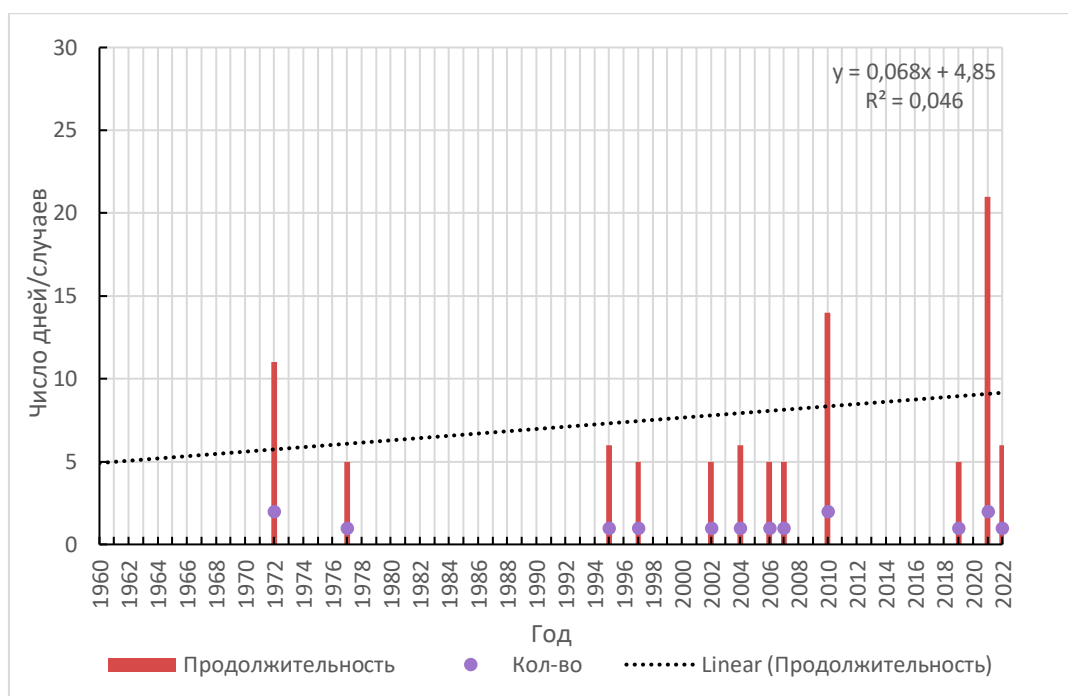


Рис. 6. Продолжительность и количество случаев ОЯ «продолжительная жара» (в соответствии с критериями Северо-Западного УГМС).

Руководствуясь критериями Всемирной метеорологической организации (ВМО), было выявлено значительно больше волн жары (рис. 7), соответственно возросла их частота как в целом, так и за последние 25 лет (особенно в первой трети), что уже менее выражено по сравнению с расчетами по предыдущей методике. Суммарная продолжительность имеет значения до 26 дней (в 2014 г.) и постепенно увеличивается. Можно отметить, что число случаев за год варьируется от 1 до 4, а во второй половине исследуемого периода значения больше 1 встречаются чаще.

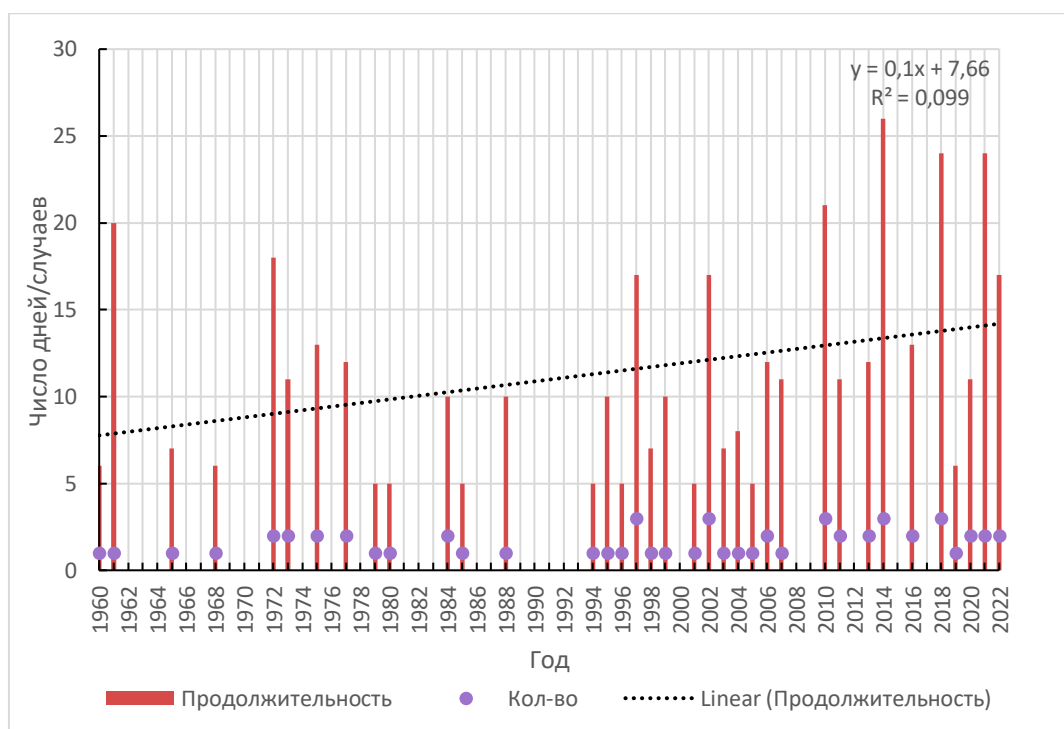


Рис. 7. Продолжительность и количество волн жары, идентифицированных по критериям ВМО.

В основе следующих подходов к идентификации волн жары лежит определение пороговой температуры воздуха на основе многолетнего распределения среднесуточных температур воздуха (рис. 8, 9). Количество и продолжительность волн жары больше при использовании более низкой порогов температуры, а также похожий временной ход, соответственно. Продолжительность в случае пороговой температуры на уровне 97-го перцентиля в 2014 г. достигала 25 дней, на уровне 98-го – 17 дней, однако количество случаев в году не превышало 3 обоих случаях. В результате выполненного анализа температурного ряда за 1960–2022 гг. установлено, что наибольшее количество случаев «жары» произошло в последнее десятилетие. Кроме того, выделен статистически значимый положительный тренд в рядах данных по продолжительности жары.

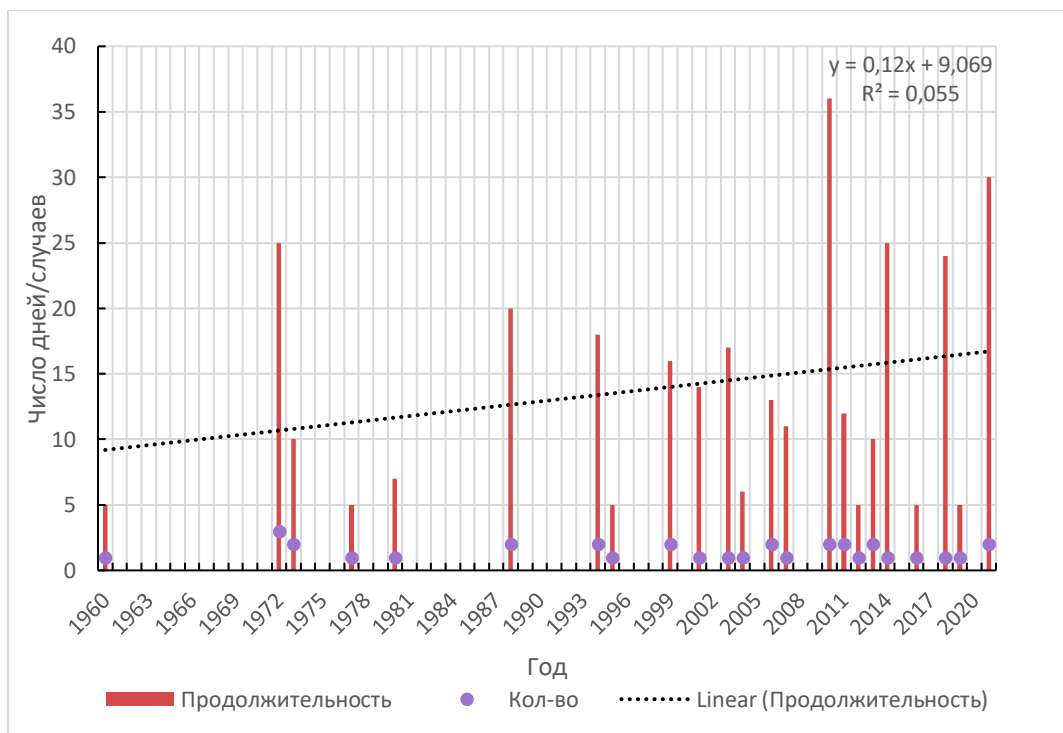


Рис. 8. Продолжительность и количество волн жары, идентифицированных по критерию превышения порогового значения на 97-% уровне обеспеченности среднесуточной температуры воздуха в течение 5 и более дней.

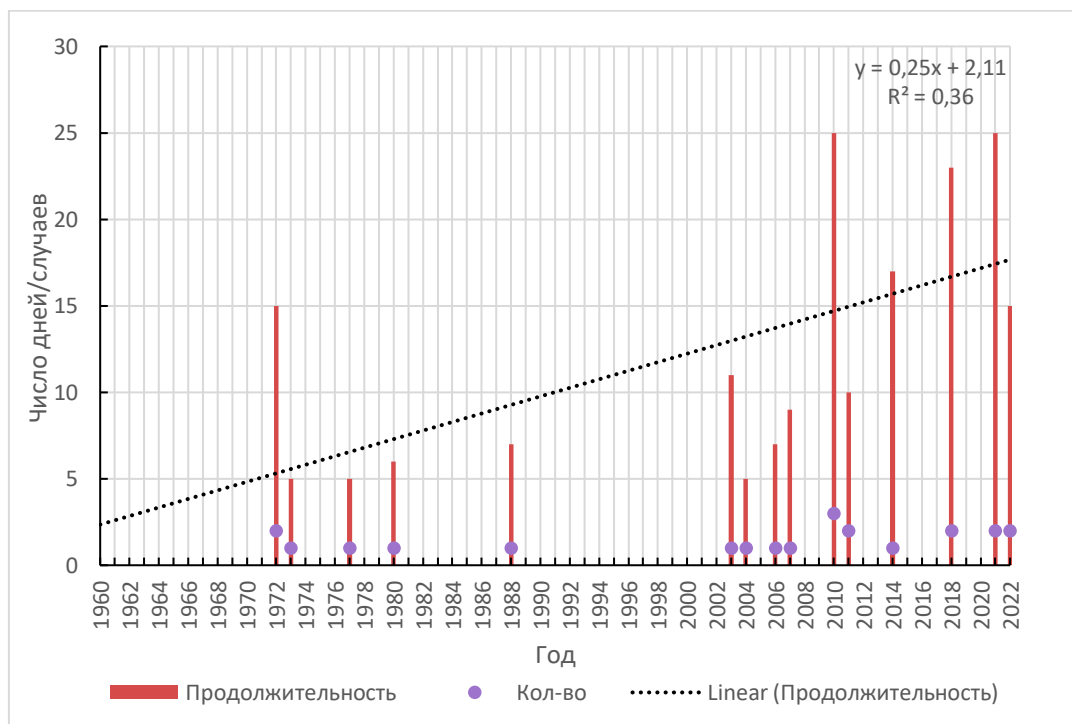


Рис. 9. Продолжительность и количество волн жары, идентифицированных по критерию превышения порогового значения на 98-% уровне обеспеченности среднесуточной температуры воздуха в течение 5 и более дней.

Ситуация с волнами жары, рассчитанными по методике, используемой для Северной Европы (рис. 10), также характеризуется увеличением продолжительности, их концентрацией в конце рассматриваемого периода и отсутствием закономерностей в изменении количества случаев в году (не более 2). Значения продолжительности, из которых максимальное равное 30 дням наблюдалось в 2010 году, несколько выше относительно расчетов по другим методикам.

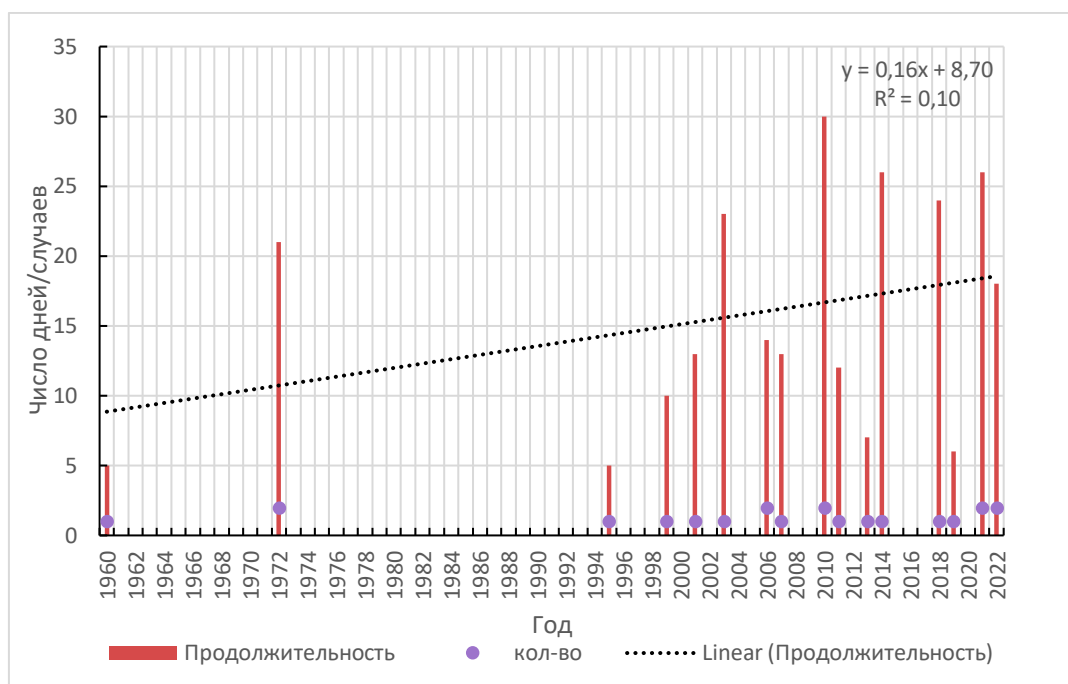


Рис. 10. Продолжительность и количество волн жары, идентифицированных по критериям для Северной Европы.

Если осуществлять идентификацию жары, используя в качестве критерия превышение максимальной температуры воздуха в 32°C в течение 3 и более дней, итогом будет выделение 3 волн жары в 2006, 2010 и 2021 г. продолжительностью 3 дня каждая. Даже с использованием данного подхода, который не учитывает климатические, природные и градостроительные особенности территории Санкт-Петербурга, наблюдается наличие волн жары в последнее время. Однако подобные результаты получены и в случае применения методики, согласно которой превышение порогового значения в 30°C должно наблюдаться в течение 5 и более дней. Выявлены 1 волна жары в 2003 г., по 2 в 2010 и 2021 гг. суммарной продолжительностью до 12 дней.

Все рассматриваемые подходы отличаются друг от друга, что выражается в итогах расчетов – разные количественные показатели и неоднозначное наличие какой-либо тенденции в многолетнем ходе случаев волн жары. Однако, говоря про характер частоты,

во всех случаях рассчитанные показатели позволяют сделать вывод о том, что в последнее 30-летие волны жары наблюдаются чаще, чем в предыдущий аналогичный период.

В соответствии с задачами работы, ориентацией на риск преимущественно для социальной сферы и выводами в соответствующих статьях (13), наиболее приемлемым для Санкт-Петербурга была выбрана методика, устанавливающая пороговое значение на 98 % уровне обеспеченности среднесуточной температуры воздуха (22,4°C).

Рассматривая аномально высокие температуры в контексте влияния на транспорт и энергетику, важен такой показатель как количество дней с температурой воздуха выше 30°C (рис. 11). Такие дни наблюдались не во все года, чаще в последнее 30-летие. При этом изменение их количества характеризуется положительным значимым трендом. Наибольшие значения – 17-20 дней – связаны с волнами жары.

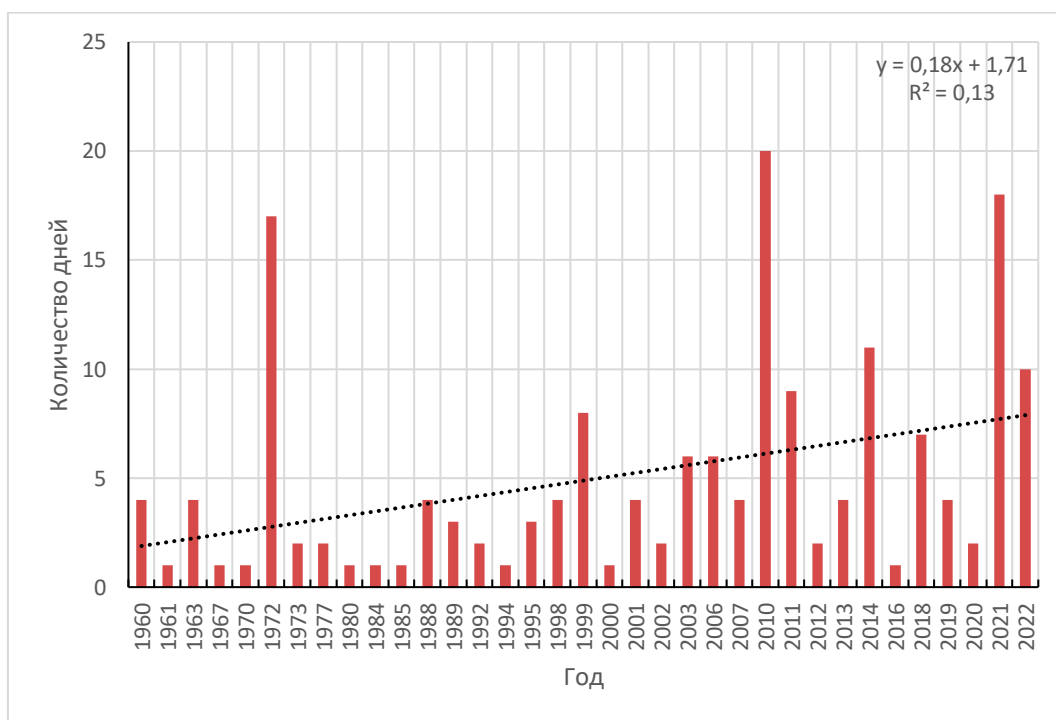


Рис. 11. Количество дней с максимальной температурой 30°C и более.

С точки зрения воздействия на здоровье человека, наиболее опасными являются высокие температуры воздуха в сочетании с высокой влажностью (температурно-влажностный комплекс). Оценить изменение повторяемости неблагоприятных условий позволяет сравнение количества случаев различных сочетаний за 1971-2000, 1981-2010 и 1991-2020 гг. (приложения 1,2,3, табл. 3). Анализируя градацию температур воздуха 30-32°C, можно отметить увеличение количества случаев в сочетании со всеми градациями относительной влажности, а при значении 50% и более «heat index (HI)», характеризующий комфортность условий, будет выше и перейдет на другой уровень опасности. Этот уровень

соответствует ситуации, когда требуется повышенная осторожность, возможны тепловые спазмы и тепловое истощение, длительная активность может привести к тепловому удару. Подобным образом изменяется количество сочетаний температур от 32 до 34°C с показателями влажности. Для таких температур достаточно 40%-ой влажности для повышения индекса жары, определяющего переход на более опасный уровень влияние жаркой погоды на самочувствие человека.

Таблица 3. Температурно-влажностный комплекс за период май-август 1971-2000, 1981-2010 и 1991-2020 гг., количество случаев (Т, °С – температура воздуха; R, % - относительная влажность). (сочетания другого уровня опасности (более высокого))

Т, °С R, %	1971-2000 гг.		1981-2010 гг.				1991-2020 гг.			
	30-32	32-34	30-32	32-34	34-36	36-38	30-32	32-34	34-36	36-38
20-24							2			
25-29	5	2	4	2		1	12	4		1
30-34	8	1	11	2	3		16	2	3	
35-39	17	5	13	9	1		19	9	1	
40-44	10	1	25	11			34	10		
45-49	6		14	3			19	4		
50-54	2		7				11			
55-59	3		3				4			
60-64	1		1				2			

Также негативное влияние оказывает высокая температура воздуха в ночное время в течение волн жары, так как организм не успевает оправиться от высоких температур и прийти в оптимальное состояние. Во время волн жары в Санкт-Петербурге средняя суточная амплитуда составила 10,3°C. Наблюдается отрицательный статистически незначимый тренд (рис. 12).

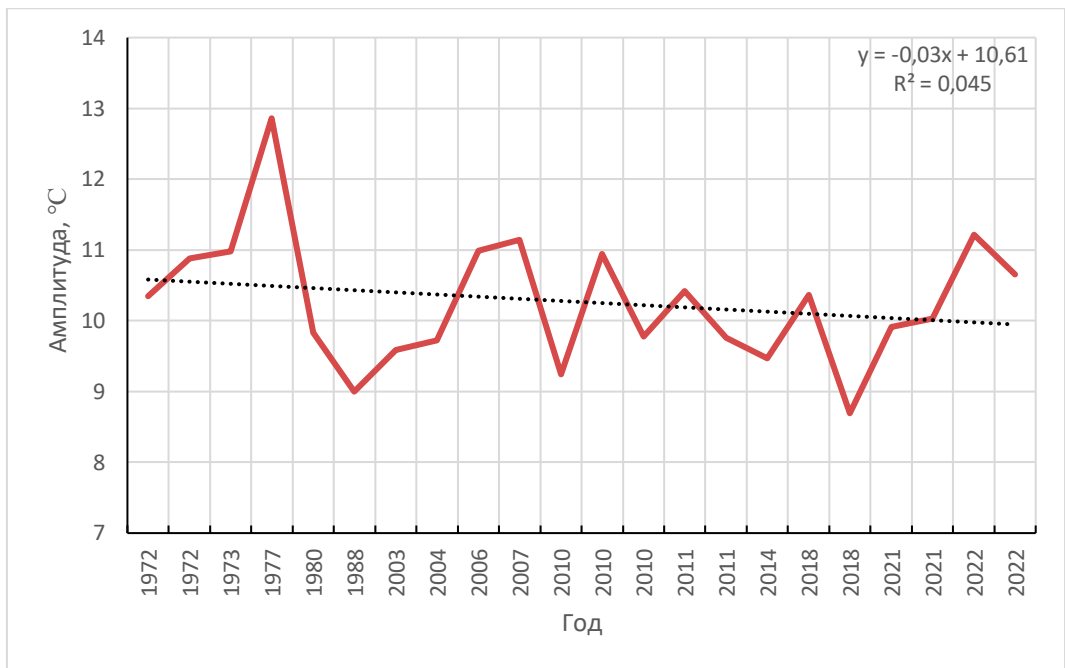


Рис. 12. Ход средних амплитуд температур воздуха во время волн жары в Санкт-Петербурге.

4. Результаты оценки климатического риска «жара» для территории Санкт-Петербурга

Данные о термическом режиме, в частности о волнах жары (табл. 4), позволяют рассчитать риск в соответствии с концепцией эмпирического подхода, для реализации которого также необходима информация о социально-экономических и градостроительных характеристиках территории Санкт-Петербурга (табл. 5). Их выбор осуществлялся с учетом способности охарактеризовать степень уязвимости социальной сферы во время волн жары и доступности официальных статистических данных.

Одной из выбранных характеристик является плотность населения, так как наибольшие ее значения в Санкт-Петербурге наблюдаются в местах размещения современной многоэтажной многоквартирной жилой застройки, где отмечается высокая концентрация искусственных поверхностей с низким альбедо и недостаточная обеспеченность населения зелеными насаждениями общего пользования. По данным (*Vanos et al., 2014*) именно эти территории характеризуются повышенным риском перегрева поверхности в период аномальной жары.

Также в качестве составляющей уязвимости использовалась информация о доле населения в возрасте 65 и более лет. Результаты, изложенные в статье (*Ревич, 2015*), показывают значимые различия эффектов от волн жары на разные возрастные группы населения: 30-64 и 65+ лет. В исследовании показано, пожилые люди являются более подверженной группой населения. Во время как коротких, так и длинных волн риск смертности по определенным причинам для пожилых выше в 5 случаях из 7. А также отмечается достоверно больший риск смертности от всех естественных причин для данной возрастной группы, почти в 2 раза выше относительно возрастной группы 30-64 года.

Не менее важным показателем является обеспеченность населения зелеными насаждениями, что характеризует уровень адаптационного потенциала. Деревья и другие виды растительного покрова охлаждают посредством эвапотранспирации — процесса возвращения влаги в атмосферу из экосистем за счет испарения и транспирации, так как она требует затрат тепловой энергии. Помимо этого, кроны деревьев создают тень, влияя на перегрев городских поверхностей и возможность защиты от прямой солнечной радиации. Это обеспечивает более безопасное и комфортное пребывание людей вне помещения.

Исследование вопроса снижения риска перегрева показывает, что этого можно добиться с помощью использования в строительстве более отражающих материалов, создающих охлаждающий эффект, и озеленения городских территорий. Такие меры как создание парков и выбор различных видов городского планирования (ориентация улиц,

плотность застройки) в комбинации способны повлиять на термические условия крупного города. Из-за инерции в эволюции городов для обеспечения необходимых значительных изменений в городской планировке или строительных характеристиках может понадобится несколько лет или даже десятилетий. Их скорость сопоставима со скоростью изменения климата, однако принимать решения следует до того, как можно будет наблюдать их последствия (Vanos et al., 2014).

Таблица 4. Волны жары в Санкт-Петербурге.

Год	Количество случаев	Суммарная продолжительность	Дата начала	Дата окончания	Максимальное отклонение среднесуточной температуры воздуха от пороговой, °С
1972	2	15	25 июня	4 июля	3,8
			19 августа	23 августа	2,8
1973	1	5	3 июля	7 июля	2,9
1977	1	5	12 июня	16 июня	2,7
1980	1	6	28 июля	2 августа	0,4
1988	1	7	13 июля	19 июля	3,6
2003	1	11	25 июля	4 августа	4,4
2004	1	5	3 августа	7 августа	1,1
2006	1	7	7 июля	13 июля	4,8
2007	1	9	8 августа	16 августа	4,1
2010	3	25	5 июля	19 июля	6,8
			25 июля	29 июля	7
			6 августа	10 августа	7,7
2011	2	10	8 июля	12 июля	2
			19 июля	23 июля	3,9
2014	1	17	26 июля	11 августа	4,5
2018	2	23	12 июля	20 июля	3,7
			22 июля	4 августа	2,9
2021	2	25	18 июня	27 июня	7,9
			4 июля	18 июля	6,2
2022	2	15	26 июня	4 июля	4,4
			15 августа	20 августа	3,4
Итог:	Повторяемость за весь период		0,24		
	Повторяемость за период 93-22 гг.		0,33		

Таблица. 5. Нормализованные значения социально-экономических показателей.

№ района	Название района	Плотность населения	Доля населения в возрасте 65 лет и старше	Обеспеченность зелеными насаждениями	Среднее
1	Адмиралтейский	0,868	0,366	0,967	0,734
2	Василеостровский	0,732	0,944	0,970	0,882
3	Выборгский	0,343	0,813	0,877	0,678
4	Калининский	1	1	0,910	0,970
5	Кировский	0,531	0,887	0,895	0,771
6	Колпинский	0,126	0,418	0,900	0,481
7	Красногвардейский	0,477	0,780	0,893	0,717
8	Красносельский	0,271	0,398	0,861	0,510
9	Кронштадтский	0,160	0,472	0,902	0,511
10	Курортный	0	0,863	0,383	0,415
11	Московский	0,352	0,828	0,883	0,688
12	Невский	0,678	0,449	0,949	0,692
13	Петроградский	0,487	0,876	0,740	0,701
14	Петродворцовый	0,081	0,527	0	0,203
15	Приморский	0,404	0,601	0,918	0,641
16	Пушкинский	0,054	0	0,703	0,252
17	Фрунзенский	0,798	0,978	0,923	0,899
18	Центральный	0,947	0,913	1	0,953

Используя нормализованные значения данных социально-экономических показателей и вероятность возникновения волн жары, для каждого района Санкт-Петербурга были рассчитаны значения риска (рис. 13, приложение 4), что позволило проанализировать его пространственное распределение.

Наиболее уязвимыми являются Калининский (0,231), Центральный (0,227), Фрунзенский (0,214) и Василеостровский (0,210) районы. Максимальное значение риска в Калининском наблюдается благодаря наибольшей плотности населения и доли населения в возрасте 65 лет и более относительно других районов, а также достаточно низкой обеспеченностью зелеными насаждениями. Самый низкий уровень озеленения на человека в Центральном районе, что в совокупности с параметрами населения определяет его высокую уязвимость и риск, соответственно. Нормализованные величины всех составляющих в Фрунзенском районе имеют достаточно большие значения – не ниже 0,798 (плотность населения). Подобная ситуация складывается в Василеостровском районе, где наибольший вклад вносит недостаточная обеспеченность населения зелеными насаждениями.

Петродворцовый (0,048), Пушкинский район (0,060) и Курортный район (0,099) имеют риск до 0,1, являясь менее уязвимыми. Первый характеризуется низкими значениями всех составляющих уязвимости – имеет самую высокую обеспеченность зеленым насаждениями, небольшую плотность и среднюю долю населения в возрасте 65 и более лет. В то же время в Пушкинском и Курортном районах достаточно низкая обеспеченность зелеными насаждениями или доля населения в возрасте 65 и более лет, соответственно, однако остальные характеристики значительно уменьшают риск относительно других районов в пределах Санкт-Петербурга.

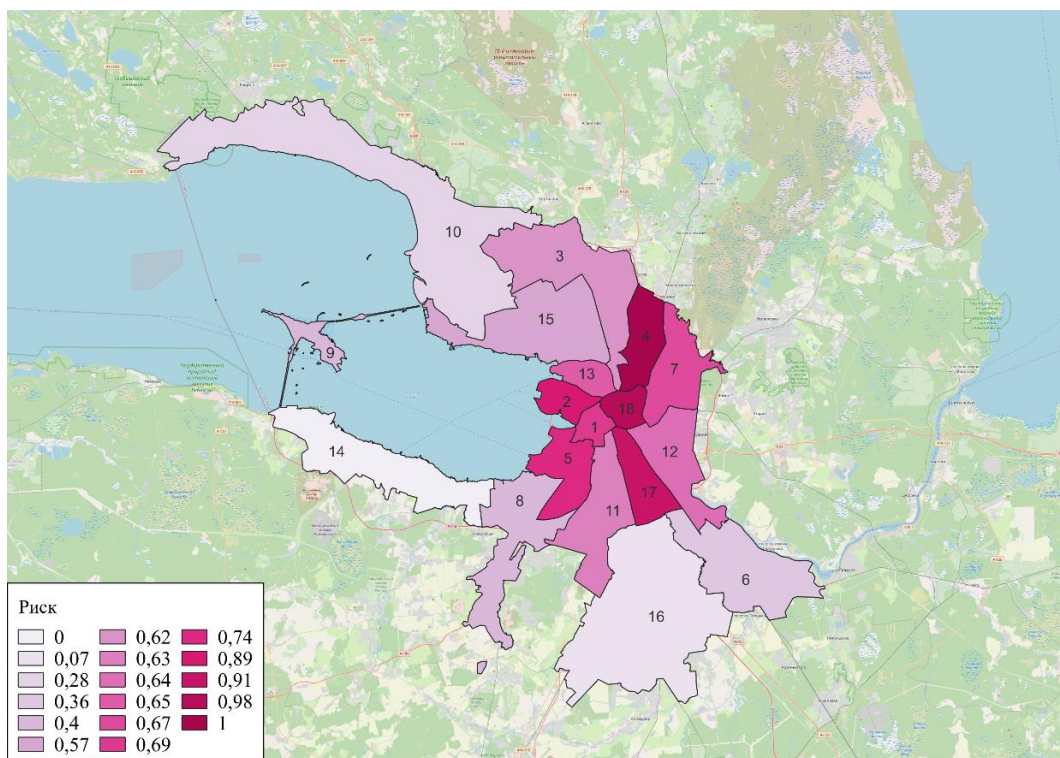


Рис. 13. Пространственное распределение риска для территории Санкт-Петербурга.

В расчете, главным образом, учитываются различия составляющей уязвимости, так как волна жары распространяется на всю территорию города. С этой точки зрения большему риску подвержены центральные районы и прилегающие к ним на северо-востоке (Калининский) и юго-востоке (Фрунзенский), расположенные чуть дальше от Финского залива. Таким образом, воздействие городского острова тепла усугубляется высокой плотностью населения, долей населения, наиболее подверженному негативному влиянию волн жары, и меньшим количеством зеленых насаждений на человека.

Заключение

В результате выполненного исследования удалось выделить категории населения, территории, отрасли экономики, объекты капитального строительства и инженерно-транспортной инфраструктуры, которые наиболее чувствительны к жаре как опасному явлению.

В связи с возрастающей значимостью данного метеорологического явления и его последствий для социально-экономического развития г. Санкт-Петербурга, была проанализирована многолетняя динамика параметров, характеризующих жаркую погоду: продолжительность и количество волн тепла, идентифицированных с помощью различных подходов, количество дней с максимальной температурой выше 30°C, суточные амплитуды термического режима, изменение случаев неблагоприятных сочетаний температурно-влажностного комплекса.

Установлено, что в настоящее время отмечается рост уровня опасности жары, поскольку увеличивается, как продолжительность, так и повторяемость данного опасного метеорологического явления. Например, в последнее тридцатилетие количество случаев продолжительной жары почти в три раза превосходит аналогичные значения для предыдущего климатического периода. Абсолютные максимальные температуры приземного воздуха за весь период наблюдений также были зафиксированы в текущем периоде – в июле 2010 года.

В связи с тем, что в проекте Регионального плана адаптации Санкт-Петербурга к изменениям климата, риск жары определен, как «особо опасный», представляется важной задачей по оценке его пространственного распределения в границах рассматриваемого субъекта Российской Федерации с учетом функционально-планировочной структуры города, плотности населения и обеспеченности элементами водно-зеленого каркаса.

Выполненный комплексный анализ уязвимости внутригородских территорий к жаре позволяет разрабатывать эффективные меры адаптации к опасному метеорологическому явлению в соответствии с особенностями административных районов.

По результатам расчета риска для 18 районов города, наиболее подверженными негативному воздействию волн жары являются Калининский, Центральный, Фрунзенский, Василеостровский районы. Более благоприятная ситуация наблюдается в Петродворцовом, Пушкинском и Курортном районах. Отмечается большой разброс в уровне уязвимости

различных районов в жару. Максимальные значения риска более чем в 4 раза превышают наименьшие.

Таким образом, несмотря на то что влияние волн жары распространяется на всю территорию г. Санкт-Петербурга, степень их воздействия различна. В совокупности с эффектом городского острова тепла, градостроительные и социально-экономические показатели районов определяют их уязвимость к данному опасному метеорологическому явлению. Показано, что необходимо сосредоточиться на разработке и реализации мероприятий по адаптации центральных районов к климатическому риску жара, особенно с учетом прогнозов развития глобального потепления.

Благодарности

Автор выражает благодарность ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова» и ее сотрудникам, в частности, Ключевой Марине Владимировне, выступившей в качестве научного консультанта. Марина Владимировна, как профессионал высокого уровня, проявила интерес к рассматриваемой научной проблеме, оказала помощь в пояснении автору теоретических основ прикладной климатологии, поиске данных и необходимой литературы. Особенно хочется отметить, что заданный ею творческий подход к решению поставленных задач, позволили проявлять изобретательность в выходе из затруднительных ситуаций.

Литература

1. Атлас смертности и экономических потерь в результате экстремальных метеорологических, климатических и гидрологических явлений (1970—2019 гг.), ВМО-№ 1267. – 2021.
2. Виноградова В. В. Волны тепла на Европейской территории России в начале XXI века //Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015. – №. 1. – С. 47-55.
3. Голубева Е. И., Константинов П. И. ВЛИЯНИЕ ВОЛН ТЕПЛА НА КОМФОРТНОСТЬ ПРОЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ В ГОРОДЕ МОСКВЕ //Проблемы региональной экологии. – 2022. – №. 4. – С. 87-93.
4. Гордеева С. М. Практикум по дисциплине "Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации". Учебное пособие для вузов по специальности "Океанология". / РГГМУ, 2010.– 73 с.
5. Клименко В. В. и др. ВОЛНЫ ТЕПЛА - НОВАЯ ОПАСНОСТЬ ДЛЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ РОССИИ //Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 494. – №. 1. – С. 82-88.
6. Кобышева Н. В., Акентьева Е. М., Галюк Л. П. Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере Санкт-Петербург. – 2015.
7. Приказ Минэкономразвития России от 13 мая 2021 г. № 267 «Об утверждении методических рекомендаций и показателей по вопросам адаптации к изменениям климата»
8. Ревич Б. А. Волны жары в мегаполисах и пороги их воздействия на смертность населения //Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96. – №. 11. – С. 1073-1078.
9. Ревич Б. А. и др. Волны жары в южных городах европейской части России как фактор риска преждевременной смертности населения //Проблемы прогнозирования. – 2015. – №. 2. – С. 56-67.
10. Томилина О. В. и др. Геологические и экологические риски Санкт-Петербурга. Практические рекомендации по адаптации к климатическим изменениям //Программа адаптации городской окружающей среды к негативным последствиям климатических изменений (CliPLivE). – 2014.
11. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2022. – 124 с.

12. Храмов В. Н., Ковалева Т. В., Нацваладзе Н. Ю. Атлас особо охраняемых природных территорий Санкт-Петербурга. Издание 2-е, исправленное и дополненное. / Санкт-Петербург, 2016. - 175 с.
13. Черных Д. А., Тасейко О. В. Оценка риска от температурных волн, влияющих на повышение уровня смертности населения г. Красноярска //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 2. – №. 13. – С. 678-680.
14. Шартова Н. В. и др. Температура воздуха и смертность: исследование пороговых значений жары и чувствительности населения на примере г. Ростов-на-Дону //Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – Т. 2. – С. 66-94.
15. Lane K. et al. Extreme heat awareness and protective behaviors in New York City //Journal of urban health. – 2014. – Т. 91. – С. 403-414.
16. Mora C. et al. Global risk of deadly heat //Nature climate change. – 2017. – Т. 7. – №. 7. – С. 501-506.
17. Quinn A. et al. Predicting indoor heat exposure risk during extreme heat events //Science of the total environment. – 2014. – Т. 490. – С. 686-693.
18. Rothfus L. P., Headquarters N. W. S. S. R. The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index) //Fort Worth, Texas: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology. – 1990. – Т. 9023. – С. 640.
19. Vanos J. et al. Assessing the health impacts of urban heat island reduction strategies in the cities of Baltimore, Los Angeles, and New York //Global Cool Cities Alliance. – 2014.
20. Vigiú V. et al. Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris //Environmental Research Letters. – 2020. – Т. 15. – №. 7. – С. 075006.
21. <https://www.gov.spb.ru/helper/economics/prognoz/> - официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга (дата обращения 10.04.2023).
22. <http://www.meteo.nw.ru> - ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (дата обращения 14.02.023).

Приложения

Приложение 1. Температурно-влажностный комплекс за период 1971-2000 гг.

Температура воздуха, °С/Влажность воздуха, %	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30	30-32	32-34
20-24	9	7	5	1	2		
25-29	29	35	26	12	9	5	2
30-34	75	66	63	32	18	8	1
35-39	111	128	85	70	26	17	5
40-44	160	159	115	72	35	10	1
45-49	217	189	123	84	37	6	
50-54	299	204	129	63	19	2	
55-59	264	224	116	41	11	3	
60-64	304	189	95	17	5	1	
65-69	256	160	53	19	1		
70-74	254	105	16	3			
75-79	177	64	5				
80-84	125	28	3				
85-89	72	3					
90-94	31	1					
95-100	3						

Приложение 2. Температурно-влажностный комплекс за период 1981-2010 гг.

Температура воздуха, °С/Влажность воздуха, %	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30	30-32	32-34	34-36	36-38
20-24	10	2	8	1	2				
25-29	32	31	24	8	6	4	2		1
30-34	59	54	42	28	11	11	2	3	
35-39	114	104	64	71	28	13	9	1	
40-44	133	131	116	89	46	25	11		
45-49	215	209	136	104	37	14	3		
50-54	267	211	146	75	28	7			
55-59	279	218	140	50	20	3			
60-64	360	210	102	27	11	1			
65-69	281	181	66	21	3				
70-74	272	125	30	6					
75-79	239	71	17	2					
80-84	151	39	8	1					
85-89	94	10	1						
90-94	52	7							

95-100	5								
--------	---	--	--	--	--	--	--	--	--

Приложение 3. Температурно-влажностный комплекс за период 1991-2020 гг.

Температура воздуха, °С/Влажность воздуха, %	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30	30-32	32-34	34-36	36-38
20-24	16	10	11	5	1	2			
25-29	40	30	21	16	11	12	4		1
30-34	77	71	54	42	31	16	2	3	
35-39	107	95	74	75	43	19	9	1	
40-44	138	142	137	108	51	34	10		
45-49	235	228	153	113	52	19	4		
50-54	278	236	171	85	37	11			
55-59	315	224	152	66	21	4			
60-64	336	223	103	36	11	2			
65-69	327	191	79	16	2				
70-74	260	145	37	5					
75-79	255	86	17	2					
80-84	156	45	6	1					
85-89	106	12	1						
90-94	63	8							
95-100	5								

Приложение 4. Значения риска для административных районов Санкт-Петербурга.

Район	P	У	Риск	Нормализованное значение риска
Адмиралтейский район	0,238	0,734	0,175	0,692
Василеостровский район	0,238	0,882	0,210	0,886
Выборгский район	0,238	0,678	0,161	0,619
Калининский район	0,238	0,970	0,231	1
Кировский район	0,238	0,771	0,184	0,741
Колпинский район	0,238	0,481	0,115	0,363
Красногвардейский район	0,238	0,717	0,171	0,670
Красносельский район	0,238	0,510	0,122	0,401
Кронштадтский район	0,238	0,511	0,122	0,402
Курортный район	0,238	0,415	0,099	0,277
Московский район	0,238	0,688	0,164	0,632
Невский район	0,238	0,692	0,165	0,638
Петроградский район	0,238	0,701	0,167	0,650
Петродворцовый район	0,238	0,203	0,048	0

Приморский район	0,238	0,641	0,153	0,571
Пушкинский район	0,238	0,252	0,060	0,065
Фрунзенский район	0,238	0,899	0,214	0,908
Центральный район	0,238	0,953	0,227	0,978