

Научная статья

УДК 51-7

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.1>

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТЯЖЕСТЬ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

Наталья Савченко*^{}, Татьяна Кудрявцева^{}, Мария Родионова^{}

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,
nata.savchenko.1999@bk.ru, tankud28@mail.ru, rodionova_ma@spbstu.ru

*Автор, ответственный за переписку: nata.savchenko.1999@bk.ru

Аннотация

Исследование посвящено анализу влияния различных погодных условий (атмосферного давления, температуры воздуха и количества осадков) на тяжесть дорожно-транспортных происшествий (ДТП) в городе Санкт-Петербург. Цель работы: выявление закономерностей между метеорологическими факторами и степенью тяжести последствий ДТП. В работе применены методы анализа данных: описательная статистика, визуализация данных и расчет р-значения для проверки гипотез. Анализ показал: по осадкам статистически значимых различий в распределении тяжести ДТП не выявлено. Различия между режимами осадков и «сухими» условиями не достигают значимости. По атмосферному давлению (758–763 мм рт. ст.) различий также нет ($p \approx 0.8$); высокая доля ДТП при «вне-нормальных» давлениях отражает особенности распределения наблюдений, а не рост тяжести. Температура демонстрирует статистически значимое различие между группами ($p = 0.013$). Для уточнения роли погоды необходимы модели с более высокой временной детализацией (интенсивность осадков, переходы через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Необходимо учитывать трафик, видимость, тип дороги и сезонность. В целом повышенный риск тяжёлых и летальных ДТП отмечается при температуре $0\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и осадках, особенно интенсивных. Полученные выводы могут быть использованы для адаптации городской инфраструктуры к неблагоприятным погодным явлениям и разработки предупреждающих систем для водителей.

Ключевые слова: дорожно-транспортные происшествия, погодные условия, атмосферное давление, температура воздуха, осадки, транспортная безопасность.

Цитирование: Савченко Н., Кудрявцева Т., Родионова М., 2025. Влияние метеорологических факторов на тяжесть дорожно-транспортных происшествий. Sustainable Development and Engineering Economics. 3, 1. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.1>

Эта работа распространяется под лицензией [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Савченко Н., Кудрявцева Т., Родионова М., 2025. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Research article

DOI: <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.1>

THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS ON THE SEVERITY OF ROAD ACCIDENTS

Natalia Savchenko*, Tatiana Kudryavtseva, Maria Rodionova

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, nata.savchenko.1999@bk.ru, tankud28@mail.ru, rodionova_ma@spbstu.ru

*Corresponding author: nata.savchenko.1999@bk.ru

Abstract

The study is devoted to the analysis of the influence of various weather conditions (atmospheric pressure, air temperature and precipitation) on the severity of road accidents in the city of St. Petersburg. The purpose of the work is to identify patterns between meteorological factors and the severity of the consequences of an accident. The paper uses data analysis methods: descriptive statistics, data visualization, and calculation of the p-value to test hypotheses. The analysis showed that there were no statistically significant differences in the severity distribution of accidents in terms of precipitation. The differences between precipitation regimes and "dry" conditions do not reach significance. There are also no differences in atmospheric pressure (758 – 763 mmHg) ($p \approx 0.8$); the high proportion of accidents at "non-normal" pressures reflects the distribution of observations, rather than an increase in severity. The temperature shows a statistically significant difference between the groups ($p = 0.013$). To clarify the role of weather, models with higher time details (precipitation intensity, transitions through 0 °C) are needed, taking into account traffic, visibility, road type, and seasonality. In general, an increased risk of severe and fatal accidents is observed at temperatures of 0 – 5 °C and precipitation, especially intense. The findings can be used to adapt urban infrastructure to adverse weather events and develop warning systems for drivers.

Keywords: traffic accidents, weather conditions, atmospheric pressure, air temperature, precipitation, transport safety.

Citation: Savchenko, N., Kudryavtseva, T, Rodionova, M., 2025. The influence of meteorological factors on the severity of road accidents. Sustainable Development and Engineering Economics 3, 1. <https://doi.org/10.48554/SDEE.2025.3.1>

This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

© Savchenko N., Kudryavtseva T, Rodionova M., 2025. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

1. Введение

Объектом исследования являются дорожно-транспортные происшествия (ДТП), происходящие при различных погодных условиях, таких как осадки, температура воздуха и атмосферное давление. Изучаются особенности возникновения ДТП в зависимости от погодных факторов и сопутствующих дорожных условий.

Актуальность исследования обоснована тем, что проблема снижения числа дорожно-транспортных происшествий остается одной из приоритетных задач в области обеспечения дорожной безопасности. Погодные условия влияют на риск ДТП, однако степень и характер этого влияния недостаточно полно исследованы.

Научная проблема заключается в недостаточной изученности влияния погодных условий на тяжесть дорожных происшествий. Требуется выявить зависимости между типом погодных явлений и вероятностью наступления тяжелых и летальных исходов ДТП по Санкт-Петербургу.

В рамках исследования будут решены следующие задачи:

- анализ существующих научных исследований по влиянию погодных факторов на аварийность;
- исследование изменения частоты и тяжести ДТП в зависимости от уровня осадков, температуры и атмосферного давления;
- выявление ключевых погодных условий, вызывающих наибольший риск тяжелых и летальных исходов ДТП.

2. Обзор литературы

Изучение влияния погодных факторов на тяжесть дорожно-транспортных происшествий является одной из актуальных задач транспортной безопасности. В последние годы в мировой научной литературе появился ряд исследований, посвященных отдельным аспектам этой проблемы: влиянию температуры, осадков или давления.

Дорожно-транспортные происшествия остаются одной из ведущих причин смертности и травматизма по всему миру. Среди множества факторов, влияющих на тяжесть ДТП, особое место занимают погодные условия, такие как атмосферное давление, температура воздуха и количество осадков. Понимание их роли в формировании риска тяжелых аварий может способствовать разработке более эффективных мер по предупреждению ДТП.

Атмосферное давление оказывает прямое влияние как на состояние водителей, так и на дорожные условия. Исследования показали, что снижение атмосферного давления ниже нормы на 5–10 мм рт. ст. связано с ухудшением психофизиологического состояния водителей, снижением концентрации внимания и увеличением времени реакции (Cuensa et al., 2018; Didyk et al., 2012). Быстрые колебания давления также могут вызывать головные боли и обострение хронических заболеваний, что дополнительно увеличивает вероятность серьезных ДТП (Becker et al., 2022).

Кроме того, ряд исследований подчёркивает, что атмосферное давление в комплексе с другими погодными условиями (осадки, влажность, температура) оказывает влияние на дорожную безопасность (Stevens et al., 2019). При этом резкие изменения давления могут усиливать стрессовое состояние водителей, снижая их адаптивные возможности (Funakubo et

al., 2021). Влияние низкого давления также связано с ухудшением когнитивных функций и психомоторных реакций, что особенно критично при выполнении сложных задач управления транспортным средством (Costello et al., 2020).

Отдельное внимание уделяется моделированию зависимости между погодными условиями и уровнем аварийности с использованием машинного обучения, что позволяет выявлять нелинейные зависимости и прогнозировать риск аварий в зависимости от изменений метеопараметров (Cai et al. 2024). Таким образом, нестабильность или пониженное атмосферное давление прямо коррелируют с увеличением тяжести ДТП и требуют учёта при планировании мер безопасности.

Температура воздуха оказывает значительное влияние как на дорожное покрытие, так и на физиологическое состояние водителей. Низкие температуры приводят к обледенению дорог, снижению коэффициента сцепления шин с покрытием и увеличению тормозного пути, что резко повышает риск тяжёлых аварий, особенно в ночное время (Theofilatos, 2017). Кроме того, при отрицательных температурах возрастает вероятность образования чёрного льда, который визуалью почти незаметен, что делает водителей более уязвимыми (Usman et al., 2010).

Высокие температуры, в свою очередь, оказывают влияние на психофизиологическое состояние водителей: вызывают переутомление, раздражительность, снижение внимания, ускоренное обезвоживание и ухудшение когнитивных функций, что увеличивает вероятность ошибок и ДТП (Khattak et al., 2020). Исследования показывают, что при экстремально высоких температурах (свыше 30 °C) риск серьёзных аварий возрастает на 30–50% по сравнению с умеренными температурными условиями (Khan and Ahmed, 2023).

Кроме того, высокая температура влияет на состояние дорожного покрытия, особенно в жарком климате: асфальт может размягчаться, что снижает прочность покрытия и повышает риск его деформации (Bai et al., 2022). Такие изменения приводят к ухудшению сцепления шин с дорогой, увеличению тормозного пути и потенциальному росту аварийности. При экстремально низких температурах дорожные материалы становятся более хрупкими, что повышает риск образования трещин, выбоин и других дефектов, усугубляющих условия движения (Usman et al., 2010).

Важно учитывать также взаимодействие температуры с другими погодными факторами — влажностью, осадками, видимостью — поскольку это формирует комплексные условия, влияющие на безопасность движения (Carrodano, 2024). Например, в дождливую погоду при высоких температурах увеличивается вероятность аквапланирования, а в мороз при высокой влажности — образование наледи. Некоторые работы применяют методы машинного обучения для моделирования сложных взаимосвязей между погодными условиями и аварийностью, что открывает возможности для прогнозирования риска ДТП в реальном времени (Theofilatos and Yannis, 2014).

Таким образом, температурные экстремумы (как высокие, так и низкие) оказывают многоплановое влияние на безопасность дорожного движения — через физиологическое воздействие на водителей, физическое изменение дорожного покрытия и сложные погодные комбинации — и требуют особого внимания при разработке превентивных мер, планировании дорожных работ и настройке систем раннего предупреждения.

Количество и тип осадков являются одними из наиболее значимых погодных факторов, влияющих на тяжесть ДТП. Сильный дождь снижает коэффициент сцепления шин с дорогой,

ухудшает видимость, увеличивает тормозной путь, а также способствует образованию водяных плёнок, провоцируя аквапланирование (Omranian et al., 2018; Sangkharat et al., 2021). При интенсивных дождях накапливается большое количество поверхностной воды, что снижает эффективность торможения и увеличивает риск потери управления автомобилем, особенно на скоростных дорогах (Wang et al., 2022).

Некоторые исследования показывают: умеренный дождь иногда приводит к большему количеству тяжёлых аварий, чем ливень, поскольку водители часто недооценивают опасность умеренных осадков и не корректируют стиль вождения, например, не снижают скорость или не увеличивают дистанцию (Becker et al., 2020). При этом сильные дожди, несмотря на более экстремальные условия, могут в некоторых случаях провоцировать более осторожное поведение водителей, но всё равно остаются одним из главных факторов увеличения тяжести ДТП (Black et al., 2017).

Дополнительный риск создают особенности дорожной инфраструктуры: системы дренажа часто не справляются с быстрым притоком воды во время ливней, что приводит к локальным наводнениям, особенно в городах (Wu et al., 2018). Кроме того, интенсивные дожди могут затопить разметку на дороге, делая ее невидимой, что дезориентирует водителей и увеличивает риск боковых столкновений и съезда с полосы.

Сильные дожди оказывают влияние и на общее психофизиологическое состояние водителей, вызывая повышенное напряжение, усталость и стресс, что дополнительно снижает их способность адекватно реагировать на сложные дорожные условия. С учётом этих факторов современные исследования рекомендуют внедрение адаптивных предупреждающих систем, которые автоматически информируют водителей о рисках при экстремальных осадках (Zeng et al., 2020).

Таким образом, сильные дожди оказывают многоплановое влияние на тяжесть ДТП – через физические изменения дорожных условий, проблемы инфраструктуры и воздействие на поведение водителей – и требуют системного подхода к управлению дорожной безопасностью.

Объединяя различные погодные факторы, исследователи подчёркивают, что именно сочетание экстремальных условий – таких как низкое атмосферное давление, высокие или низкие температуры и интенсивные осадки – многократно увеличивает тяжесть последствий ДТП (Bergel-Nayat et al., 2013; Jaroszweski et al., 2014). Влияние отдельных погодных переменных, таких как дождь или жара, уже само по себе существенно, но их комбинация создаёт эффекты, которые превышают простую сумму рисков (Qiu and Nixon, 2008).

Так, например, сильный дождь в сочетании с низкими температурами может приводить к образованию ледяной корки на дорожном покрытии, что резко снижает сцепление колёс с дорогой (Jin and McGroom, 2024). При высоких температурах в условиях низкого давления водители испытывают повышенную утомляемость, что в сочетании с ухудшенными дорожными условиями, например из-за ливней, делает аварии более вероятными и тяжёлыми.

Кроме того, изменения климата и рост экстремальных погодных явлений усиливают нагрузку на транспортную инфраструктуру, снижая её устойчивость и увеличивая риски для участников дорожного движения (Jaroszweski et al., 2014). В ответ на эти вызовы современные исследования акцентируют внимание на необходимости интегрированного подхода, например, разработка адаптивных систем управления движением, которые учитывают несколько

погодных факторов одновременно, а также совершенствовании материалов дорожного покрытия, способных лучше выдерживать воздействие экстремальных температур и осадков (Qiu and Nixon, 2008).

Таким образом, сочетание неблагоприятных метеоусловий требует комплексного анализа и системных мер по повышению безопасности дорожного движения, включая мониторинг, прогнозирование и адаптацию инфраструктуры.

На основании литературного обзора к собственному исследованию можно выдвинуть следующие гипотезы:

1. Доля тяжелых ДТП будет расти при отклонении от нормального значения атмосферного давления.
2. Существует интервал температуры, при котором доля тяжелых ДТП будет возрастать.
3. Существует диапазон интенсивности осадков, при котором вероятность тяжелых ДТП возрастет.

3. Материалы и методы

В рамках исследования были использованы методы описательной статистики, визуализации данных и расчет r -значения для проверки гипотез.

Описательная статистика применялась для первичного анализа структуры данных, выявления распределения показателей температуры, атмосферного давления и осадков.

Методы визуализации использовались для наглядного отображения взаимосвязей между погодными условиями и тяжестью ДТП, что позволило выявить скрытые закономерности.

Выбор указанных методов обусловлен их соответствием типу обрабатываемых данных, научной обоснованностью, распространённостью в мировой практике исследования факторов ДТП.

4. Результаты

Исследование основано на данных по ДТП в городе Санкт-Петербург с 2015 по 2024 год, объединенных с данными по погодным условиям в городе. Выборка включает в себя 50 705 наблюдений. Из них 32 743 наблюдения имели легкий исход ДТП, 16 171 — тяжелый и 1 791 — летальный.

Проанализируем влияние атмосферного давления на тяжесть ДТП.

Нормальный диапазон атмосферного давления для Санкт-Петербурга составляет 758–763 мм рт. ст.¹.

Проверим с помощью r -значения значимость фактора «Атмосферное давление» для тяжести ДТП. В основной проверке оценим независимость распределения тяжести ДТП от режима атмосферного давления. По сводной таблице наблюдений получено: для лёгких ДТП — 8 072 случая при давлении в пределах нормы и 24 671 (75,35%) вне нормы; для тяжёлых ДТП — 4 029 и 12 142 (75,09%) соответственно; для ДТП с погибшими — 447 и 1 344 (75,04%)

¹ <https://sites.google.com/view/szsmkr/норма-атмосферного-давления-в-санкт-петербурге-сейчас>

соответственно, таким образом, подавляющее большинство ДТП (>75%) произошло при ненормальном атмосферном давлении.

Статистическая проверка не выявила значимых различий в распределении тяжести между режимами давления ($p = 0.8007$); при укрупнении исходов до двух уровней («тяжёлые + с погибшими» против «лёгких») результат также остался статистически незначимым ($p = 0.5126$).

Преобладание (>75%) ДТП при «ненормальном» атмосферном давлении преимущественно отражает распределение времени наблюдений и сопутствующие погодные режимы, а не самостоятельное влияние давления. Интервал 758–763 мм рт. ст. слишком узок относительно естественной суточно-сезонной вариабельности, поэтому значительная доля наблюдений приходится на состояние «вне нормы», где накапливается больше событий. Кроме того, отклонения давления часто синхронны с фронтами (осадки, ухудшение видимости, переход через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и гололёд) и временными пиками трафика, что повышает абсолютное число аварий без изменения распределения тяжести. Вследствие этого давление следует учитывать как ковариату и включать в анализ.

Рассмотрим влияние температуры на тяжесть ДТП.

Разделим данные по температуре с интервалом 5 градусов и посмотрим распределение по тяжести в каждом из интервалов (рисунки 1 и 2).

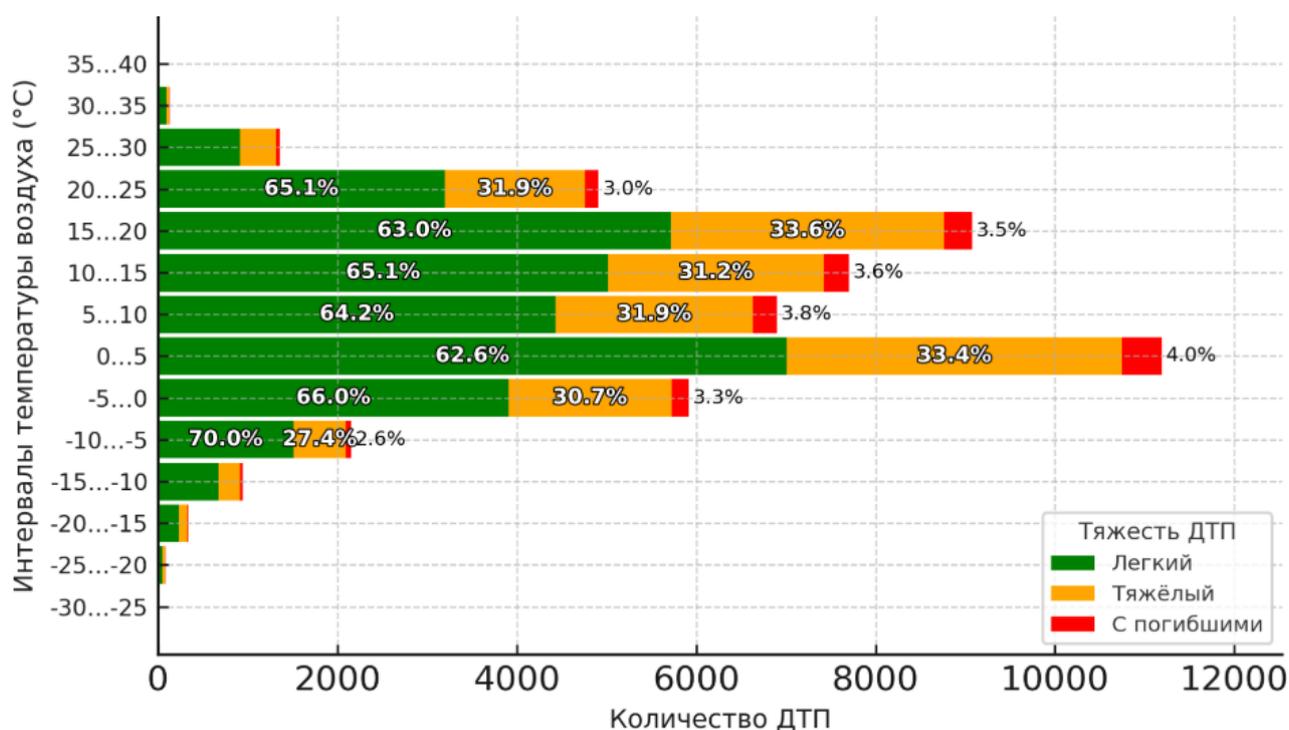


Рисунок 1. Тяжесть ДТП по температурным интервалам

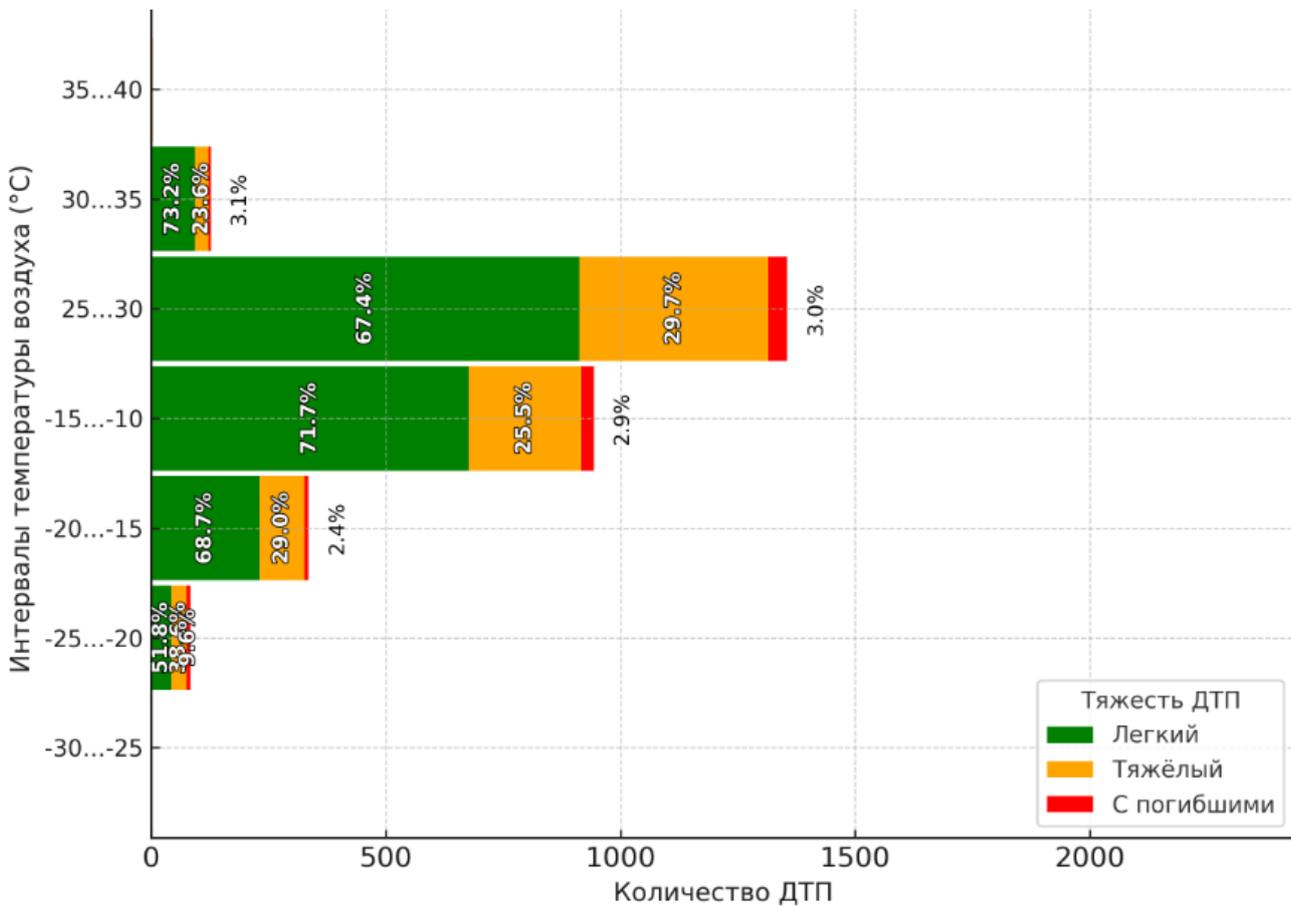


Рисунок 2. Тяжесть ДТП по температурным интервалам, укрупненная по интервалам, с малым количеством наблюдений

Анализ распределения тяжести ДТП по интервалам температуры воздуха показывает устойчивую зависимость тяжести происшествий от погодных условий. Для оценки использованы интервалы шириной 5 °C, что соответствует общепринятой метеорологической практике и обеспечивает баланс между статистической устойчивостью и наглядностью результатов. Более мелкие интервалы (например, 1 °C) приводят к излишней фрагментации данных, а более крупные (10–15 °C) сглаживают важные различия, особенно в околонулевой зоне.

По данным рисунков 1 и 2 можно сделать выводы, что во всех температурных интервалах лёгкие ДТП остаются доминирующей категорией, однако доля тяжёлых и смертельных случаев существенно варьирует. Наибольшие значения наблюдаются при экстремально низких температурах и в зоне перехода через ноль. В тёплый период года структура происшествий более стабильна, хотя умеренно тёплые условия (10–25 °C) также связаны с заметным ростом тяжёлых и смертельных исходов.

Можно выделить наиболее опасные температурные зоны, по полученным результатам. Таковыми оказались:

1. -25...-20 °C — наиболее критический интервал: почти 48% всех происшествий здесь заканчиваются тяжёлыми последствиями или гибелью. Несмотря на сравнительно небольшое абсолютное число ДТП, структурно этот диапазон является самым опасным.

2. 0...5 °C — зона максимальной аварийности: всего зарегистрировано 11 194 случая, что составляет крупнейший пик в абсолютных значениях. Здесь доля тяжёлых и смертельных

ДТП достигает 37%, что связывается с образованием гололёда, перепадами влажности и резким снижением сцепления колёс с дорогой.

3. 5...10 °С и 15...20 °С — оба интервала характеризуются близкой долей тяжёлых и смертельных ДТП (37%). Это диапазоны, при которых погодные условия не экстремальны, однако сохраняется высокая интенсивность движения, что увеличивает риск тяжёлых последствий.

4. 20...25 °С — доля тяжёлых и смертельных ДТП составляет 35%, что также выше среднего уровня.

При температуре выше 25...30°С тяжёлые и смертельные ДТП составляют меньшую часть структуры, а преобладание лёгких происшествий становится более выраженным.

Температура воздуха, рассмотренная как непрерывная переменная, демонстрирует статистически значимое различие между группами тяжести исходов ДТП: при сравнении средних температур по трём категориям тяжести получено $p = 0.0130$, что указывает на наличие связи температуры с распределением тяжести среди зарегистрированных происшествий.

Перейдем к анализу по осадкам.

В выборке оказалось, что легких ДТП без осадков произошло 28 486 (87%), с осадками — 4 257 (13%), с погибшими без осадков — 1 573 (87,2%) и с осадками 218 (12,2%), тяжелых с осадками — 2 193 (86,4%) и без осадков — 2 193 (13,6%). Таким образом, Доля ДТП при наличии осадков похожа для всех типов тяжести (12–14%) (рисунок 3). Тяжёлые и летальные аварии не растут сильно на фоне осадков — влияние осадков заметное, но не радикальное.

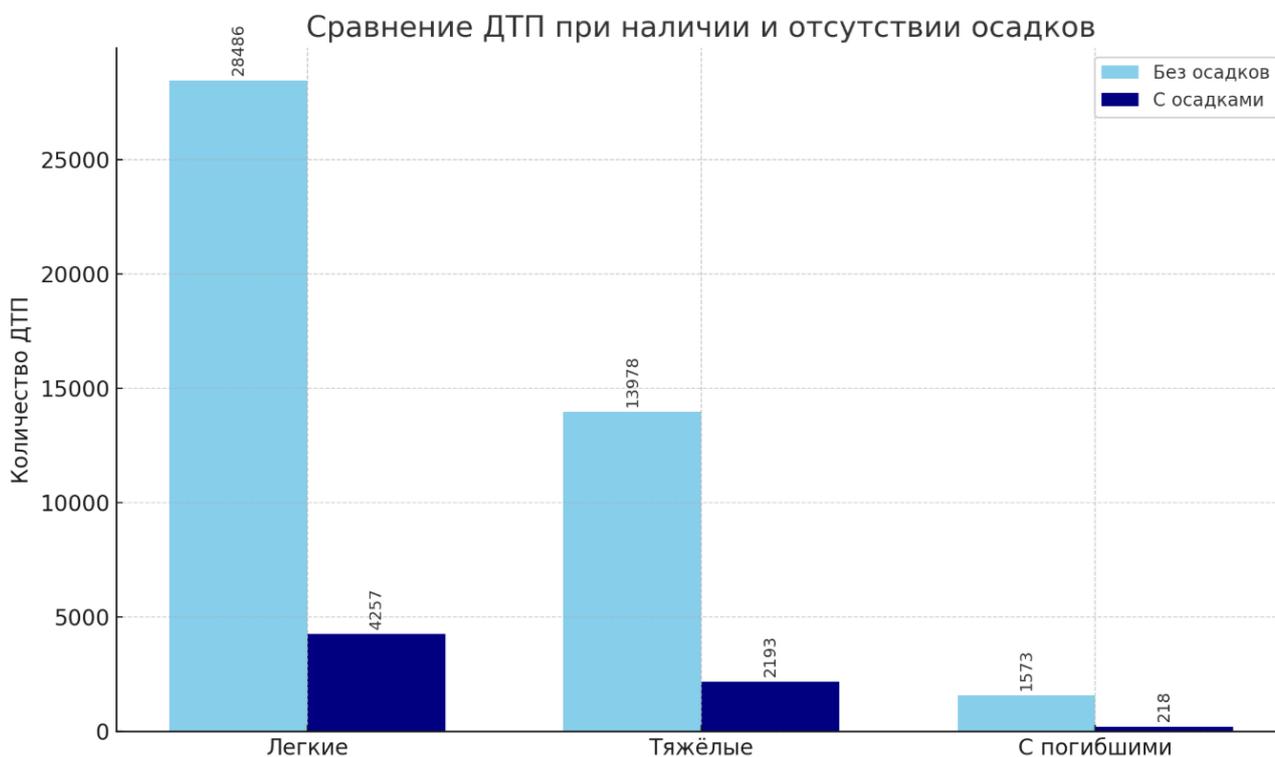


Рисунок 3. Сравнительная столбчатая диаграмма для осадков

Разделим осадки на группы и также построим столбчатую диаграмму (рисунок 4):

– нет осадков: значение = 0;

- слабые: $0 < \text{значение} \leq 2$ мм (лёгкий морозящий дождь);
- умеренные: $2 < \text{значение} \leq 10$ мм (умеренный дождь);
- сильные: значение > 10 мм (ливень).

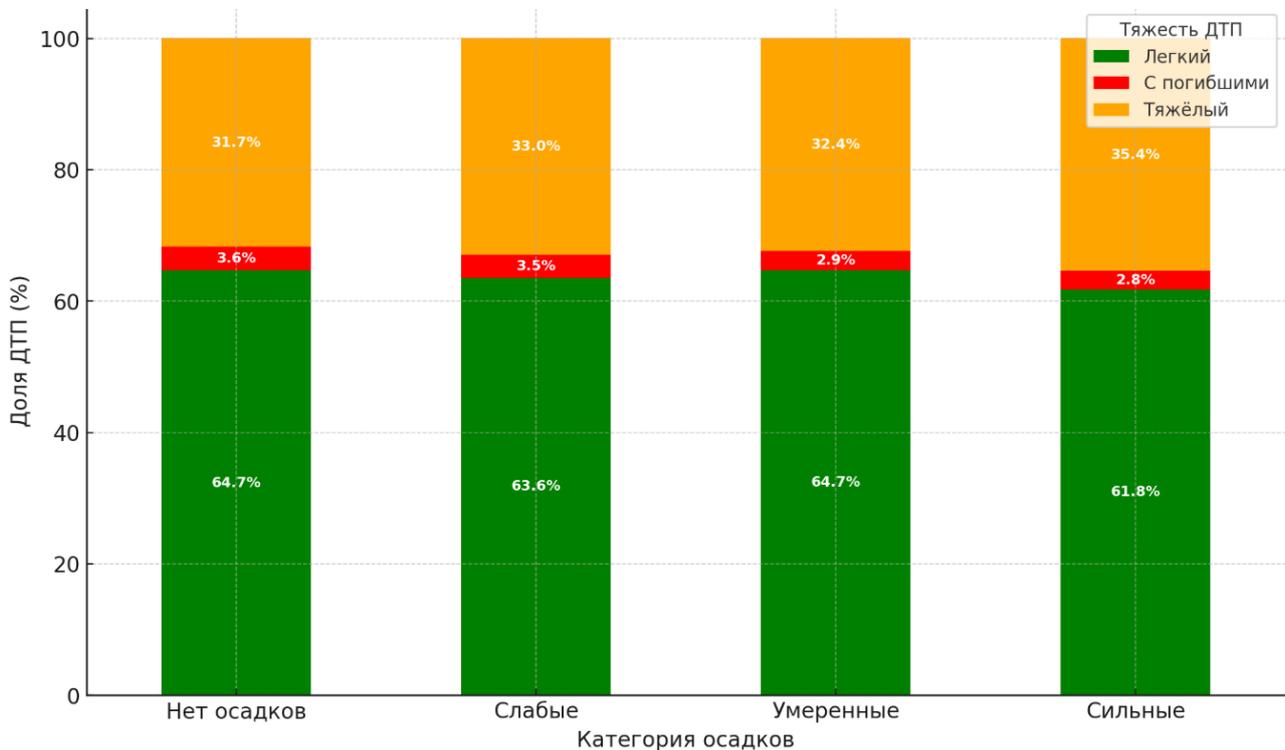


Рисунок 4. Диаграмма процентного распределения ДТП по категориям осадков и тяжести

По результатам, показанным на рисунке 4 можно сделать выводы:

- При сильных осадках доля тяжёлых и смертельных ДТП выше.
- При умеренных и слабых осадках — в основном лёгкие ДТП.
- При отсутствии осадков фиксируется часть тяжёлых и смертельных ДТП.

Анализ, представленный на рисунке 4, демонстрирует ожидаемую описательную картину: основная масса ДТП приходится на «сухие» периоды, при этом структура тяжести близка к 65% лёгких, 32% тяжёлых и 3–4% со смертельным исходом; при «слабых» осадках наблюдается умеренное увеличение доли тяжёлых исходов; при «сильных» осадках доля тяжёлых достигает максимума. Наши расчёты по суточным данным дают сопоставимые пропорции для ключевых режимов:

без осадков — 64.7% лёгких, 31.7% тяжёлых, 3.6% летальных;

для умеренных осадков — 64.7% лёгких, 32.4% тяжёлых, 2.9% летальных;

для сильных осадков — 61.8% лёгких, 35.4% тяжёлых, 2.8% летальных.

Вместе с тем формальная проверка независимости распределений тяжести между четырьмя режимами осадков не достигает статистической значимости ($p = 0.329$); попарные сравнения со «сухими» также незначимы (p -значение от 0.22 до 0.53). Это снимает кажущееся противоречие: визуальная тенденция к росту доли тяжёлых исходов при усилении осадков действительно присутствует на уровне описательной статистики, но при текущей

дискретности и метрике признака «осадки» она статистически не подтверждается. Ключевыми причинами являются малая численность наблюдений в категории «сильные осадки» (что ограничивает мощность тестов) и эффект агрегирования: суточная сумма сглаживает внутрисуточные пики интенсивности, релевантные для механизма риска. Доминирование абсолютного числа аварий в «сухие» дни объясняется большей продолжительностью сухих условий во времени наблюдения. Для строгой проверки гипотезы о возрастании тяжести при дожде требуется более детальная временная привязка интенсивности осадков к моментам ДТП и многофакторное моделирование с контролем сопутствующих погодных и дорожных факторов.

Сделаем вывод по общему влиянию на тяжелые и летальные ДТП приведенных выше факторов.

В совокупности результаты по тяжёлым и летальным исходам указывают на следующее. По осадкам — при использованной агрегированной метрике (суточная сумма) статистически значимых различий в распределении тяжести среди уже произошедших ДТП не выявлено: при объединении всех осадков против «без осадков» получено $p = 0.1038$; при одновременном сопоставлении четырёх режимов («без осадков», «слабые», «умеренные», «сильные») — $p = 0.329$; попарные сравнения со «сухими» условиями лежат в диапазоне p -значения от 0.22 до 0.53. Наблюдаемая описательная тенденция к большему удельному весу тяжёлых исходов в сильный дождь не достигает статистической подтвержденности, что объяснимо малым числом таких эпизодов и сглаживанием кратковременных пиков интенсивности при суточной агрегации. По атмосферному давлению — при дихотомизации относительно 758–763 мм рт. ст различий в структуре тяжести также не обнаружено ($p = 0.8007$; при объединении «тяжёлые + летальные» против «лёгких» $p = 0.5126$); высокая доля ДТП при давлениях «вне нормы» отражает скорее узость выбранного коридора и распределение времени наблюдения, чем изменение тяжести исходов. Температура, рассмотренная как непрерывная переменная, демонстрирует статистически значимое различие между группами тяжести ($p = 0.0130$), это статистически значимый, но малый по размеру эффект, указывающий на весьма слабое перераспределение долей, без существенного практического смещения в сторону тяжёлых и летальных исходов.

Исходя из этого, дальнейшие выводы о роли погоды в тяжёлых и летальных ДТП следует строить на моделях, учитывающих временную детализацию погодных показателей (интенсивность осадков по часам/минутам, переходы через 0°C), трафик и сопутствующие факторы (видимость, тип дороги, сезонность), а также возможные нелинейности и взаимодействия. Более детализированное многофакторное моделирование позволит отличить ограничения текущей агрегированной оценки от истинного отсутствия влияния и, при наличии связи, строго оценить вклад каждого фактора именно в тяжёлые и летальные исходы.

Таким образом, можно сделать вывод, что наибольший риск тяжёлых и летальных ДТП возникает при температуре около $0...5^{\circ}\text{C}$ в сочетании с осадками, особенно интенсивными: переход через 0°C (слякоть/гололёд) резко ухудшает сцепление. По данным Санкт-Петербурга погодные факторы сами по себе существенного вклада в тяжесть не показали; при «сухих» условиях доля тяжёлых исходов ниже.

5. Обсуждение

Современные данные уверенно показывают, что осадки повышают риск ДТП, причём ключевую роль играет интенсивность: на материале США риск смертельных аварий при выпадении осадков выше примерно на 34% (Pechatnova et al., 2020), а при переходе от «просто дождя» к сильным ливням относительный риск растёт ступенчато и может достигать 81% (Eck et al. 2022). Это согласуется с мета-обзорами: дождь и снег системно повышают частоту аварий, тогда как по тяжести последствий под дождём единый эффект не фиксируется (иногда доля тяжёлых даже ниже из-за снижения скоростей), что подчёркивает различие между влиянием погоды на частоту и на структуру исходов (Becker et al., 2022). Существенным модификатором выступает температура: при осадках вблизи нуля (0...5 °C) резко ухудшается сцепление (слякоть/гололёд), и именно такие режимы связаны с наиболее неблагоприятными показателями травматизма; для снегопада риск травм выше при $T \leq 0^\circ\text{C}$, чем при $T > 0^\circ\text{C}$ (Lee et al., 2015).

Что касается атмосферного давления, то в роли самостоятельного предиктора оно демонстрирует слабую и нестабильную связь: в ряде работ давление используется как «негативный трассер» без обнаружения ассоциации с риском ДТП (Redelmeier and Raza, 2017), а ранние исследования не находили устойчивых эффектов барометрической высоты на аварийность (Alonso, 1993). В совокупности литература поддерживает практический вывод: приоритетное внимание следует уделять периодам интенсивных осадков, особенно при температурах около 0°C; давление целесообразно учитывать как вспомогательную ковариату фронтальной активности, но не как основной фактор тяжёлых исходов.

Таким образом, наши результаты показывают: при суточной агрегации осадки и барический режим не дают статистически подтверждённого сдвига распределения тяжести среди уже произошедших ДТП, тогда как температура как непрерывный предиктор значима ($p = 0.0130$); наибольшая уязвимость прослеживается при сочетании осадков с температурой около 0...5 °C. Эти выводы подчёркивают необходимость превентивных мер, ориентированных на такие сочетания условий, и дальнейших исследований с расширением выборки и повышением временной детализации осадков/температуры/давления (учитывая давление как вспомогательную ковариату).

6. Заключение

В анализируемой выборке выявлены следующие итоги. По суточным данным осадков статистически подтверждённого сдвига в распределении тяжести среди уже произошедших ДТП не обнаружено (средние суточные суммы: $p = 0.3804$; «любые осадки» против «без осадков»: $p = 0.1038$), при том, что описательно доля тяжёлых исходов возрастает при сильных осадках — эффект, вероятно, сглаживается суточной агрегацией и малой представленностью интенсивных эпизодов. По атмосферному давлению различий в структуре тяжести между периодами внутри и вне интервала 758–763 мм рт. ст. не выявлено ($p = 0.8007$; при объединении тяжёлых и летальных против легких – $p = 0.5126$); преобладание числа ДТП «вне нормы» объясняется узостью коридора и тем, что значительная часть времени наблюдений лежит за его пределами. По температуре при рассмотрении как непрерывного предиктора получено статистически значимое различие средних между группами тяжести ($p = 0.0130$), однако величина эффекта крайне мала; максимум числа тяжёлых и летальных случаев наблюдается при 0...5 °C, что согласуется с ухудшением сцепления при переходах через 0 °C и наличием осадков.

Практически это означает: приоритетными для профилактики тяжёлых и летальных исходов являются эпизоды осадков вблизи 0...5 °С. Для более точной и причинно интерпретируемой оценки влияния рекомендуется усовершенствовать метод исследования: повысить временную детализацию осадков (интенсивность по часам/минутам), учитывать экспозицию трафика, тип дороги, видимость и сезонность, моделировать взаимодействия, а давление использовать как вспомогательную ковариату фронтальной активности. Такой подход позволит отделить эффект агрегации от реального влияния и количественно оценить вклад каждого фактора именно в риск тяжёлых и летальных ДТП. Результаты исследования могут быть использованы при разработке превентивных мер и стратегий прогнозирования аварийности. Они также актуальны для планирования работы экстренных служб, адаптации дорожной инфраструктуры и информирования водителей в периоды повышенного риска.

Изучение влияния метеорологических факторов на тяжесть ДТП представляет собой актуальное направление прикладных и теоретических исследований в области транспортной безопасности. В условиях растущей автомобилизации и климатической нестабильности выявление погодных условий, способствующих возникновению аварий с тяжёлыми последствиями, приобретает особую значимость.

В этой связи представляется обоснованным развитие данного исследования по нескольким направлениям:

– Пространственный анализ риска ДТП. На следующем этапе возможно проведение пространственно-временного анализа с использованием географических информационных систем. Это позволит выявить территориальные кластеры ДТП с повышенной чувствительностью к погодным условиям, а также определить участки дорог с наибольшим риском при конкретных метеофакторах.

– Комбинированное влияние погодных и инфраструктурных факторов. Необходимо учитывать не только погодные условия, но и характеристики дорожной сети: тип покрытия, наличие освещения, плотность дорожного движения, техническое состояние дороги. Комплексный подход даст более точную оценку вклада каждого фактора в тяжесть аварий.

– Анализ динамики погодных изменений. Кроме абсолютных значений метеопоказателей важно рассматривать скорость и амплитуду их изменений. Резкое понижение температуры, скачки давления или внезапные осадки могут создавать более опасные условия, чем стабильно неблагоприятная погода.

Список литературы

- Alonso, Y., 1993. Geophysical Variables and Behavior: LXXII. Barometric Pressure, Lunar Cycle, and Traffic Accidents. *Perceptual and Motor Skills* 77 (2), 371–376. <https://doi.org/10.2466/pms.1993.77.2.371>
- Bai, Y., Zhang Y., Luo, D., 2022. Analysis of Coupling Effect and Heavy Load of High-Temperature Stability of Asphalt Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering* 2022, 5722752. <https://doi.org/10.1155/2022/5722752>
- Becker, N., Rust, H.W., Ulbrich, U., 2020. Predictive modeling of hourly probabilities for weather-related road accidents. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20 (10), 2857–2871. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2857-2020>
- Becker, N., Rust, H.W., Ulbrich, U., 2022. Weather impacts on various types of road crashes: A quantitative analysis using generalized additive models. *European Transport Research Review* 14 (1), 37. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00561-2>
- Bergel-Hayat, R., Debarh, M., Antoniou, C., Yannis, G., 2013. Explaining the road accident risk: Weather effects. *Accident Analysis & Prevention* 60, 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.006>
- Black, A.W., Villarini, G., Mote, Th.L., 2017. Effects of Rainfall on Vehicle Crashes in Six U.S. States. *Weather, Climate, and Society* 9 (1), 53–70.
- Cai, J., Ong, G.P., Wu, D., Zhao, L., Zhao, H., 2024. Assessing braking performance on wet-road through water-depth estimation and vehicle-pavement dynamic simulation. *International Journal of Pavement Engineering* 25 (1), 2421896. <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2421896>
- Carrodano, C., 2024. Data-driven risk analysis of nonlinear factor interactions in road safety using Bayesian networks. *Sci. Rep.* 14, 18948. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69740-6>
- Costello, J.T., McMorris, T., Ando, A., Williams, T.B., Corbett, J., 2020. Hypoxia and cognitive performance – the role of barometric pressure. *The*

- Journal of Physiology, 598 (5), 1021–1022. <https://doi.org/10.1113/JP279358>
- Cuenca, L.G., Puertas, E., Aliane, N., Andres, J.F., 2018. Traffic Accidents Classification and Injury Severity Prediction, in: 2018 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). IEEE, pp. 52–57. <https://doi.org/10.1109/ICITE.2018.8492545>
- Didyk, L., Gorgo, Yu., Prigancova, A., Tunyi, I., Vaczyova, M., Mamilov, S., Dirckx, J., 2012. The Effects of Atmospheric Pressure Fluctuations on Human Behaviour Related to Injury Occurrences: Study on the Background of Low and Moderate Levels of Geomagnetic Activity. International Scholarly Research Network 2012, 791524. <https://doi.org/10.5402/2012/791524>
- Eck, M.A., Konrad, Ch.E., Rayne, S., Black, A.W., 2022. Understanding the Role of Rainfall Intensity on Relative Car Crash Risk in the Carolinas. Weather, Climate, and Society 14 (3), 965–978. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-22-0025.1>
- Funakubo, M., Sato, J., Mizumura, K., Suzuki, N., Messlinger, K., 2021. Craniofacial sensations induced by transient changes of barometric pressure in healthy subjects – A crossover pilot study. Cephalgia Reports 4. <https://doi.org/10.1177/25158163211000362>
<https://doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0035.1>
- Jaroszowski, D., Hooper, E., Chapman, L., 2014. The impact of climate change on urban transport resilience in a changing world. Progress in Physical Geography: Earth and Environment 38 (4), 448–463. <https://doi.org/10.1177/0309133314538741>
- Jin, M., McBroom, D.G., 2024. Investigating Road Ice Formation Mechanisms Using Road Weather Information System (RWIS) Observations. Climate 12 (5), 63. <https://doi.org/10.3390/cli12050063>
- Khan, M.N., Ahmed, M.M., 2023. A novel deep learning approach to predict crash severity in adverse weather on rural mountainous freeway. Journal of Transportation Safety & Security 15 (8), 795–825. <https://doi.org/10.1080/19439962.2022.2129891>
- Khattak, A.J., Mohamed, A.A., Khattak, A., 2020. Driver impairment detection and safety enhancement through comprehensive volatility analysis. Collaborative Sciences Center for Road Safety, Report no. CSCRS-R23.
- Lee, W.-K., Lee, H.-A., Hwang, S., Kim, H., Lim, Y.-H., Hong, Y.-Ch., Ha, E.-H., Park, H., 2015. Does Temperature Modify the Effects of Rain and Snow Precipitation on Road Traffic Injuries? Journal of Epidemiology 25 (8), 544–552. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20140244>
- Omrnian, E., Khattak, A., Alshareef, M., 2018. Exploring rainfall impacts on the crash risk on Texas roadways: A crash-based matched-pairs analysis approach. Accident Analysis & Prevention 117, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.03.030>
- Qiu, L., Nixon, W.A., 2008. Effects of Adverse Weather on Traffic Crashes: Systematic Review and Meta-Analysis. Transportation Research Record 2055 (1), 139–146. <https://doi.org/10.3141/2055-16>
- Redelmeier, D.A., Raza, S., 2017. Life-threatening motor vehicle crashes in bright sunlight. Medicine 96 (1), e5710. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000005710>
- Sangkharat, K., Thornes, J.E., Wachiradilok, P., Pope, F.D., 2021. Determination of the impact of rainfall on road accidents in Thailand. Heliyon 7 (2), e06061. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06061>
- Stevens, S.E., Schreck III, C.J., Saha, S., Bell, J.E., Kunkel, K.E., 2019. Precipitation and Fatal Motor Vehicle Crashes: Continental Analysis with High-Resolution Radar Data. Bulletin of the American Meteorological Society 100 (8), 1453–1461. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0001.1>
- Theofilatos, A., 2017. Incorporating real-time traffic and weather data to explore road accident likelihood and severity in urban arterials. Journal of Safety Research, 61, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.02.003>
- Theofilatos, A., Yannis, G., 2014. A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. Accident Analysis & Prevention 72, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.017>
- Usman, T., Fu, L., Miranda-Moreno, L.F., 2010. Quantifying the safety effects of winter road maintenance using data from instrumented vehicles. Accident Analysis & Prevention 42 (6), 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.05.008>
- Wang S. et al. Coupling impacts of spray and rainfall on road visibility and vehicle speeds: a simulation-based analysis // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2022. – Т. 49. – №. 7. – С. 1220-1230. <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0402>
- Wu, Y., Abdel-Aty, M., Lee, J., 2018. Crash risk analysis during rain conditions using real-time weather and traffic data. Accident Analysis & Prevention 114, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.05.004>
- Zeng, Q., Quddus, M.A., Ison, S., 2020. Investigating the impacts of real-time weather conditions on freeway crash severity: A Bayesian spatial analysis. Transp. Res. Part C Emerg. Technol. 112, 47–65. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082768>
- Печатнова Е.В., Сафронов К.Э. Оценка влияния количества осадков на аварийность на дорогах вне населенных пунктов // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17. № 4. С. 512–522. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522>

References

- Alonso, Y., 1993. Geophysical Variables and Behavior: LXXII. Barometric Pressure, Lunar Cycle, and Traffic Accidents. Perceptual and Motor Skills 77 (2), 371–376. <https://doi.org/10.2466/pms.1993.77.2.371>
- Bai, Y., Zhang Y., Luo, D., 2022. Analysis of Coupling Effect and Heavy Load of High-Temperature Stability of Asphalt Mixture. Advances in Materials Science and Engineering 2022, 5722752. <https://doi.org/10.1155/2022/5722752>
- Becker, N., Rust, H.W., Ulbrich, U., 2020. Predictive modeling of hourly probabilities for weather-related road accidents. Natural Hazards and Earth System Sciences 20 (10), 2857–2871. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2857-2020>
- Becker, N., Rust, H.W., Ulbrich, U., 2022. Weather impacts on various types of road crashes: A quantitative analysis using generalized additive models. European Transport Research Review 14 (1), 37. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00561-2>
- Bergel-Hayat, R., Debarh, M., Antoniou, C., Yannis, G., 2013. Explaining the road accident risk: Weather effects. Accident Analysis & Prevention 60, 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.006>
- Black, A.W., Villarini, G., Mote, Th.L., 2017. Effects of Rainfall on Vehicle Crashes in Six U.S. States. Weather, Climate, and Society 9 (1), 53–70. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0035.1>
- Cai, J., Ong, G.P., Wu, D., Zhao, L., Zhao, H., 2024. Assessing braking performance on wet-road through water-depth estimation and vehicle-pavement dynamic simulation. International Journal of Pavement Engineering 25 (1), 2421896. <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2421896>
- Costello, J.T., McMorris, T., Ando, A., Williams, T.B., Corbett, J., 2020. Hypoxia and cognitive performance – the role of barometric pressure. The Journal of Physiology, 598 (5), 1021–1022. <https://doi.org/10.1113/JP279358>
- Cuenca, L.G., Puertas, E., Aliane, N., Andres, J.F., 2018. Traffic Accidents Classification and Injury Severity Prediction, in: 2018 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). IEEE, pp. 52–57. <https://doi.org/10.1109/ICITE.2018.8492545>
- Didyk, L., Gorgo, Yu., Prigancova, A., Tunyi, I., Vaczyova, M., Mamilov, S., Dirckx, J., 2012. The Effects of Atmospheric Pressure Fluctuations on

- Human Behaviour Related to Injury Occurrences: Study on the Background of Low and Moderate Levels of Geomagnetic Activity. International Scholarly Research Network 2012, 791524. <https://doi.org/10.5402/2012/791524>
- Eck, M.A., Konrad, Ch.E., Rayne, S., Black, A.W., 2022. Understanding the Role of Rainfall Intensity on Relative Car Crash Risk in the Carolinas. *Weather, Climate, and Society* 14 (3), 965–978. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-22-0025.1>
- Funakubo, M., Sato, J., Mizumura, K., Suzuki, N., Messlinger, K., 2021. Craniofacial sensations induced by transient changes of barometric pressure in healthy subjects – A crossover pilot study. *Cephalalgia Reports* 4. <https://doi.org/10.1177/25158163211000362>
- Zeng, Q., Quddus, M.A., Ison, S., 2020. Investigating the impacts of real-time weather conditions on freeway crash severity: A Bayesian spatial analysis. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 112, 47–65. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082768>
- Jaroszowski, D., Hooper, E., Chapman, L., 2014. The impact of climate change on urban transport resilience in a changing world. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 38 (4), 448–463. <https://doi.org/10.1177/0309133314538741>
- Jin, M., McBroom, D.G., 2024. Investigating Road Ice Formation Mechanisms Using Road Weather Information System (RWIS) Observations. *Climate* 12 (5), 63. <https://doi.org/10.3390/cli12050063>
- Khan, M.N., Ahmed, M.M., 2023. A novel deep learning approach to predict crash severity in adverse weather on rural mountainous freeway. *Journal of Transportation Safety & Security* 15 (8), 795–825. <https://doi.org/10.1080/19439962.2022.2129891>
- Khattak, A.J., Mohamed, A.A., Khattak, A., 2020. Driver impairment detection and safety enhancement through comprehensive volatility analysis. Collaborative Sciences Center for Road Safety, Report no. CSCRS-R23.
- Lee, W.-K., Lee, H.-A., Hwang, S., Kim, H., Lim, Y.-H., Hong, Y.-Ch., Ha, E.-H., Park, H., 2015. Does Temperature Modify the Effects of Rain and Snow Precipitation on Road Traffic Injuries? *Journal of Epidemiology* 25 (8), 544–552. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20140244>
- Carrodano, C., 2024. Data-driven risk analysis of nonlinear factor interactions in road safety using Bayesian networks. *Sci. Rep.* 14, 18948. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69740-6>
- Omranian, E., Khattak, A., Alshareef, M., 2018. Exploring rainfall impacts on the crash risk on Texas roadways: A crash-based matched-pairs analysis approach. *Accident Analysis & Prevention* 117, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.03.030>
- Pechatnova, E.V., Safronov, K.E., 2020. Precipitation influence assessment on accidents risk outside built-up areas. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal* 17 (4), 512–522. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-512-522>
- Qiu, L., Nixon, W.A., 2008. Effects of Adverse Weather on Traffic Crashes: Systematic Review and Meta-Analysis. *Transportation Research Record* 2055 (1), 139–146. <https://doi.org/10.3141/2055-16>
- Redelmeier, D.A., Raza, S., 2017. Life-threatening motor vehicle crashes in bright sunlight. *Medicine* 96 (1), e5710. <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000005710>
- Sangkharat, K., Thornes, J.E., Wachiradilok, P., Pope, F.D., 2021. Determination of the impact of rainfall on road accidents in Thailand. *Heliyon* 7 (2), e06061. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06061>
- Stevens, S.E., Schreck III, C.J., Saha, S., Bell, J.E., Kunkel, K.E., 2019. Precipitation and Fatal Motor Vehicle Crashes: Continental Analysis with High-Resolution Radar Data. *Bulletin of the American Meteorological Society* 100 (8), 1453–1461. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0001.1>
- Theofilatos, A., 2017. Incorporating real-time traffic and weather data to explore road accident likelihood and severity in urban arterials. *Journal of Safety Research*, 61, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.02.003>
- Theofilatos, A., Yannis, G., 2014. A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. *Accident Analysis & Prevention* 72, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.06.017>
- Usman, T., Fu, L., Miranda-Moreno, L.F., 2010. Quantifying the safety effects of winter road maintenance using data from instrumented vehicles. *Accident Analysis & Prevention* 42 (6), 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.05.008>
- Wu, Y., Abdel-Aty, M., Lee, J., 2018. Crash risk analysis during rain conditions using real-time weather and traffic data. *Accident Analysis & Prevention* 114, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.05.004>
- Wang S. et al. Coupling impacts of spray and rainfall on road visibility and vehicle speeds: a simulation-based analysis //Canadian Journal of Civil Engineering. – 2022. – Т. 49. – №. 7. – С. 1220-1230. <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0402>

Статья поступила в редакцию 02.07.2025, одобрена после рецензирования 16.07.2025, принята к публикации 24.07.2025

The article was submitted 02.07.2025, approved after reviewing 16.07.2025, accepted for publication 24.07.2025.

Информация об авторах:

1. Наталья Савченко, аналитик, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0009-0001-7478-8182>, nata.savchenko.1999@bk.ru
2. Татьяна Кудрявцева, д.э.н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0000-0003-1403-3447>, tankud28@mail.ru
3. Родионова Мария, ведущий аналитик, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. <https://orcid.org/0000-0002-6972-2082>, rodionova_ma@spbstu.ru

About authors:

1. Natalia Savchenko, Analyst, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0009-0001-7478-8182>, nata.savchenko.1999@bk.ru
2. Tatiana Kudryavtseva, Doctor of Economics, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0003-1403-3447>, tankud28@mail.ru
3. Maria Rodionova, uncredited, Senior Analyst, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-6972-2082>, rodionova_ma@spbstu.ru