

Научная статья
УДК 614.8, 656, 517.977.5
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.15.80.008

Устойчивость структуры городской дорожной сети к явлениям чрезвычайного характера

*Сергей Валерьевич Бабёнышев*¹

*Евгений Николаевич Матеров*²

*Олег Сергеевич Малютин*³

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск, Россия

¹<https://orcid.org/0000-0002-4298-2036>

²<https://orcid.org/0000-0002-3916-0613>

³<https://orcid.org/0000-0001-5543-1324>

Автор ответственный за переписку: Евгений Николаевич Матеров, materov@gmail.com

Аннотация. В статье анализируются методы определения оценки уязвимых особенностей городской структуры по отношению к явлениям чрезвычайного характера. 1. Используя сетевую топологию городской структуры транспортной сети, вводится функция достижимости, на основе которой даются методы оценки достижимости зданий и сооружений из пожарных подразделений. 2. На основе понятия центральности графа дорожной сети предложена оценка наиболее уязвимым элементам дорожной сети с точки зрения влияния сбоев (например, землетрясений, наводнений, террористических атак) этих элементов на дорожную сеть. При прочих равных условия, сети с более высокой связностью, меньшим количеством узлов и меньшей степенью центральности менее уязвимы к последствиям разрушения. 3. Учитывая цифровую модель рельефа местности, дается аналитическая оценка городской инфраструктуры, наиболее уязвимой для паводков. Используя информацию, касающуюся цифровой модели рельефа местности и расстояния от береговой линии до объектов, можно построить модель для кластеризации при районировании рисков затопления на основе алгоритмов машинного обучения. В работе проанализировано несколько крупных городов Российской Федерации.

Ключевые слова: моделирование, граф дорожной сети, чрезвычайные ситуации, цифровая модель

Для цитирования: Бабёнышев С.В., Матеров Е.Н., Малютин О.С. Устойчивость структуры городской дорожной сети к явлениям чрезвычайного характера // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. № 3 (34). С. 104-115. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.15.80.008>.

The stability of the structure of the urban road network to emergency phenomena

*Sergey V. Babenyshev*¹

*Evgeny N. Materov*²

*Oleg S. Malyutin*³

Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia,

¹<https://orcid.org/0000-0002-4298-2036>

²<https://orcid.org/0000-0002-3916-0613>

³<https://orcid.org/0000-0001-5543-1324>

Corresponding author: Evgeny N. Materov, materov@gmail.com

Abstract. The article analyses the methods of determining the assessment of vulnerable features of the urban structure in relation to the phenomena of emergency character. 1. Using the network topology of the urban structure of the transport network, we define a reachability function is introduced, on the basis of which methods of estimating the reachability of buildings and structures from fire departments. 2. Based on the concept of centrality of the road network graph, an assessment of the most vulnerable elements of the road network, we propose in terms of the impact of failures (e.g., earthquakes, floods, terrorist attacks) of these elements on the road network. Other things being equal, networks with higher connectivity, fewer nodes and lower centrality are less vulnerable to the effects of disruption. 3. Given a digital elevation model, we provide an analytical assessment of the urban infrastructure most vulnerable to floods. Using the information concerning the digital elevation model and the distance from the shoreline to the objects, we built a model for clustering in flood risk zoning based on machine learning algorithms. We analyze s in this paper several large cities of the Russian Federation.

Keywords: modeling, graph of the street network, emergencies, digital model

For citation: Babenyshev S.V., Materov E.N., Malyutin O.S. The stability of the structure of the urban road network to emergency phenomena // Siberian Fire and Rescue Bulletin.2024. № 3 (34). С. 104-115. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2024.15.80.008>.

Оценка достижимости зданий и сооружений из пожарных подразделений

Согласно действующему в Российской Федерации законодательству [1], места дислокации подразделений пожарной охраны на территориях поселений и городских округов определяются условием, что время прибытия первого подразделения к месту вызова не должно превышать 10 минут, соответственно, в сельской местности — 20 минут. Одними из важнейших задач являются, уменьшение времени прибытия первого подразделения, оптимизация границ районов выезда и оптимальное размещение новых пожарных подразделений с учетом максимального покрытия территории муниципалитета 10-минутными (соответственно, 20-минутными) изохронами. Такого рода вопросы, связанные с достижимостью объектов для экстренных служб, очень активно изучались как в Российской Федерации [5], так и за рубежом [6–8]. В частности, авторы данной статьи также внесли свой вклад в решение рассматриваемых задач, что отражено в публикациях [9,10].

Мы рассматриваем структуру дорожной сети как *пространственный граф* — математический объект, состоящий из узлов и ребер, учитывающий географические координаты и географические проекции. Отметим, что в данном случае мы рассматриваем взвешенный ориентированный граф, в котором узлами графа, как правило, являются пересечения дорог или перекрестки, а проезжая часть является ребрами графа, причем скорость либо время следования по определенному участку определяет вес соответствующего ребра графа.

Этапы работы с пространственным графом следующие:

1. для данного населенного пункта необходимо получить его границы и дорожную сеть с помощью API на основе открытого картографического сервиса *OpenStreetMap*;
2. дорожная сеть преобразуется в новый объект, являющийся графом с учетом географических проекций;
3. каждому участку (по сути, ребру графа) с одним и тем же типом дорог приписывается вес как скорость движения на данном участке;
4. рассчитывается граница 10-минутной (20-минутной) достижимости из одного или нескольких центров (в нашем случае центрами являются пожарные подразделения).

Развитие современных ГИС-технологий дало новые возможности для технической работы с геопространственными данными. Для программного исследования структуры свойств пространственного графа дорожной сети можно использовать как настольные ГИС (например, QGIS, ArcGIS), так и языки программирования, например, Julia, Python или R. В частности,

в статье авторов [10] для задач оптимизации границ районов выезда использовался язык программирования Python, для расчетов (нахождения кратчайших маршрутов, построения дерева маршрутов из заданного узла и т.д.) использовались библиотеки OSMnx и NetworkX. В данной статье для обработки, визуализации и моделирования мы используем свободно распространяемый язык программирования R. Язык R [11] изначально задумывался его авторами как статистический язык программирования, но сейчас, благодаря наличию огромного количества библиотек, расширяющих базовые возможности языка, он используется для самых разных задач, и хорошо зарекомендовал себя в применении к географическим данным: см., например, [12] или [13]. В частности, R предлагает множество библиотек для пространственного сетевого анализа.

Исходными данными для моделирования, помимо местоположения городского либо сельского поселения, а также топологии графа дорожной сети, являются координаты пожарных частей и скорости движения по различным типам дорог, которые можно варьировать. Отметим, что от скоростей движения по различным типам существенно зависит так называемый *индекс прикрытия территории*, введенный в работе [10] как процентное соотношение количества узлов графа дорожной сети, для которых время прибытия не превышает допустимое время (например, 10 минут) к общему количеству узлов графа дорожной сети для рассматриваемого района.

Для того, чтобы можно было определить транспортную устойчивость графа дорожной сети, мы введем такой важный показатель, как *функция достижимости* $F(t)$ (Рис.1), которая в точке t_0 показывает долю (количество) узлов графа (например, в процентном соотношении), достижимых за время $t < t_0$. С помощью данной функции можно определить количество узлов графа, которые будут достигнуты за время t из диапазона $a < t < b$ как разницу $F(b) - F(a)$. Функция $F(t)$ по своим свойствам похожа на функцию вероятности, в частности, она является неубывающей и ее значения сосредоточены на интервале $(0, 1)$ (либо от 0% до 100%).

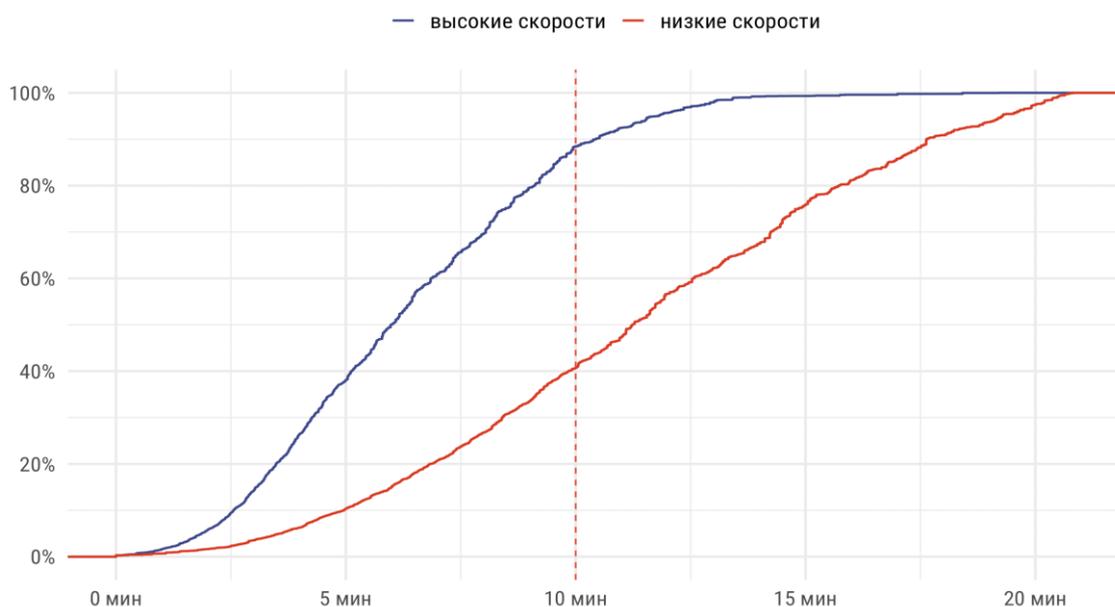


Рис.1. Пример функции достижимости для одного и того же города для различных наборов скоростей движения; разница в процентном соотношении объектов, достижимых за 10-минут для высоких и низких скоростей, составляет около 50%.

Теперь, выбрав одинаковый набор скоростей движения по различным типам дорог, мы можем сравнить несколько городов по уровню достижимости, причем, используя функцию достижимости, сравнение возможно для любого фиксированного заданного времени достижимости. Также, подобные графики дают хорошее представление о том, как быстро

происходит «насыщение», т.е. как быстро выполняется тот или иной уровень достижимости для фиксированного времени (Рис.2).

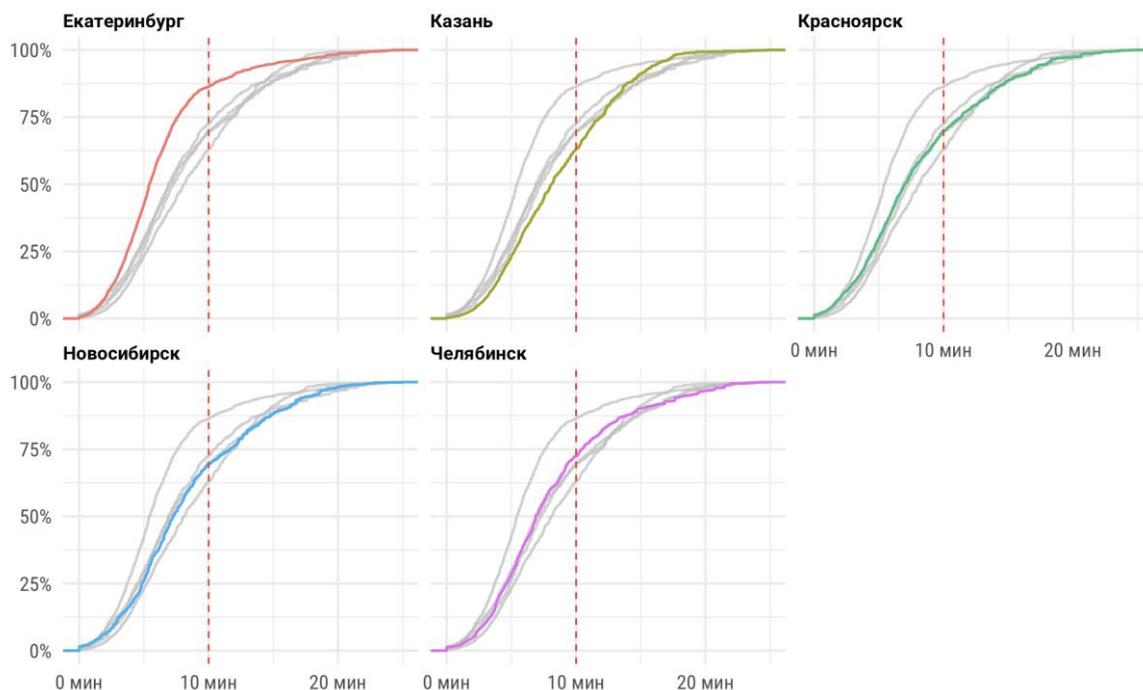


Рис.2. Пример функции достижимости для нескольких городов и одного и того же набора скоростей движения.

Рис.2 показывает, что наиболее устойчивым из 5 выбранных городов России является Екатеринбург, на что указывает рост графика, следовательно, при выбранном наборе средних скоростей (см. [10]) за 10 минут лучший индекс покрытия будет именно у Екатеринбурга.

Оценка уязвимости городской дорожной сети на основе понятия центральности графа дорожной сети

Дорожные сети определяют важные транспортные потоки в муниципальных образованиях. Нарушения в этой важнейшей инфраструктуре могут прерывать транспортные потоки и наносить масштабный ущерб. Например, проливные дожди или повышение уровня моря могут затопить улицы, сделав многие поездки невозможными. Землетрясения могут разрушить важные дорожные магистрали или завалить их обломками, затрудняя эвакуацию и спасение людей. Террористы могут напасть на такие узловые точки, как мосты, туннели или важные перекрестки, чтобы парализовать часть города. Такие нарушения могут быть разрушительными, но городские уличные сети не все одинаково уязвимы для этих катастроф. Наше исследование касается изучения вопросов нахождения наиболее уязвимых мест городской дорожной инфраструктуры используя, топологические свойства дорожной сети и мотивировано недавней публикацией [14]. В своей статье, Джефф Боинг и Джехьюн Ха (Университет Южной Калифорнии) смоделировали более 2,4 миллиарда поездок по более чем 8000 городских районов в 178 странах, а также события, приводящие к нарушению работы сети, таких как наводнения, землетрясения и целенаправленные атаки. Они обнаружили, что нарушение работы узлов графа дорожной сети с высокой степенью центральности серьезно влияет на функционирование сети. При прочих равных условия, сети с более высокой связностью, меньшим количеством узлов и меньшей степенью центральности менее уязвимы к последствиям разрушения. Таким образом, исследование данных авторов вносит в литературу новое глобальное понимание дизайна и уязвимости сетей. В настоящей статье мы пойдем несколько дальше, чем авторы публикации [14], определив понятие интегральной оценки

центральности узлов графа дорожной сети, что позволит естественным образом сравнивать устойчивость городов на основании понятия центральности.

Понятие центральности узла/ребра графа можно ввести множеством различных способов (см., например, [15]). Дадим определение, которое будет в дальнейшем использоваться в статье. Для фиксированного узла u графа G дорожной сети, пусть $\sigma_{st}(u)$ обозначает число кратчайших путей из узла s в узел t проходящих через данный узел u . Показатель *центральности по промежуточности* можно вычислить как:

$$B(u) = \sum_{s,t:s \neq t, s \neq u, t \neq u} \frac{\sigma_{st}(u)}{\sigma_{st}}$$

где σ_{st} – общее число всех кратчайших путей из узла s в узел t .

Нашим основным инструментом для изучения индексов центральности графов дорожной сети стала библиотека *sfnetworks* [16] языка программирования R. Для визуализации использовалась библиотека *ggplot2*.

Проиллюстрируем центральность по промежуточности на следующем примере. Попутно отметим, что аналогично можно рассмотреть сетевую проходимость ребер графа дорожной сети.



Рис.3. Центральность по промежуточности вершин графа дорожной сети г. Красноярск. Показатель центральности равен $bc \cdot 10^6$ (чем темнее и больше изображена вершина, тем больше значение показателя).

Например, на Рис.3 максимальное значение индекса наблюдается у перекрестка проспекта Свободный и улицы Маерчака, также высокие значения имеют развязки улиц

Брянская, 2-я Брянская, Калинина и Маерчака, кроме того, как можно было предположить, высокие значения у элементов дороги на мостах и подъездах к мостам.

Для исследования центральности узлов графа дорожной сети рассмотрим 5 крупных городов Российской Федерации: Екатеринбург, Казань, Красноярск, Новосибирск, Челябинск. Для каждого города вычислим индекс центральности для всех перекрестков и изобразим в виде оценки плотности центральности узлов графа.

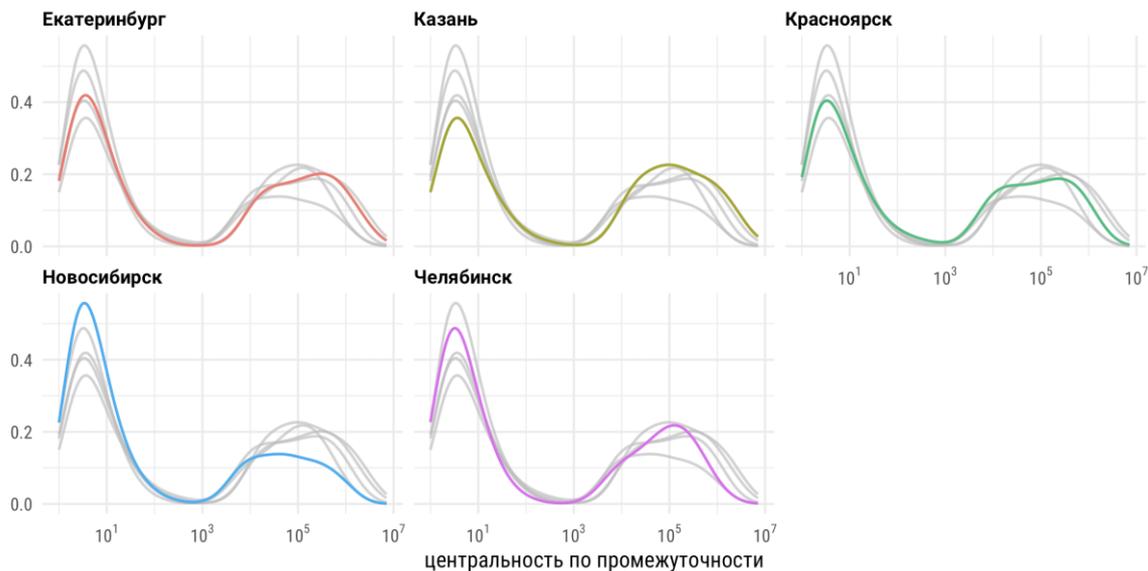


Рис.4. Плотность индексов центральности узлов графа дорожной сети для 5 крупных городов Российской Федерации.

Для того чтобы сказать, что городская дорожная сеть является устойчивой к внешним воздействиям, общий принцип таков: дорожная сеть должна содержать больше узлов с малыми значениями индексов центральности, и, в то же время, меньше узлов с большими значениями индексов. Из графика на Рис.4 мы видим, что из рассмотренных городов Новосибирск имеет наилучшую устойчивость.

На основе графика плотности, мы введем еще одно понятие, которое в лучшей мере может служить для сравнительного анализа, а именно интегральный показатель центральности узлов графа. Для этого на основе заданного распределения плотности центральности узлов строится функция на основе эмпирической кумулятивной функции распределения, что дает альтернативную визуализацию распределения, по сути, вычисляя площадь под графиком распределения в левее каждой точки графика плотности. Здесь чем выше кривая соответствующего графика, тем более устойчив граф дорожной сети.

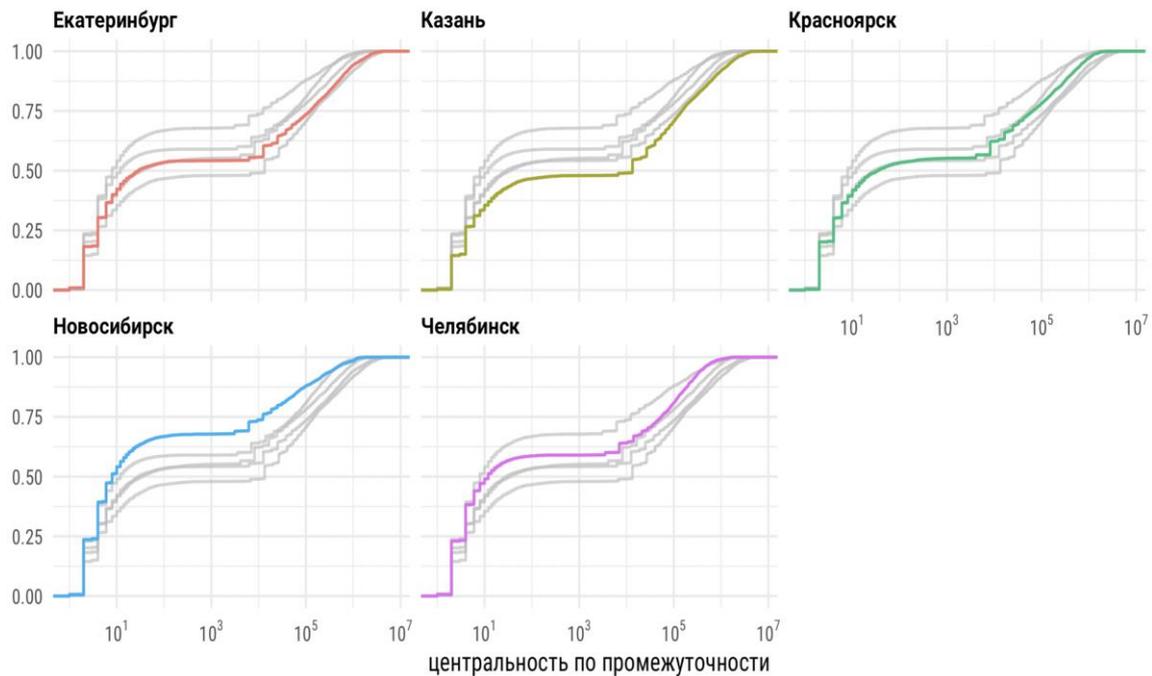


Рис.5. Интегральная оценка центральности узлов графа на примере 5 крупных городов Российской Федерации.

Таким образом, для примера из 5 городов РФ, можно построить соответствующие графики и выстроить иерархию, определив наиболее устойчивые муниципальные образования, что показано на рисунке ниже: чем больше кривая графика показывает рост, тем более устойчива городская сеть дорог к разрушительным явлениям, соответственно, можно построить больше путей из одной точки города в другую. Отметим, что данный подход дает гораздо больше информации, чем обобщенные показатели из статьи [14].

Оценка городской инфраструктуры, наиболее уязвимой для паводков

Одной из наибольших угроз, представляющих для городской среды, являются паводковые явления, изучение которых весьма сложная задача, поскольку причин, ведущих к затоплению, может быть очень много (см., например, [17]). Поскольку объекты дорожной сети могут подвергнуться опасности затопления, то важно указать наиболее уязвимые места на карте города. Технически полностью задача оценки рисков такого рода может быть крайне сложна из-за учета множества факторов, сезонности явлений и многого другого. В нашей работе, на основе библиотек языка программирования R, мы даем первоначальную оценку угрозы рисков подтоплений. Для этого мы используем цифровую модель рельефа местности (ЦМР) на основе растрового способа организации данных. Получение и работа с данными происходит с помощью библиотек *elevatr* и *terra* языка R.

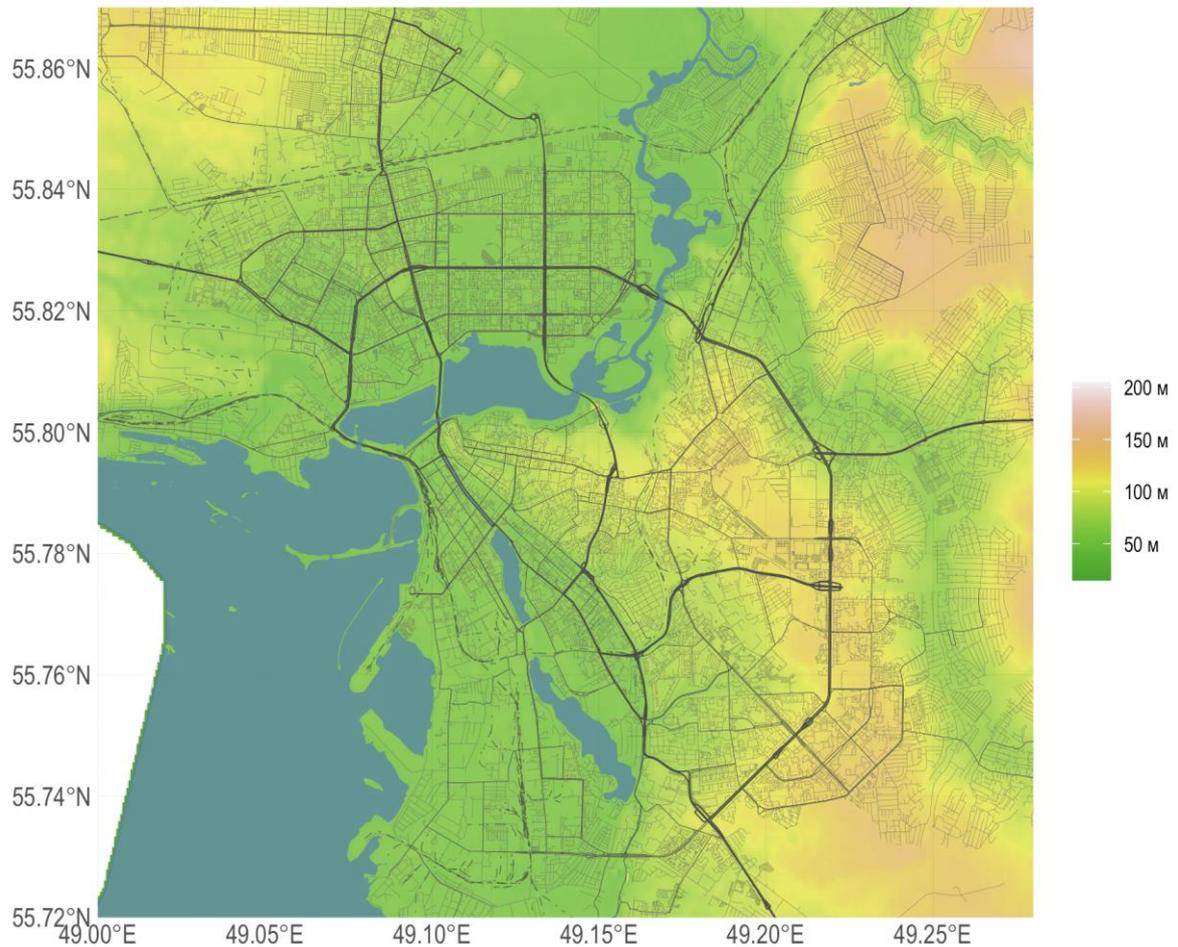


Рис. 6. Пример отображения цифровой модель рельефа местности для центра г. Казань.

Следующим важным элементом для оценки угроз является расстояние от береговой линии до объектов городской структуры. Для этого необходимо загрузить *OpenStreetMap*-представление водных объектов в библиотеке *sf* и далее вычислить евклидово расстояние между объектами.

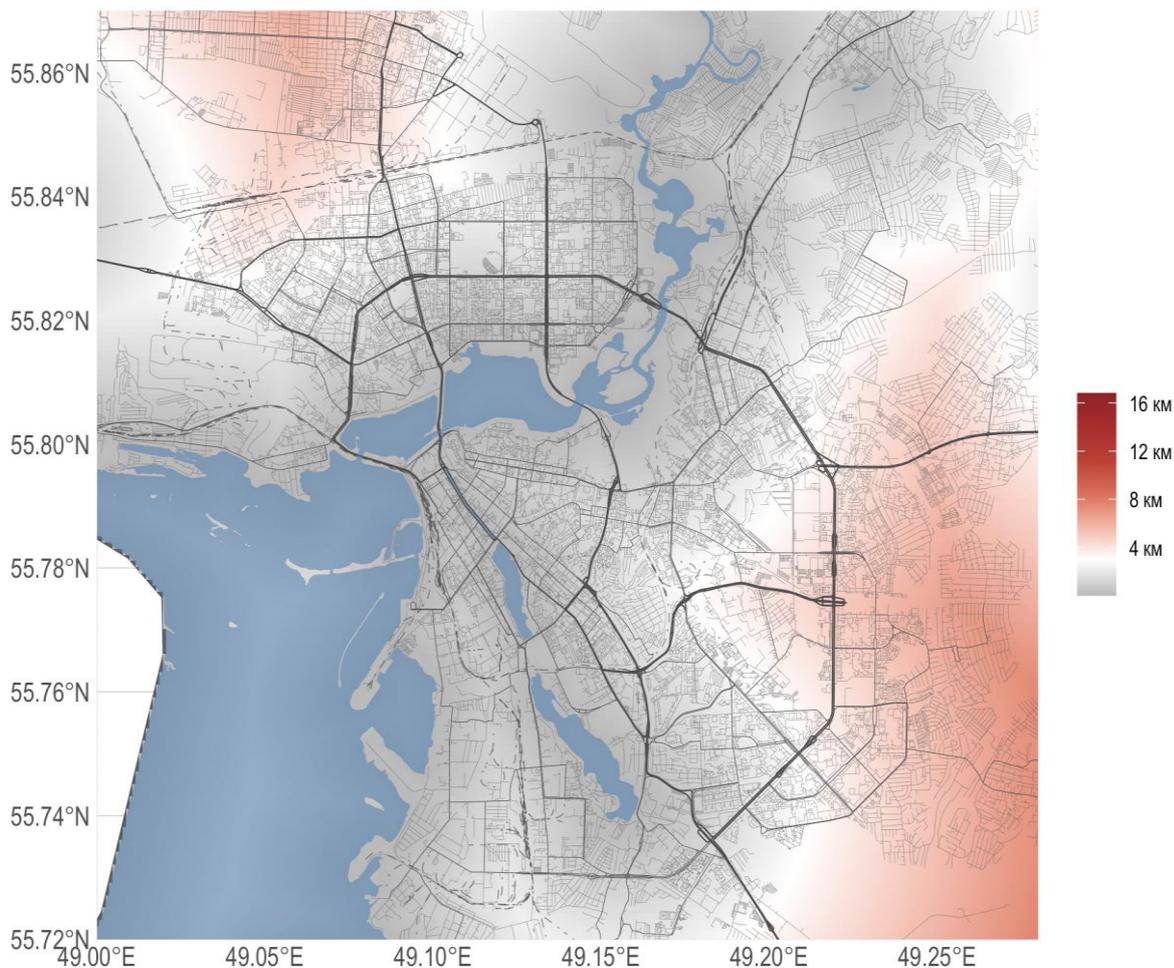


Рис.7. Пример отображения расстояний до водных объектов.

Информацию, касающуюся цифровой модели рельефа местности и расстояния от береговой линии до объектов, можно объединить для дальнейшего моделирования. Например, мы построим модель для кластеризации при районировании рисков затопления на основе алгоритмов машинного обучения в библиотеке *tidyclust*, входящей в комплекс библиотек *tidymodels* для ML-моделирования. Разбиение на кластеры позволяет разделить объекты на не пересекающиеся группы на основе выбранной метрики таким образом, чтобы каждый объект находится только в одном кластере и кластеры существенно отличались друг от друга. Поскольку данный метод относится к классу задач «обучения без учителя» в разделах машинного обучения, необходимо либо самостоятельно указывать количество кластеров, либо определять количество кластеров по правилам, дающим минимизацию суммы квадратов внутрикластерных расстояний. Ниже показан пример кластеризации объектов городской инфраструктуры по категориям риска с помощью машинного обучения.

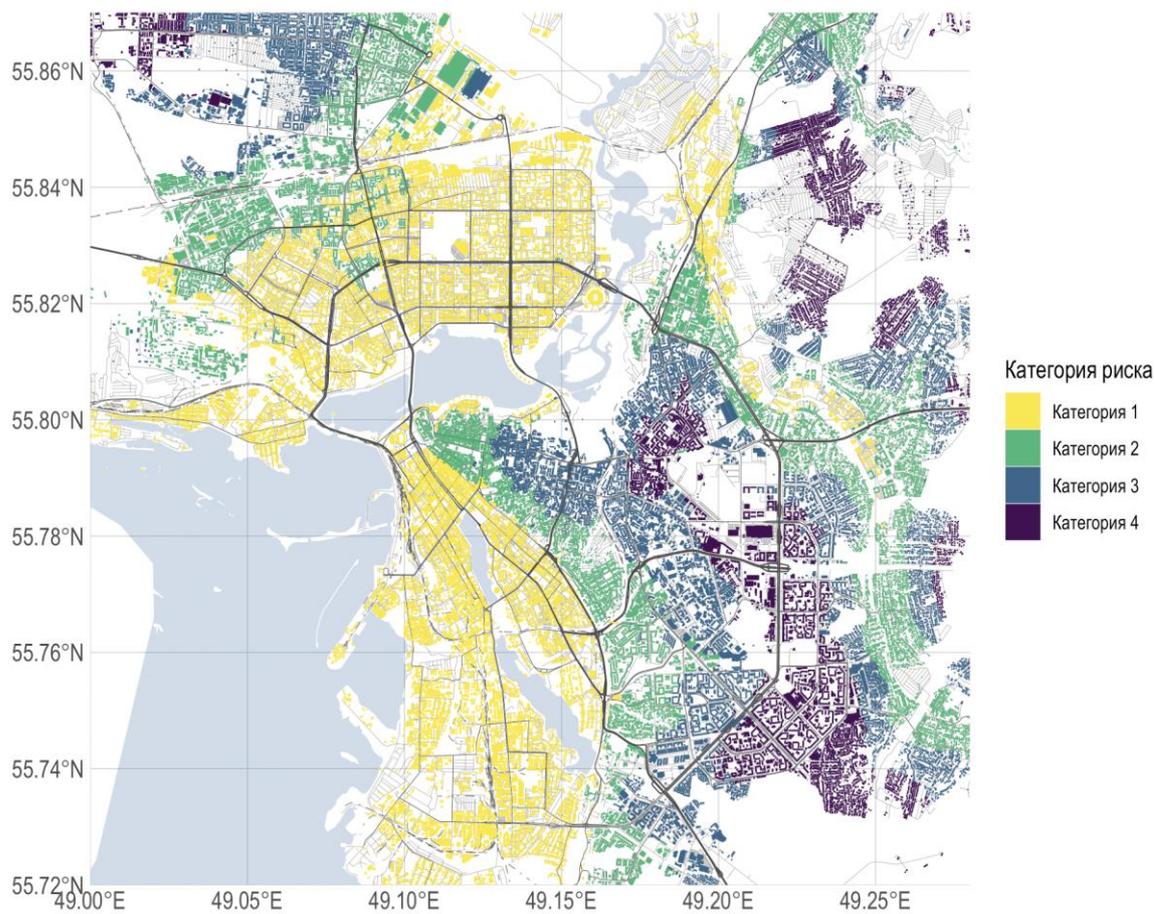


Рис.8. Пример кластеризации объектов городской инфраструктуры по категориям рисков затопления.

Заключение

Инфраструктура дорожно-транспортной сети имеет важнейшее значение для экономики городов, жизни и средств к существованию горожан. Мы рассмотрели различные типы устойчивости и уязвимости этой инфраструктуры: устойчивость по отношению к достижимости объектов из пожарных подразделений, нарушение инфраструктуры в результате таких бедствий, как землетрясения или целенаправленные атаки и возможные риски от наводнения.

Наши исследования имеют во многом теоретический характер, однако инструменты, введенные в статью, позволяют оценить качество дорожно-транспортной сети, а также возможность сравнительного анализа для различных населенных пунктов. Полученные результаты позволят градостроителям лучше понимать взаимосвязь между этими характеристиками рисков и проектированием сетей для более эффективного планирования, основанного на фактах, а руководителям принимать управленческие решения по созданию устойчивых, жизнеспособных городов.

Список источников

1. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс]. 2008. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (дата обращения: 10.08.2024).
2. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. О нормировании времени прибытия пожарных подразделений к месту // Пожаровзрывобезопасность. 2021. С.30-31.
3. Матюшин А.В., Бобринев Е.В., Порошин А.А. Современные геоинформационные технологии в проектировании гарнизонов пожарной охраны // Пожарная безопасность. 2012. Т. 3.

4. Соколов С.В., Попков С.Ю., Портнов Д.А. Имитационная модель процесса функционирования территориальных добровольных пожарных команд для оценки параметров оперативного реагирования // Технологии техносферной безопасности. 2018. Т. 6, № 82. С. 22–31.
5. Соколов С.В., Фам К.Х., Брушлинский Н.Н. Разработка и адаптация имитационной системы оперативной деятельности пожарных подразделений к условиям Вьетнама // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. Т. 2. С. 5–14.
6. Хань Б., Чжэн Цз., Ху М. Выбор места расположения пожарных станций в крупных городах на основе фактических пространственно-временных потребностей: исследование города Нанкин // Международный журнал геоинформатики. 2021.
7. Фаргуэлл М.А., Хейли Дж. Оценка времени прибытия пожара с помощью машинного обучения со спутника обнаружения пожаров второго уровня // Дистанционное зондирование. 2021. Т. 11, № 13.
8. Шимон, Вишневицкий Доступность пожарной службы к потенциальным зонам вмешательства в Лодзинском воеводстве // CNBOP-PIB. 2016. Т. 131, № 43.
9. Матеров Е.Н. и др. Анализ пожарной и техносферной безопасности городской среды г. Красноярска с применением геопространственных инструментов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. Т. 23, № 4. С. 128–136.
10. Бабёнышев С.В., Малютин О.С., Матеров Е.Н. Оптимизация границ районов выезда с использованием языка программирования Python и библиотеки OSMnx // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. Т. 28, № 1. С. 38–55.
11. Проект R для статистических вычислений [Электронный ресурс]. URL: <https://www.r-project.org/> (дата обращения: 10.08.2024).
12. Робин Лавлейс, Якуб Новосад, Яннес Мюнхов Геовычисления с R. Чепменом; Hall/CRC, 2019.
13. Самсонов Т.Е. Визуализация и анализ географических данных на языке R. М.: Географический факультет МГУ, 2022.
14. Боинг Дж., Ха Дж. Устойчивость по замыслу: Моделирование сбоев уличной сети в каждом городском районе мира // Исследования транспорта, часть А: Политика и практика. 2024. Т. 182.
15. Щербакова Н.Г. Меры центральности в сетях // Проблемы информатики. 2015.
16. Sfnetworks: аккуратные геопространственные сети в R [Электронный ресурс]. URL: <https://luukvdmeer.github.io/sfnetworks/> (дата обращения: 10.08.2024).
17. Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для вузов. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017.

References

1. Technical regulations on fire safety requirements: order of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation dated July 22, 2008 №. 123-FZ. [Electronic resource]. – Access mode: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/.
2. Brushlinsky N.N., Sokolov S.V. On rationing the time of arrival of fire departments to the place // Fire and explosion safety. 2021 (in Russian with English abstract).
3. Matyushin A.V., Bobrinev E.V., Poroshin A.A. Modern geoinformation technologies in the design of fire protection garrisons // Fire safety. 2012. Vol. 3 (in Russian with English abstract).
4. Sokolov S.V., Popkov S.Yu., Portnov D.A. Simulation model of the process of functioning of territorial voluntary fire brigades to assess the parameters of rapid response // Technosphere safety technologies. 2018. Vol. 6, №. 82. pp. 22-31 (in Russian with English abstract).
5. Sokolov S.V., Pham K.H., Brushlinsky N.N. Development and adaptation of the simulation system of operational activities of fire departments to the conditions of Vietnam // Fires and emergencies: prevention, elimination. 2021. Vol. 2. pp. 5-14 (in Russian with English abstract).
6. Han B., Zheng J., Hu M. Site Selection of Fire Stations in Large Cities Based on Actual Spatiotemporal Demands: A Case Study of Nanjing City // International Journal of Geo-Information. 2021.
7. Farguell M.A. Haley J. Machine Learning Estimation of Fire Arrival Time from Level-2 Active Fires Satellite // Remote sensing. 2021. Т. 11, № 13.

8. Szymon, Wiśniewski Fire service accessibility to potential intervention areas in Łódź voivodship // CNBOP-PIB. 2016. Vol. 131, № 43.
9. Materov E.N. et al. Analysis of fire and technosphere safety of the urban environment of Krasnoyarsk using geospatial tools // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2021. Vol. 23, №. 4. pp. 128-136.
10. Babenyshev S.V., Malyutin O.S., Materov E.N. Optimization of the boundaries of exit areas using the Python programming language and the OSMnx library // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2023. Vol. 28, №. 1. pp. 38-55.
11. The R Project for Statistical Computing [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.r-project.org/>.
12. Robin Lovelace, Jakub Nowosad, Jannes Muenchow Geocomputation with R. Chapman; Hall/CRC, 2019.
13. Samsonov T.E. Visualization and analysis of geographical data in the language of R. M.: Faculty of Geography, Moscow State University, 2022.
14. Boeing G., Ha J. Resilient by design: Simulating street network disruptions across every urban area in the world // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2024. Т. 182.
15. Shcherbakova N.G. Measures of centrality in networks // Problems of informatics. 2015.
16. Sfnetworks: Tidy Geospatial Networks in R [Electronic resource]. – Access mode: <https://luukvdmeer.github.io/sfnetworks/>.
17. Mikhailov V.N., Dobrolyubov S.A. Hydrology: textbook for universities. M.; Berlin: Direct Media, 2017.

Информация об авторах

С.В. Бабёнышев – кандидат физико-математических наук

Е.Н. Матеров – кандидат физико-математических наук

Information about the authors

S.V. Babenyshev – PhD of Physical and Mathematical Sciences

E.N. Materov – PhD of Physical and Mathematical Sciences

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.07.2024, одобрена после рецензирования 22.08.2024, принята к публикации 02.09.2024.

The article was submitted 30.07.2024, approved after reviewing 22.08.2024, accepted for publication 02.09.2024.