

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Наземные транспортно-логистические средства и комплексы

<https://doi.org/10.17816/transsyst633466>

© Р.Г. Ахтямов

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НА ОСНОВЕ ВЫБОРА
СТРАТЕГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Цель. Разработка подхода по повышению устойчивости на основе выбора стратегии восстановления транспортных сетей при реализации опасных природных процессов.

Методы. На основе оценки динамики опасных природных процессов, в том числе, на примере экзогенных геологических процессов, которые могут послужить причиной нарушения в функционировании транспортной сети, а также структуры оценки устойчивости и восстановления транспортных сетей в условиях реализации факторов климатического риска сформулированы стратегии восстановления транспортной сети.

Результаты. На основе сформулированных стратегий возможно сетевое моделирование топологии транспортной сети. Для моделирования транспортная сеть может быть представлена в виде неориентированного взвешенного графа с набором узлов и ребер. Предложенная модель позволяет определить наиболее эффективную стратегию с точки зрения быстрого восстановления связности транспортной сети, на основе определения последовательности восстановления участков дорог с учетом времени восстановления. Ожидается, что эффективность процесса восстановления поврежденных участков транспортной сети будет меняться в зависимости от доли восстановленной сети, снижаясь при увеличении доли. В этой связи целесообразно оценить ту долю восстановления транспортной сети, которая будет необходима для выполнения задач формирования РСЧС в условиях проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ на конкретной территории.

Заключение. Анализ и оценка альтернативных решений восстановления устойчивости транспортных сетей основывается на комплексности решаемых задач при реализации факторов климатического риска, таких как опасные природные процессы. В ряде случаев, для решения задач РСЧС не требуется полное восстановление транспортной сети, в отличие от задач, решаемых транспортной отраслью. Задача данной работы заключалась в разработке основы для оценки стратегий восстановления транспортных сетей, с выявлением особенностей каждой из рассмотренных стратегий в условиях неопределенности, а также повышение эксплуатационной устойчивости. Предложенный подход характеризуется гибкостью, что позволяет лицам, принимающим решения, оценить различные приоритеты, возникающие при развитии конкретной природной чрезвычайной ситуации на определенной территории (например, среднее время восстановления, эффективность процесса восстановления, величина неопределенности) при выборе наиболее желательной стратегии. Предполагается, что среднее время восстановления не имеет существенного различия между стратегиями, при полном восстановлении транспортной сети. Однако, при частичном восстановлении сети, необходимой для решения задач РСЧС, среднее время восстановления зависит от выбранной стратегии.

Ключевые слова: транспортная сеть; устойчивость; восстановление; граф; чрезвычайные ситуации; стратегия.

Как цитировать:

Ахтямов Р.Г. Повышение устойчивости на основе выбора стратегии восстановления транспортных сетей при реализации опасных природных процессов // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 287–299. doi: 10.17816/transsyst633466

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Ground transport and logistics facilities and complexes

© **R.G. Akhtyamov**Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**INCREASING RESILIENCE AND SELECTION OF A STRATEGY
FOR RESTORING TRANSPORT NETWORKS IN EXTREME
NATURAL PROCESSES**

Aim. The development of an approach to increasing resilience by selecting strategies for restoring transport networks affected by extreme natural processes.

Methods. This study evaluates the dynamics of extreme natural processes, specifically exogenous geological processes that can that can disrupt transport networks. It includes as framework for assessing the sustainability and restoration of transport networks under climate risk factors. Strategies for restoring the transport network were formulated.

Results. The formulated strategies enable network modeling of transport network topology, which can be represented as an undirected weighted graph with a set of nodes and edges. The proposed model allows determining the most effective strategy for quickly restoring the connectivity of the transport network by determining the optimal sequence of restoration for repairing road sections, considering restoration time. The efficiency of restoring damaged sections of the transport network is expected to decrease as the share of the restored network increases. Therefore, it is crucial to estimate the necessary extend of network restoration to perform the necessary extent of network restoration to support emergency and urgent tasks by RSChS formations in specific areas.

Conclusion. The analysis and assessment of alternative solutions for restoring the sustainability of transport networks considers the complexity of tasks under climate risk factors, such as extreme natural processes. In some cases, the RSChS problems do not require complete network restoration, unlike the tasks solved by the transport industry. This work aims to develop a framework for assessing restoration strategies, identifying the features of each of the considered strategies under uncertainty, and increasing operational sustainability. The proposed approach is flexible, allowing decision makers to assess various priorities during a specific natural emergency in a certain area, such as average recovery time, process efficiency, and uncertainty levels, when choosing the most desirable strategy. It is assumed that the average recovery time does not differ significantly among strategies for full network restoration. However, for partial restorations necessary for RSChS tasks, the average restoration time depends on the chosen strategy.

Keywords: transport network; sustainability; restoration; graph; emergency situations; strategy.

To cite this article:

Akhtyamov RG. Increasing resilience and selection of a strategy for restoring transport networks in extreme natural processes. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(3):287–299. doi: 10.17816/transsyst633466

ВВЕДЕНИЕ

Понятие «устойчивость» используется в ряде дисциплин, и в общем случае может рассматриваться как элемент оценки риска. Под устойчивостью транспортной сети понимается способность к восстановлению, позволяющая сети полностью или частично функционировать после сбоев, вызванных природными или антропогенными воздействиями, возникающими в результате физических угроз.

Транспортные сети являются основой критически важной инфраструктуры, поскольку они обеспечивают связность систем в режиме повседневной деятельности, а также возможность доставки сил и средств в зону проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ в режиме чрезвычайной ситуации. Таким образом, повышение устойчивости на основе анализа сложности процесса восстановления имеют решающее значение для транспортных сетей.

В условиях меняющегося климата, реализация факторов климатического риска повышает частоту природных стихийных явлений, которые могут стать источником чрезвычайной ситуации техногенного характера, в том числе на объектах транспортной сети. Восстановление транспортных сетей после воздействия поражающих факторов природных чрезвычайных ситуаций анализируется, и предлагаются решения с помощью алгоритмов оптимизации [1, 2]. Формулировка задач оптимизации учитывает неопределенности при распределении ресурсов и способствует пониманию комплексности задачи повышения устойчивости объектов транспортной инфраструктуры. Так, в ряде случаев, для решения задач в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций может быть реализовано краткосрочное частичное восстановление транспортной сети (автодорожной и/или железнодорожной). В таких случаях формулировка задачи оптимизации должна отличаться от достижения цели восстановления полной эксплуатационной мощности. В частности, базовая функциональность транспортной инфраструктуры не может быть достигнута в условиях масштабных разрушений вследствие опасных геологических процессов, таких как оползни и землетрясения в сжатые сроки.

Помимо подходов, связанных с оптимизацией, для оценки устойчивости транспортной инфраструктуры используется теория графов [3]. Существует метод, изложенный в работе [4], по оценке устойчивости топологии транспортной сети, который объединяет теорию графов с методологией стресс-тестирования. В работе [5] приведена

вероятностная модель для исследования потерь функциональности объектов инфраструктуры в результате реализации одиночных или множественных природных или техногенных опасностей на основе анализа сценариев восстановления участков дороги, с выделением приоритетов и потребности в восстановлении. Также существуют методы оптимизации восстановления участков дороги, основанные на минимизации эксплуатационных затрат [6].

Целью данной работы является разработка подхода по повышению устойчивости на основе выбора стратегии восстановления транспортных сетей при реализации опасных природных процессов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С 1960 года в мире зарегистрировано более 11 000 чрезвычайных ситуаций, вызванных природными стихийными явлениями, причем число катастроф неуклонно возрастает [7]. В последние десятилетия увеличение экстремальных событий привело к более частым, интенсивным и разрушительным и природным и техногенным чрезвычайным ситуациям. Изменение климата связано с увеличением частоты и тяжести экстремальных погодных явлений.

В соответствии с [8] к середине XXI в. на территории России преимущественно ожидается увеличение суммы осадков в теплый сезон. Важным фактором является сопутствующий рост суточной интенсивности осадков. Рост количества и интенсивности осадков в теплое время года увеличит риски возникновения опасных последствий, связанных с потерей устойчивости склонов – оползней. Такие риски особенно возрастают в случаях, когда сухие периоды чередуются с периодами интенсивных ливней. На Рис. 1 приведено изменение количества оползней в мире с 1900 по 2019 года.

Как видно из Рис. 1, рост количества оползней в мире с 1900 по 2019 года описывается экспоненциальной функцией с коэффициентом корреляции 0,96. При этом с 2020 по 2022 год произошло 48 оползней, что составляет 26% от количества оползней, произошедших в предыдущем десятилетии (2010–2019 гг.).

В некоторых случаях угрожающим фактором при оценке климатического риска может служить не само опасное явление, а создаваемое им природное или техногенное событие (или последовательность событий), которое, в свою очередь, воздействует на тот или иной реципиент. Кроме того, к росту ущерба приводят не только погодно-климатические факторы,

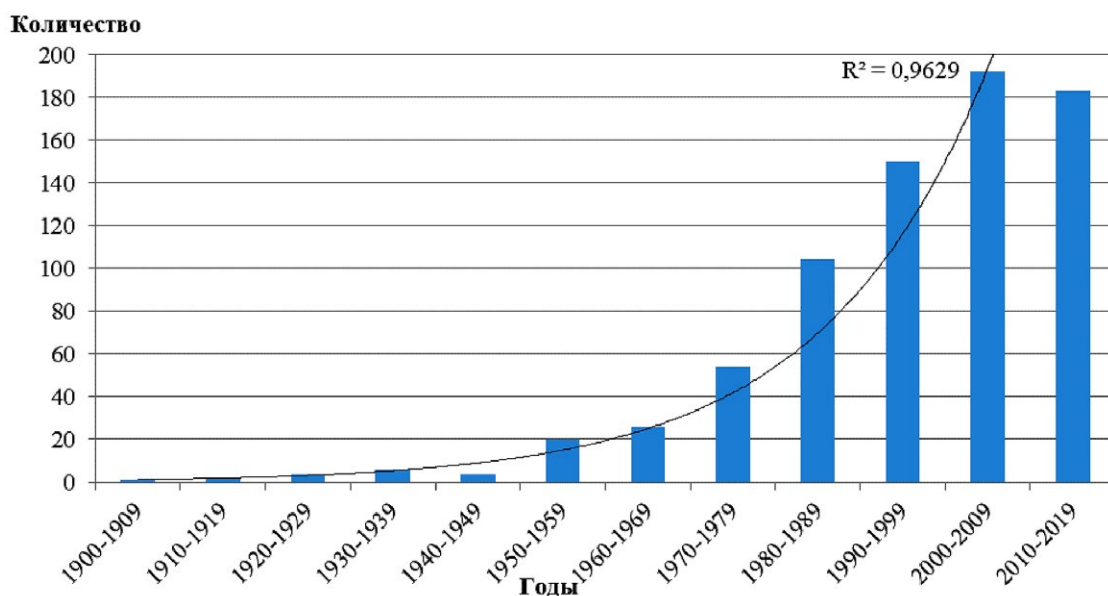


Рис. 1. Изменение количества оползней в мире с 1900 по 2019 гг.

Fig. 1. Change in the number of landslides in the world from 1900 to 2019

но и возрастающая уязвимость инфраструктуры. Это объясняется высокой степенью ее износа, отклонением от строительных норм и правил, освоением территорий, находящихся в зоне повышенного климатического риска [9].

Оценка устойчивости транспортных сетей в условиях реализации факторов климатического риска включает следующие этапы: сбор исходных данных; определение стратегий восстановления транспортной сети; определение показателей эффективности для оценки связности транспортной сети; моделирование топологии транспортной сети и неопределенности времени восстановления; оценка показателей эффективности для сравнения стратегий восстановления транспортной сети с точки зрения устойчивости и времени восстановления (Рис. 2).

Определение стратегий восстановления транспортной сети (Рис. 2) выполнено на примере нарушения транспортной работы вследствие реализации такого фактора климатического риска, как экзогенный геологический процесс – оползень. Стратегия восстановления транспортной сети зависят от наличия ресурсов и определении приоритетов в восстановлении функциональности транспортной сети. При определении последовательности восстановления транспортной сети необходимо также учитывать ряд факторов, такие как доступность ресурсов, грузооборот участка транспортной сети, время, необходимое



Рис. 2. Структура оценки устойчивости и возможности восстановления транспортных сетей в условиях реализации факторов климатического риска

Fig. 2. Structure of assessment of sustainability and possibility of restoration of transport networks in conditions of realization of climate risk factors

для расчистки дороги от завала, вследствие оползня и восстановления движения [10].

На основе предложенной структуры оценки устойчивости и восстановления транспортных сетей в условиях реализации факторов климатического риска сформулированы следующие стратегии:

Стратегия 1 – восстановление транспортной сети на основе критерия «доступность ресурсов» предполагает, что формирования Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) имеют доступ к поврежденному участку транспортной сети из ближайшего крупного населенного пункта, на территории которого имеются необходимые ресурсы для восстановления движения. Таким образом, реализация данной стратегии достигается путем поиска кратчайшего доступного маршрута для формирований РСЧС. Реализация подобного подхода с учетом оптимизации проведена в работе [11], с учетом максимизации доступности крупных источников ресурсов в условиях природных или техногенных чрезвычайных ситуаций.

Стратегия 2 – восстановление транспортной сети на основе двух критериев: «доступность ресурсов» и «грузооборот участка транспортной сети». Так как грузооборот участков транспортной сети имеет существенные отличия, то предполагается, что восстановление наиболее грузонапряженных участков, имеет приоритет с точки зрения пропускной способности, в том числе для доставки сил и средств РСЧС в зону

чрезвычайной ситуации. Таким образом, участки транспортной сети, заблокированные оползнем, восстанавливаются исходя из ранжирования показателей грузооборота участка транспортной сети и доступности ресурсов.

Стратегия 3 – восстановление дорог с учетом критериев: «доступность ресурсов» и «время восстановления». Время, необходимое для восстановления каждого участка транспортной сети определяется объемом работ по удалению грунта и устранению последствий схода оползня. Таким образом, приоритет участка восстановления транспортной сети определяется наименьшим временем на расчистку дороги и восстановление движения с учетом доступности ресурсов, например, из ближайшего крупного населенного пункта. Аналогичная стратегия восстановления движения на участке транспортной сети рассмотрена в работе [12] в контексте восстановления доступности железнодорожного сообщения после землетрясения в Японии в 1995 году.

Стратегия 4 – динамическое моделирование последовательности восстановления участков транспортной сети на основе критерия «время восстановления». В качестве приоритета определено время, необходимое для восстановления движения на поврежденном участке транспортной сети с последующим ранжированием участков в порядке возрастания времени. В отличие от Стратегии 3, не рассматривается условие близости и доступности ресурсов, с точки зрения анализа изменений в проведении работ по восстановлению участков транспортной сети в условиях неопределенности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе выбранной стратегии проводится сетевое моделирование с учетом топологии транспортной сети [13]. При моделировании транспортная сеть представляется в виде неориентированного взвешенного графа с набором узлов и ребер. Далее поврежденная транспортная сеть представляется в виде графа путем удаления поврежденных участков (ребер) из базовой транспортной сети. Затем поврежденные участки транспортной сети поочередно добавляются в граф с расчетом связности сети. Данная процедура повторяется до восстановления первоначального вида сети. Последовательность добавления участков определяется в соответствии с требованиями выбранной стратегии восстановления.

Оценка неопределенности может быть проведена с использованием метода Монте-Карло, так как данный метод позволяет использовать

вероятностные модели на основе анализа распределения вероятности для проверки гипотезы (выбранного сценария) путем случайного выбора переменных посредством повторной выборки. Моделирование Монте-Карло используется для анализа последствий стихийных бедствий, а также для генерации опасных событий при исследовании критичности транспортных сетей [14] и оценки разливов нефти [15]. Для цели данной работы, моделирование по методу Монте-Карло позволяет оценить неопределенность во времени восстановления для каждого, поврежденного участка транспортной сети.

Кроме характеристики каждой стратегии по восстановлению общей связности транспортной сети необходимо оценить «скорость восстановления». В контексте восстановления устойчивости «скорость восстановления» рассмотрена в работах [16-18]. Минимальное и максимальное время восстановления поврежденных участков транспортной сети определяется следующими факторами: объем завалов, образовавшихся вследствие оползня; характеристика территории расположения анализируемого участка транспортной сети; характеристика сил и средств РСЧС, расположенных на анализируемой территории. Эффективность каждой стратегии может оцениваться следующими факторами: время полного восстановления участка транспортной сети; доля восстановленной транспортной сети, необходимая для решения задач РСЧС; величина неопределенности.

Время полного восстановления участка транспортной сети может быть определено при помощи метода Монте-Карло. При этом модальное значение времени полного восстановления участка транспортной сети может являться значимым показателем в случае ограниченности ресурсов и необходимости выбора тех участков транспортной сети, восстановление которых является первостепенным.

Доля восстановленной транспортной сети, необходимая для решения задач РСЧС, может определяться посредством анализа функций распределения в каждом квантиле процесса восстановления. Для этого, процесс восстановления участков транспортной сети может быть разделен на доли восстановления 25%, 50%, 75%, 100%. Далее, для 25% восстановления всех поврежденных участков транспортной сети определяются среднее, максимальное и минимальное время восстановления для каждого участка. Критерием эффективности стратегии является минимальное среднее время восстановления с учетом размаха вариации. Таким образом, стратегия является наиболее эффективной, если

среднее время восстановления с учетом размаха вариации при каждой доле восстановления меньше, чем у других стратегий.

Оценка неопределенности может быть проведена на основе определения минимального и максимального времени восстановления с учетом доли восстановления.

Предложенная модель позволяет определить наиболее эффективную стратегию с точки зрения быстрого восстановления связности всей транспортной сети, на основе построения последовательности восстановления участков дорог с учетом времени восстановления.

Так как стратегии 1 и 2 ориентированы на доступность ресурсов для восстановления и грузооборот анализируемых участков, то среднее время восстановления участков транспортной сети будет выше, чем в стратегиях 3 и 4. Однако в случае, если приоритетом является полное восстановление транспортного сообщения в условиях доступа к ресурсам крупных населённых пунктов стратегии 1 и 2 являются предпочтительными.

Стратегии 3 и 4 опирающиеся на доступность ресурсов и ориентирующиеся на сокращение времени восстановления участков транспортной сети, например, в целях скорейшей эвакуации пострадавшего населения и доставки в зону чрезвычайной ситуации предметов первой необходимости, особенно в условиях возможности комбинирования различных транспортных сетей, позволяют получить минимальное среднее время восстановления.

Ожидается, что эффективность процесса восстановления поврежденных участков транспортной сети будет меняться в зависимости от доли восстановленной сети, снижаясь при увеличении доли. В этой связи целесообразно оценить ту долю восстановления транспортной сети, которая будет необходима для выполнения задач формирования РСЧС в условиях проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ на конкретной территории. Таким образом, стратегии восстановления транспортной сети могут быть сравнены для учета особенностей различных стратегий, что позволяет повысить эксплуатационную устойчивость транспортной сети.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ и оценка альтернативных решений восстановления транспортных сетей основывается на комплексности решаемых задач при реализации факторов климатического риска, таких как опасные природные процессы. В ряде случаев, для решения задач РСЧС не требуется

полное восстановление транспортных сетей, в отличие от задач, решаемых транспортной отраслью. Задача данной работы заключалась в разработке основы для оценки стратегий восстановления транспортных сетей, с выявлением особенностей каждой из рассмотренных стратегий в условиях неопределенности, а также в повышении эксплуатационной устойчивости. Предложенный подход характеризуется гибкостью, что позволяет лицам, принимающим решения, оценить различные приоритеты, возникающие при развитии конкретной природной чрезвычайной ситуации на определенной территории (например, среднее время восстановления, эффективность процесса восстановления, величина неопределенности) при выборе наиболее желательной стратегии. Показано, что среднее время восстановления не имеет существенного различия между стратегиями, при полном восстановлении транспортной сети. Однако, при частичном восстановлении сети, необходимого для решения задач РСЧС среднее время восстановления зависит от выбранной стратегии.

Таким образом, выбор последовательности участков транспортной сети подлежащих восстановлению можно выделить в качестве оптимальной стратегии в условиях ограниченного доступа к ресурсам. Тем не менее, реализация данной стратегии требует оценки масштабов природной чрезвычайной ситуации, нарушившей связность транспортной сети, а также времени проведения работ по восстановлению.

В данной работе сформулированы и проанализированы четыре стратегии повышения устойчивости транспортной сети, однако количество стратегий может быть расширено в зависимости от топологии сети, местных условий, решаемых лицами, принимающими решения задач. В целом, предложенная методология позволяет оценить различные стратегии восстановления, а также повысить устойчивость транспортных сетей.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that this article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tuzun A.D., Ozdamar L. A mathematical model for post-disaster road restoration: enabling accessibility and evacuation // Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev. 2014. Vol. 61. P. 56–67. doi: 10.1016/j.tre.2013.10.009
2. Çelik M., Ergun Ö., Keskinocak P. The post-disaster debris clearance problem under incomplete information // Oper. Res. 2015. Vol. 63. P. 65–85. doi: 10.1287/opre.2014.1342

3. Schintler L.A., Kulkarni R., Gorman S., Stough R. Using raster-based GIS and graph theory to analyze complex networks // *Netw. Spat. Econ.* 2007. Vol. 7. P. 301–313. doi: 10.1007/s11067-007-9029-4
4. Aydin N.Y., Duzgun H.S., Wenzel F., Heinimann H.R. Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards // *Nat. Hazards.* 2018. Vol. 91. P. 37–68. doi: 10.1007/s11069-017-3112z
5. Shangyao Y., Chu J.C., Yu-Lin S. Optimal scheduling for highway emergency repairs under large-scale supply-demand perturbations // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2014. Vol. 15. P. 2378–2393 doi: 10.1109/TITS.2014.2313628
6. Yan S., Lin C.K., Chen S.Y. Optimal scheduling of logistical support for an emergency roadway repair work schedule // *Eng. Optim.* 2012. Vol. 44. P. 1035–1055. doi: 10.1080/0305215X.2011.628389
7. CRED/UNDRR. The Human Cost of Natural Disasters 2015: A Global Perspective; Centre for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED): Brussels, Belgium. 2015. Vol. 255. doi: 10.1016/b978-0-12-817465-4.00015-7
8. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press; 2021:3–32, doi:10.1017/9781009157896.001
9. Akhtyamov R.G., Mescheriakova N.A. Assessment of the contribution and measures to reduce the impact of the railway industry on the development of global warming // *E3S Web of Conferences.* TT21C-2023. 2023. P. 01001. doi: 10.1051/e3sconf/202338301001
10. Aydin N.Y., Duzgun H., Heinimann H.R., Wenzel F. Framework for improving the resilience and recovery of transportation networks under geohazard risks // *International Journal of Disaster Risk Reduction.* 2018. Vol. 31. P. 832–843. doi: 10.1016/j.ijdr.2018.07.022
11. Maya D.P., Sörensen K. A GRASP metaheuristic to improve accessibility after a disaster // *R Spectr.* 2011. Vol. 33. P. 525–542. doi: 10.1007/s00291-011-0247-2
12. Chang S.E. Transportation planning for disasters: an accessibility approach // *Environ. Plan.* 2003. Vol. 35. P. 1051–1072. doi: 10.1068/a35195
13. Titova T.S., Akhtyamov R.G., Mescheriakova N.A. Ways to improve climate change adaptation plan of the transport // *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023. Vol. 9. P. 5–18. doi: 10.17816/transsyst2023925-18
14. Yang S., Hu F., Thompson R.G., et al. Criticality ranking for components of a transportation network at risk from tropical cyclones // *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2018. Vol. 28. P. 43–55. doi: 10.1016/j.ijdr.2018.02.017
15. Nelson J.R., Grubestic T.H. A repeated sampling method for oil spill impact uncertainty and interpolation // *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2017. Vol. 22. P. 420–430. doi: 10.1016/j.ijdr.2017.01.014
16. D’Lima M., Medda F. A new measure of resilience: an application to the London underground // *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2015. Vol. 81. P. 35–46. doi: 10.1016/j.tra.2015.05.017

17. Padgett J.E., Barbosa A.R., Chen S., Cox D. Multiple-Hazard fragility and restoration models of highway bridges for regional risk and resilience assessment in the United States: state-of-the-art review // *J. Struct. Eng.* 2017. Vol. 143. P. 04016188. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001672
18. Baroud H., Ramirez-Marquez J.E., Barker K., Rocco C.M. Stochastic measures of network resilience: applications to waterway commodity flows // *Risk Anal.* 2014. Vol. 34. P. 1317–1335. doi: 10.1111/risa.12175

REFERENCES

1. Tuzun AD, Ozdamar L. A mathematical model for post-disaster road restoration: enabling accessibility and evacuation. *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.* 2014;61:56–67. doi: 10.1016/j.tre.2013.10.009
2. Çelik M, Ergun Ö, Keskinocak P. The post-disaster debris clearance problem under incomplete information. *Oper. Res.* 2015;63:65–85. doi: 10.1287/opre.2014.1342
3. Schintler LA, Kulkarni R, Gorman S, Stough R. Using raster-based GIS and graph theory to analyze complex networks. *Netw. Spat. Econ.* 2007;7:301–313. doi: 10.1007/s11067-007-9029-4
4. Aydin NY, Duzgun HS, Wenzel F, Heinimann HR. Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards. *Nat. Hazards.* 2018;91:37–68. doi: 10.1007/s11069-017-3112z
5. Shangyao Y, Chu JC, Yu-Lin S. Optimal scheduling for highway emergency repairs under large-scale supply-demand perturbations. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2014;15:2378–2393. doi: 10.1109/TITS.2014.2313628
6. Yan S, Lin CK, Chen SY. Optimal scheduling of logistical support for an emergency roadway repair work schedule. *Eng. Optim.* 2012;44:1035–1055. doi: 10.1080/0305215X.2011.628389
7. CRED/UNDRR. The Human Cost of Natural Disasters 2015: A Global Perspective; Centre for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED): Brussels, Belgium. 2015:255. doi: 10.1016/b978-0-12-817465-4.00015-7
8. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021:3–32. doi:10.1017/9781009157896.001
9. Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Assessment of the contribution and measures to reduce the impact of the railway industry on the development of global warming. *E3S Web of Conferences*. TT21C-2023. 2023:01001. doi: 10.1051/e3sconf/202338301001
10. Aydin NY, Duzgun H, Heinimann HR, Wenzel F. Framework for improving the resilience and recovery of transportation networks under geohazard risks. *International Journal of Disaster Risk Reduction.* 2018;31:832–843. doi: 10.1016/j.ijdr.2018.07.022
11. Maya DP, Sörensen K. A GRASP metaheuristic to improve accessibility after a disaster. *R Spectr.* 2011;33:525–542. doi: 10.1007/s00291-011-0247-2

12. Chang SE. Transportation planning for disasters: an accessibility approach. *Environ. Plan.* 2003;35:1051–1072. doi: 10.1068/a35195
13. Titova TS, Akhtyamov RG, Mescheriakova NA. Ways to improve climate change adaptation plan of the transport. *Modern Transportation Systems and Technologies.* 2023;9:5–18. doi: 10.17816/transsyst2023925-18
14. Yang S, Hu F, Thompson RG, et al. Criticality ranking for components of a transportation network at risk from tropical cyclones. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2018;28:43–55. doi: 10.1016/j.ijdr.2018.02.017
15. Nelson JR, Grubestic TH. A repeated sampling method for oil spill impact uncertainty and interpolation. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 2017;22:420–430. doi: 10.1016/j.ijdr.2017.01.014
16. D’Lima M, Medda F. A new measure of resilience: an application to the London underground. *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 2015;81:35–46. doi: 10.1016/j.tra.2015.05.017
17. Padgett JE, Barbosa AR, Chen S, Cox D. Multiple-Hazard fragility and restoration models of highway bridges for regional risk and resilience assessment in the United States: state-of-the-art review. *J. Struct. Eng.* 2017;143:04016188. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001672
18. Baroud H, Ramirez-Marquez JE, Barker K, Rocco CM. Stochastic measures of network resilience: applications to waterway commodity flows. *Risk Anal.* 2014;34:1317–1335. doi: 10.1111/risa.12175

Сведения об авторе:

Ахтямов Расул Гумерович, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0001-8732-219X;
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru

Information about the author:

Rasul Akhtyamov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
eLibrary SPIN: 2812-3782; ORCID: 0000-0001-8732-219X;
E-mail: ahtamov_zchs@mail.ru