

В. В. Лесных<sup>а)</sup>, Т. Б. Тимофеева<sup>б)</sup><sup>а)</sup> Российский университет дружбы народов (РУДН), г. Москва, Российская Федерация<sup>б)</sup> Государственный университет управления (ГУУ), г. Москва, Российская Федерация<sup>а)</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2043-401X>, e-mail: vvlesnykh@gmail.com<sup>б)</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3783-0046>

## Классификация межсистемных аварий на инфраструктурно сложных территориях<sup>1</sup>

Процесс урбанизации ведет к формированию инфраструктурно сложных территорий. Растущее взаимодействие критических инфраструктур на инфраструктурно сложных территориях в сочетании с увеличением частоты и масштабов экстремальных природных процессов приводит к росту межсистемных аварий. Межсистемные аварии характеризуются каскадными процессами и катастрофическими последствиями для социально-экономического развития региона, затрагивают критически важные инфраструктуры и окружающую среду. Целью работы являются создание и обоснование классификации межсистемных аварий на инфраструктурно сложных территориях во взаимосвязи с задачей оценки адаптивной устойчивости территорий к внешним воздействиям. Авторами выполнен анализ доступных статистических данных по отечественным и зарубежным межсистемным авариям, который показал актуальность проблемы и позволил выявить общие черты межсистемных аварий. Анализ существующих в мировой практике подходов к классификации территорий с учетом их адаптивной устойчивости к внешним воздействиям показал, что существующие классификации не обладают полнотой, только в определенной степени связаны с инфраструктурно сложными территориями и не учитывают возможность возникновения межсистемных аварий. В статье предлагается подход к классификации межсистемных аварий на инфраструктурно сложных территориях, основанный на анализе статистических данных и результатах моделирования каскадных аварий и чрезвычайных ситуаций. В качестве классификационных признаков использованы, в частности, масштаб экономических, социальных последствий, место возникновения аварии, структура развития аварийных процессов. Предложенная классификация позволит провести на ее основе моделирование развития чрезвычайных ситуаций, разработать методы оценки уровня последствий и адаптивной устойчивости инфраструктурно сложных территорий к внешним воздействиям и тем самым повысить адаптивную устойчивость и экономическую эффективность развития регионов. Дальнейшие исследования будут направлены на формирование типовых сценариев развития межсистемных аварий в соответствии с предложенной классификацией и оценку возникающего ущерба.

**Ключевые слова:** урбанизация, инфраструктурно сложные территории, критические инфраструктуры, системы жизнеобеспечения, межсистемные аварии, негативные последствия, ущерб от аварий, адаптивная устойчивость, систематизация статистических данных, классификация межсистемных аварий

### Благодарность

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ проект «Разработка теоретических основ и практических методов анализа, прогнозирования и оценки безопасности при межсистемных взаимодействиях критических инфраструктур на урбанизированных территориях» № 20-010-00812А.

**Для цитирования:** Лесных В. В., Тимофеева Т. Б. Классификация межсистемных аварий на инфраструктурно сложных территориях // Экономика региона. 2022. Т. 18, вып. 2. С. 542-555. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-2-17>.

<sup>1</sup> © Лесных В. В., Тимофеева Т. Б. Текст. 2022.

Valery V. Lesnykh <sup>a)</sup>, Tatiana B. Timofeeva <sup>b)</sup><sup>a)</sup> RUDN University, Moscow, Russian Federation<sup>b)</sup> State University of Management, Moscow, Russian Federation<sup>a)</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2043-401X>, e-mail: vvlesnykh@gmail.com<sup>b)</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3783-0046>

## Classification of Intersystem Accidents in Infrastructure-Complex Territories

Urbanisation led to the establishment of infrastructure-complex territories (ICTs). The growing interaction between critical infrastructures in such territories, combined with an increase in the frequency and scale of natural disasters, caused a surge in intersystem accidents (ISA). ISAs are characterised by cascading processes and catastrophic consequences for regional socio-economic development, since they affect both the critical infrastructure and environment. The paper aims to classify intersystem accidents in infrastructure-complex territories, as well as to assess the adaptive resilience of these areas to external influences. An examination of available statistics on domestic and foreign intersystem accidents demonstrated the importance of the issue and allowed us to identify common features of ISAs. The research analysed various approaches to the classification of territories and their adaptive resilience to external influences, showing that the existing classifications mostly do not consider infrastructure-complex territories and the possibility of intersystem accidents. Based on the analysis of statistical data and simulation of cascade failures and emergencies, the article proposes a new approach to the classification of intersystem accidents in infrastructure-complex territories. The scale of economic and social consequences, location of the accident, structure of the development of emergency processes, and other classification features were used. The proposed classification will help simulate emergencies, develop methods for assessing the consequences and resistance of infrastructure-complex territories to external influences, and, subsequently, increase adaptive resilience and economic efficiency of regional development. Further research will be aimed at predicting the development of ISAs and assessing the resulting damage in accordance with the proposed classification.

**Keywords:** urbanisation, infrastructure-complex territories, critical infrastructures, life support systems, intersystem accidents, negative consequences, damage from accidents, resilience, systematisation of statistical data, classification of intersystem accidents

### Acknowledgments

The article has been prepared with the support of the Russian Foundation for Basic Research, the grant project No. 20-010-00812A «Development of theoretical foundations and practical methods for analyzing, predicting and evaluating security in intersystem interactions of critical infrastructures in urbanized areas».

**For citation:** Lesnykh, V. V. & Timofeeva, T. B. (2022). Classification of Intersystem Accidents in Infrastructure-Complex Territories. *Ekonomika regiona [Economy of regions]*, 18(2), 542-555, <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-2-17>.

### Введение

За последние несколько десятков лет процесс урбанизации развивался достаточно высокими темпами. В 2018 г. около 55 % населения мира (4.2 млрд чел.) проживало в городах, причем к 2030 г. прогнозируется, что доля городского населения в таких регионах, как Европа и Северная Америка, составит 75 % и 82 %, соответственно<sup>1</sup>. В Российской Федерации в 2018 г. процент городского населения превысил 50 % в 79 из 85 регионов страны (Балабейкина, 2018). Процесс урбанизации приводит к формированию территорий, на которых существенно возрастают не только плотность населения, но также

количество и плотность систем жизнеобеспечения, таких как системы энерго- и топливоснабжения, водоснабжения, транспортные и телекоммуникационные системы и т. д. Системы жизнеобеспечения не только имеют сложную структуру и пространственную распределенность, но также и значительно связаны между собой потоками энергии, материалов, информации и пр. Можно говорить о формировании инфраструктурно сложных территорий, число и масштабы которых постоянно возрастают. Под инфраструктурно сложной территорией (ИСТ) будем понимать территорию с высокой концентрацией и высоким уровнем взаимодействия систем жизнеобеспечения. Примерами таких территорий являются Москва и Московская обл., район Дюссельдорф — Кельн, Шанхай, Сингапур и др.

<sup>1</sup> United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423)*. New York: United Nations, 2019. 39 p. (date of access: 02.03.2022).

Системы жизнеобеспечения (критически важные инфраструктуры), входящие в состав ИСТ, обеспечивают высокое качество жизни на всех населенных территориях, однако одновременно являются источниками аварийных и катастрофических ситуаций, последствия которых затрагивают социальную, экономическую и экологическую сферы.

Аварии, возникающие на инфраструктурно сложных территориях, могут иметь масштабные и долговременные последствия, в том числе за счет возможности возникновения межсистемных аварий, включая их каскадное развитие. Под межсистемной аварией (МСА) будет пониматься такое развитие аварийных процессов, когда инициирующее событие в одной системе приводит к негативным последствиям (поломка оборудования, разрушение зданий и сооружений, потери материальных ценностей, ущерб здоровью или гибель людей, снижения качества окружающей среды и пр.) в других взаимосвязанных системах. Одной из основных задач в обеспечении безопасности и устойчивости взаимосвязанных критически важных инфраструктур является выявление мест, где возможно распространение возмущения между системами. Наиболее тяжелые последствия возникают в тех случаях, когда МСА затрагивают критически важные инфраструктуры, включающие в себя в качестве основных такие системы жизнеобеспечения, как энергоснабжение (электричество, природный газ, нефтепродукты, тепло), транспорт, водоснабжение и водоотведение, телекоммуникация и пр. Перечисленные системы связаны между собой материальными, энергетическими и информационными потоками.

Проблема исследования МСА на инфраструктурно сложных территориях находит системное отражение в анализе адаптивной устойчивости взаимодействующих систем жизнеобеспечения (Лесных, 2019; Zhishen, 2020). В статье рассмотрены подходы к классификации МСА во взаимосвязи с проблемой оценки уровня адаптивной устойчивости ИСТ.

### **Современное состояние проблемы и постановка задачи**

Анализ и классификация межсистемных аварий, возникающих в ИСТ, должны проводиться во взаимосвязи с существующей в настоящее время классификацией территорий, причем акцент должен быть сделан, прежде всего, на аспекты, связанные с проблемой оценки адаптивной устойчивости территорий к внешним угрозам.

Анализ нормативных документов и публикаций показывает, что наиболее полно в мировой практике классификация территорий осуществляется в рамках системы гражданской обороны и управления чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера. Например, в США территории классифицируются в зависимости от преобладающего типа угроз природного и техногенного характера<sup>1</sup>. В Российской Федерации отнесение городских или иных территорий к группам по гражданской обороне проводится на основе анализа следующих критериев: численность населения, экономическое значение, наличие промышленных предприятий, которые представляют опасность химического заражения, радиационного загрязнения или катастрофического затопления населения и территорий<sup>2</sup>.

Отдельное направление классификации территорий появилось в связи с развитием нового междисциплинарного направления исследований, связанного с оценкой адаптивной устойчивости объектов и систем к внешним негативным воздействиям. Анализ определений, данных в ряде работ (Малинецкий, 2005; Hosseini, 2016; Rehak, 2019), позволяет в качестве основных признаков адаптивной устойчивости объекта или системы выделить их способность противостоять внешним негативным воздействиям, а также способность восстанавливаться в приемлемый интервал времени и приемлемыми затратами (материальными, финансовыми, психологическими и пр.).

Выполненным за последние два десятилетия исследованиям в области адаптивной устойчивости сложных объектов и систем присуща определенная иерархичность. Свойство адаптивной устойчивости может иметь различное наполнение в зависимости от рассматриваемого объекта или системы. Для сложных объектов (промышленный объект, сооружение, здание) адаптивная устойчивость скорее ближе к понятию живучести, стойкости или уязвимости. Для отдельных систем (организационных, технических, экологических и т. д.) кроме перечисленных выше свойств, присущих отдельным объектам, адаптивная устойчивость обязательно должна включать

<sup>1</sup> US Government. Federal Emergency Management Agency. State and local guide (SLG) 101: guide for all-hazard emergency operations planning. Washington: FEMA, 1996. 276 p. (date of access: 02.03.2022).

<sup>2</sup> Гражданская защита. Понятийно-терминологический словарь / Под общ. ред. Ю. Л. Воробьева. Москва: Флайст, Информационно-издательский центр «Геополитика». 2001. 240 с.

свойство восстанавливаемости. Наибольшую важность и наполнение адаптивная устойчивость имеет для взаимодействующих систем и, прежде всего, для критически важных инфраструктур жизнеобеспечения человека и общества (Gritzalis, 2019). Отсюда следует вывод, что необходимость классификации ИСТ возникает на уровне рассмотрения взаимодействующих систем, то есть исследования «системы систем» (Young, 2018).

Аналогичный иерархический подход к классификации адаптивной устойчивости рассматривается в работе J. Carlson и (Carlson et al., 2012). Автор предлагает семь уровней адаптивной устойчивости в зависимости от типа рассматриваемого объекта или системы: уклонение от угроз, защита или изоляция, прочность или стойкость, избыточность (резервирование), гибкость и адаптивность. Достаточно интересный подход к классификации стран по величине адаптивной устойчивости окружающей среды предложен в работе S. Moghim и G. Kaveh (Moghim, Kaveh, 2018). В нем рассматривается пять уровней адаптивной устойчивости (очень низкая, низкая, средняя, высокая, очень высокая), выполнена классификация более 140 стран.

В работе Т. Holzheu и соавторов (Holzheu et al., 2019) под адаптивной устойчивостью понимается способность экономики или общества минимизировать потери доходов и активов в результате шоковых событий. Некоторые события достаточно масштабны, чтобы создать макроэкономическое воздействие, соответственно, устойчивость общества зависит от способности всей экономики справляться с потрясениями. В связи с этим авторы с позиции рынка страхования предлагают рассматривать два уровня адаптивной устойчивости: макроустойчивость и микроустойчивость. Уровень экономики страны или региона (Европа, Северная Америка и Канада, Азиатско-Тихоокеанский регион, страны развивающейся экономики) предлагается рассматривать как макроуровень адаптивной устойчивости, а микроуровень предлагается использовать для обозначения уязвимости и способности отдельных лиц, домашних хозяйств и предприятий противостоять шоковым событиям. Авторы предлагают использовать страховой рынок как связующее звено между этими уровнями адаптивной устойчивости.

В дополнение к макро- и микроустойчивости, J. Simme (Simmie, 2009) предлагает рассматривать экономическую региональную адаптивную устойчивость как самостоятельный

объект исследований, особо подчеркивая отличие аналогичного понятия для технических и экологических систем.

Подход к классификации территорий с водными ресурсами по уровню адаптивной устойчивости предложен в работе Y. Cuisong, H. Zhenchun (Cuisong, Zhenchun, 2008). Для классификации территорий использовался метод нечеткой кластеризации, в рамках которого выделяется три класса территорий по уровню адаптивной устойчивости: сильная, общая и слабая устойчивость. Каждому классу территории соответствует индекс адаптивной устойчивости, связанный с внешними и внутренними факторами воздействий.

Проведенный анализ показал, что существующие в настоящее время классификации территорий не обладают полнотой, а кроме того, только в определенной степени связаны с ИСТ и не учитывают возможность МСА.

Аварии, возникающие в инфраструктурно сложных территориях, из-за высокой концентрации и высокого уровня взаимодействия систем жизнеобеспечения могут иметь масштабные и долговременные последствия. Именно на таких территориях риск возникновения межсистемных аварий и их каскадного развития особенно велик. Анализ каскадных аварий в системах жизнеобеспечения посвящено достаточно много работ (Снижение рисков..., 2011; Dobson, 2005; Мельников, 2012; Ганага, 2012), в то время как межсистемные аварии, когда рассматривается две и более взаимодействующих системы, исследованы менее глубоко (Newman, 2005; Hokstad, 2012).

Выполненный анализ публикаций показал, что классификация МСА имеет место в основном для отдельных систем жизнеобеспечения. Например, в работе О.А. Мастеровой и А.В. Барской (Мастерова, Барская, 2006) предлагается классификация каскадных аварий в электроэнергетических системах. Все каскадные аварии предлагается условно разделить на несколько групп, в зависимости от типа лавинообразного процесса: лавина асинхронных режимов, лавина частоты, лавина напряжений, лавина перегрузки сетевых элементов.

Каскадные аварии в электроэнергетических системах также классифицируются в зависимости от инициирующего события (короткое замыкание, перегрузка или заброс мощности, ложное отключение релейной защиты и пр.) (Надежность систем..., 2000). Аналогичный подход к классификации каскадных аварий рассматривается и в системах нефтепроводов, когда инициирующими событиями лавино-



образного развития аварии могут быть отключение электроснабжения, авария на насосной станции и пр. (Надежность систем..., 1994).

Концептуальный подход к систематизации и классификации каскадных и межсистемных аварий рассмотрен в работе (Пантелеев, 2017). Для древовидных типов каскадов (линейных, ветвящихся) показана применимость предлагаемого метода и терминологии для гипотетического сценария аварии на энергетическом объекте в условиях Арктики.

Для создания классификации ИСТ, построенной на количественной оценке адаптивной устойчивости, необходимо учитывать результаты исследований, которые связаны с обоснованием количественной меры (уровня) адаптивной устойчивости. Как справедливо отмечено в итоговом отчете Национального консультативного совета по инфраструктуре США, критерий адаптивной устойчивости должен учитывать свойства устойчивости развития, экономической и технической эффективности, безопасности социальных-экономических и экологических составляющих<sup>1</sup>. Однако несмотря на большое число работ по обоснованию критерия адаптивной устойчивости в различных системах (например, (Francis, 2014)), для взаимодействующих систем ИСТ данный подход требует дальнейших исследований.

Выполненный анализ позволяет сделать вывод, что проблема создания и обоснования классификации МСА для инфраструктурно сложных территорий во взаимосвязи с задачей оценки адаптивной устойчивости территорий к внешним воздействиям практически не рассматривалась.

Таким образом, целью данной работы является создание и обоснование классификации межсистемных аварий на инфраструктурно сложных территориях во взаимосвязи с задачей оценки адаптивной устойчивости территорий к внешним воздействиям. Такая классификация даже на качественном уровне станет основой для создания математических моделей и методов решения задач оценки рисков возникновения и развития межсистемных аварий, а также оценки уровня устойчивости данных систем к внешним воздействиям природ-

ного и техногенного характера и их способности к восстановлению.

### Примеры межсистемных аварий и их анализ

Анализ статистических данных произошедших МСА показывает, что наиболее опасными авариями, вызывающими часто катастрофические последствия, являются аварии, затрагивающие две и более системы жизнеобеспечения. Примеры таких аварий приведены в таблице 1.

Рассмотрим более подробно две межсистемные аварии, включая анализ их последствий.

В июле 1977 г. произошла системная авария в Нью-Йорке, которую позднее назвали «Ночь страха». В результате попадания молнии в ЛЭП во всем городе и его пригородах прекратилось электроснабжение с 13 по 14 июля. Удар молнии в высоковольтную подстанцию привел к срабатыванию двух автоматических выключателей в округе Вестчестер. Еще один удар молнии вызвал отключение двух высоковольтных линий электропередач (ЛЭП), соединяющих АЭС Индиан-Пойнт (мощность 900 МВт) с Нью-Йорком. В результате этого две линии электропередач оказались перегружены, дистанционно запустить аварийные турбогенераторы не удалось. Дальнейшее развитие аварии привело к перегрузке сохранявших работоспособность ЛЭП. После этого потребовалось снижение нагрузки на другие генераторы электрической сети.<sup>2</sup>

После этого последовательно стали срабатывать выключатели на оставшихся ЛЭП, и весь Нью-Йорк и пригороды оказались изолированы от электросети. Процесс развития аварии показан на рисунке 1

В результате аварии произошли перерывы в работе транспорта, коммунальных служб и системах коммуникации. Однако наибольший ущерб (материальный, финансовый и пр.) был связан с возникшими массовыми беспорядками. В ряде районов города начались массовые грабежи. Грабители нападали на магазины и дома обеспеченных жителей города, мародерством занимались более 100 тысяч человек. Чтобы отвлечь внимание полицейских, мародеры поджигали здания — в городе было зарегистрировано 1077 поджогов, при тушении которых пострадали более 100 пожарных. Только за два дня полиция арестовала более 3766 чел., было разграблено более 1500 магази-

<sup>1</sup> Baylis, Jack & Gerstell, Glenn S. & Scott, Beverly & Grayson, Margaret E. & Lau, Constance & Nicholson, Jim (2015). National Infrastructure Advisory Council Transportation Sector Resilience Final Report and Recommendations July 10, 2015. Url: <https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/niac-transportation-resilience-final-report-07-10-15-508.pdf> (date of access: 02.03.2020).

<sup>2</sup> Авария в энергосистеме в Нью-Йорке. UPL: <https://mirznanii.com/a/343636/avariya-v-energosisisteme-v-nyu-yorke-1977/> (дата обращения: 20.03.2020).

Таблица 1

## Примеры наиболее крупных межсистемных аварий

Table 1

## Examples of the largest intersystem accidents

Место и дата аварии	Описание аварии
1977, США, Нью-Йорк	Из-за попадания молнии в линию электропередач Нью-Йорк и его пригороды остались без электроснабжения с 13 по 14 июля. Отключение в 21:27 Рейнвествудской ТЭЦ привело к остановке транспорта, значительным перебоям в мобильной связи и в работе коммунальных служб города
1979, Россия, Норильск	При температуре в $-50^{\circ}\text{C}$ произошел разрыв газопровода. Из-за резкого падения давления деформация распространилась на 58 километров. Более 40 километров газопровода было разрушено в результате этой аварии. Теплоснабжение Норильска было прервано на несколько дней. Возникли также значительные перебои в электроснабжении, работе транспорта, коммунальных предприятий. Последствия аварии были устранены в течение трех дней. Стоимость причиненного ущерба составила 2,8 млн руб.
2003, США и Канада	В августе 2003 г. в ряде крупнейших городов восточного побережья США и Канады, отключение электричества произошло в городах Нью-Йорк, Детройт, Кливленд, Торонто, Оттава и других. Авария в электросистеме привела к веерным отключениям электроэнергии на площади более 24 тыс. км <sup>2</sup> . Последствия аварии затронули более 50 млн чел., было остановлено свыше 100 электростанций, в том числе две АЭС. Восстановление энергоснабжения потребовало более суток, а финансовый ущерб составил более 6 млрд долл.
2003, Аппенинский п-ов	Из-за системной аварии в системе электроснабжения Италии, первым звеном которой было падение дерева, в трех странах (Ватикан, Италия и Сан-Марино) произошло массовое отключение потребителей электроэнергии. 57 млн жителей провели без электроснабжения от 5 до 16 часов. Отключение электроэнергии привело к значительным сбоям в работе коммунальных служб, транспорта, систем связи
2004, КНДР	22 апреля на станции Рончхон в 50 км от Пхеньяна произошла крупная железнодорожная катастрофа. Вагоны с нитратом аммония сошли с рельсов и задели линии электропередач. Электрический кабель под высоким напряжением упал на вагон с химикатами, в результате чего произошел взрыв. Было разрушено около 1750 домов. Погибло около 300 чел., более 3000 получили ранения
2005, Россия, г. Москва	В результате пожара на Чагинской электроподстанции г. Москвы возникла системная авария, в результате которой произошло прекращение электроснабжения во многих районах столицы, ряде городов Подмосковья и Тульской области. Произошли сбои в работе столичного метро (50 станций) и наземного транспорта, включая систему регулирования движения. В ряде районов Москвы и Подмосковья возникли перерывы в водоснабжении. Авария повлияла на работу промышленных предприятий, объектов сферы услуг (торговля, финансы, телекоммуникация)
2006, Россия, г. Электросталь	Из-за кратковременного отключения электроэнергии произошел сбой в работе котельной, последовал гидравлический удар и прорыв трубы теплотрассы. В результате чего без теплоснабжения при температуре $-25^{\circ}\text{C}$ остались жители 371 дома с населением 38 800 чел. На восстановление теплоснабжения ушло более 3 суток
2007, Украина, Винницкая обл.	На газопроводе «Уренгой — Помары — Ужгород» произошел взрыв газа с дальнейшим возгоранием. Повреждено около 30 м газопровода, был перекрыт участок газопровода длиной около 25 км. Авария привела к прекращению газоснабжения в 22 населенных пунктах Винницкой области с населением около 36 тыс. чел.
2008, Россия, Улан-Удэ	В феврале 2008 г. произошла крупная авария, в результате которой были отключены все шесть котлов ТЭЦ, без теплоснабжения остались 524 дома города — свыше 170 тыс. жителей. В городе был введен режим чрезвычайной ситуации, ограничено электроснабжение, возникли перебои в работе транспорта, отменены занятия в школах
2008, ЮАР	Авария в электроэнергетической системе, вызванная системными проблемами, накапливавшимися в течение ряда лет, вызвала остановку работы производств, шахт, нарушениями в электро- и водоснабжении, значительных перебоях в работе транспорта
2009, Россия	В августе произошла крупная техногенная авария на Саяно-Шушенской ГЭС. В результате разрушения третьего и четвертого водоводов, произошло разрушение стены и подтопление машинного зала. В результате девять из десяти гидротурбин полностью вышли из строя, станция была остановлена. Это привело к нарушению энергоснабжению нескольких сибирских регионов. Веерные отключения привели к перерывам

Место и дата аварии	Описание аварии
	в электроснабжения г. Томска, а также ряда промышленных предприятий, в том числе сибирских алюминиевых заводов. Авария привела к серьезным социальным последствиям погибли 75 чел., 13 пострадали
2012, Индия	В июле в северных регионах Индии произошла авария в электроэнергетической системе, в результате которой без электричества осталось около четверти населения страны. Пострадали все крупные штаты, а также столица страны — Нью-Дели. Серьезные последствия возникли в транспортной системе — было остановлено метро в Дели, на автомобильных дорогах отключены светофоры, что привело к транспортному коллапсу. Во второй день аварии последствия затронули еще более 600 млн чел. в 19 штатах севера и востока, включая остановку железнодорожного движения. Кроме этого, в угольных шахтах Восточной Индии под землей было заблокировано около 200 рабочих
2022, Казахстан, Кыргызстан, Узбекистан	В январе на юге Казахстана, большей части Киргизии и на востоке Узбекистана произошло отключение электроэнергии причиной масштабного сбоя в электроснабжении нескольких стран Центральной Азии стала перегрузка транзитной линии в Казахстане. В Алма-Ате и области было обесточено более 92 тыс. потребителей. Была обесточена большая часть Бишкека, а также город Ош и несколько других городов и районов. В столице Кыргызстана отключилось тепло и водоснабжение. Кроме того, произошел сбой в системах телекоммуникации, включая финансовую сферу. В Узбекистане авария в энергосистеме привела к автоматическому отключению четырех ТЭС

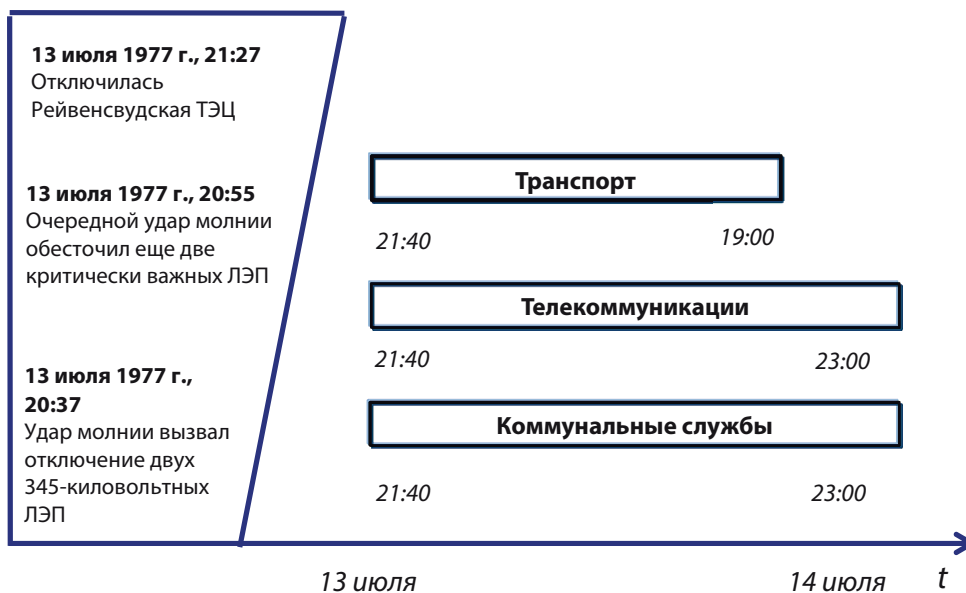


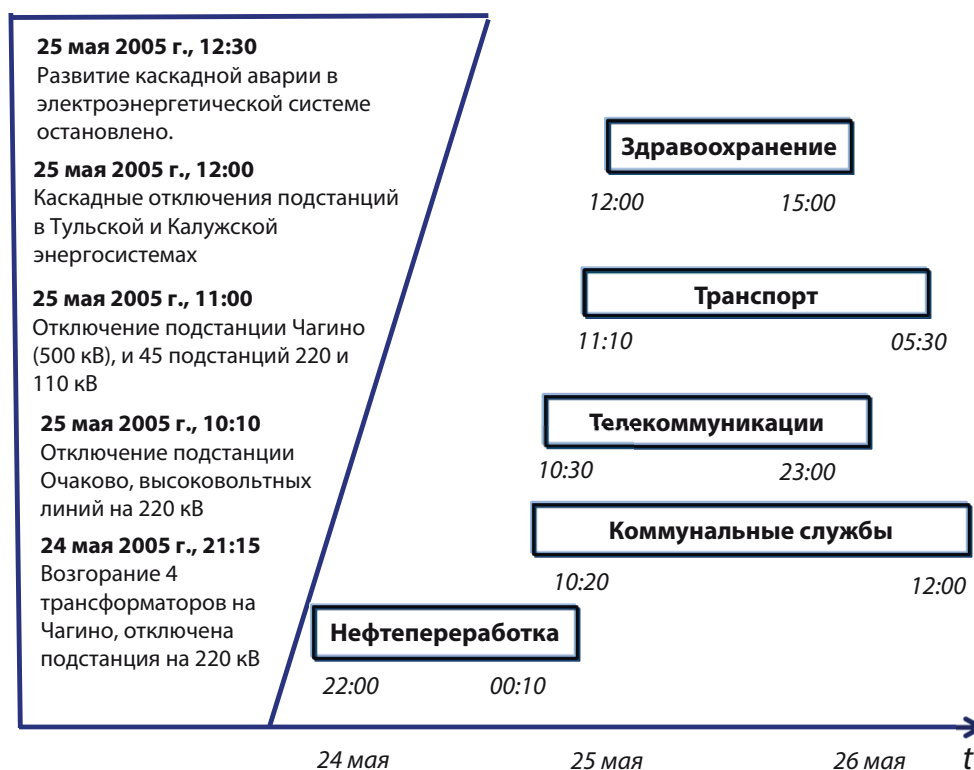
Рис. 1. Схема развития МСА в энергосистеме г. Нью-Йорка в 1977 г.  
Fig. 1. Development scheme of the ISA in the power system of New York City, 1977

нов. При анализе этой аварии можно отметить преобладание социальных (криминогенных) последствий. Общий ущерб от аварии оценивается, по разным источникам, от 500 млн до 1 млрд долл.

Рассмотрим МСА, которая произошла в Московском регионе в мае 2005 г. В результате этой аварии несколько районов Москвы, а также часть Подмосковья, Тульской, Калужской и Рязанской областей остались без электроснабжения. Авария началась на электроподстанции № 510 Чагино на юго-востоке Москвы в районе Капотня. Подстанция

Чагино входит в Московское энергетическое кольцо, от которого электроэнергия подается в Москву, Московскую и соседние области. Графическая иллюстрация развития аварии представлена на рисунке 2.

Авария привела к перебоям в работе энергосистемы всей европейской части России. Наблюдалось каскадное отключение подстанций в нескольких районах Москвы, городах Подмосковья и близлежащих областях. Пять электростанций ТЭЦ в Москве и пятнадцать питающих центров также были отключены. В Московской области отключенными от элек-



**Рис. 2.** Схема развития межсистемной аварии 25 мая 2005 г. в Московском регионе  
**Fig. 2.** Development scheme of the ISA in the Moscow region, May 25, 2005

троснабжения оказались 34 района, полное отключение электроэнергии произошло в городе Тула.

Многие государственные учреждения, такие как Совет Федерации, Генеральный штаб, службы военных сил РФ, были переведены на резервные источники питания. Из-за перебоев в электроснабжении проблемы в работе испытывали московские биржи РТС и ММВБ, коммерческие банки, часть российского сегмента интернета, операторы мобильной связи Москвы и Московского региона.

В течение 25 мая не работали все предприятия в промышленных зонах столицы, а также торговые сети на юге г. Москвы. Также возникли перерывы в водоснабжении в южных и юго-западных частях столицы.

Самый большой перерыв в работе произошел в Московском метро. Полностью или частично отсутствовало движение на нескольких линиях, была остановлена работа 52 из 170 станций метрополитена. Были эвакуированы пассажиры из 27 поездов, которые находились в тоннелях.

По оценкам от аварии пострадали около 2 млн чел. в Москве и соседних регионах. Экономический ущерб Москвы от аварии составил 1,708 млрд руб., Московской области — 503,94 млн руб., Тульской области — 436,8 млн руб.

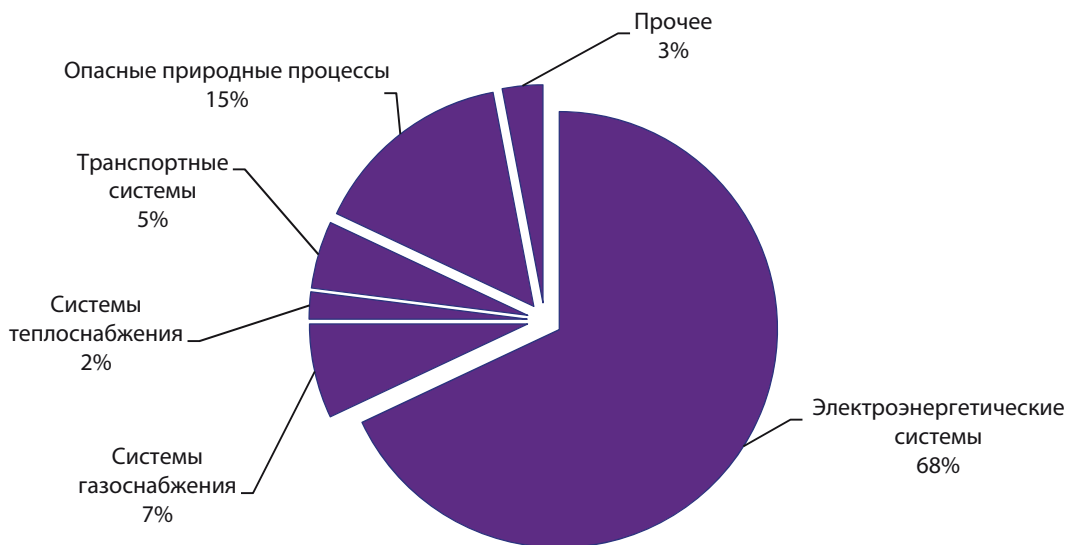
Масштаб аварии вызван сочетанием нескольких факторов: износ оборудования, отсутствие резервных мощностей, жаркая погода в течение нескольких дней (свыше 30 °С). Свою роль сыграла также сложная топология электрических схем Москвы и отсутствие специальной автоматики отключения нагрузки и отсутствие единой системы диспетчеризации<sup>1</sup>.

Анализ процесса развития описанных аварий показывает, что каскадное развитие аварийных процессов в системах жизнеобеспечения приводит к масштабным социальным, материальным, финансовым и другим потерям. Ущерб, а также нарушение устойчивого развития проявляются как на уровне отдельного города, так и больших территориях, включая административные и экономические регионы.

Рассмотренные межсистемные аварии существенно различаются источниками инициирования МСА, сценариями развития аварийного процесса, длительностью проявления негативных последствий, числом и видом вовлеченных инфраструктурных систем и масштабом последствий. В связи с этим целесообразно выполнить классификацию МСА, что позволит обосновать подходы к моделиро-

<sup>1</sup> Крупнейшие техногенные катастрофы Москвы. URL: <https://federalcity.ru/index.php?newsid=4895> (дата обращения 15.04.2020).





**Рис. 3.** Распределение МСА по месту иницирующего события  
**Рис. 3.** Distribution of ISAs according to the location of the initiating event

ванию аварийных процессов взаимодействующих инфраструктурных систем.

#### Классификация межсистемных аварий на инфраструктурно сложных территориях

В общем случае возможны различные подходы к классификации межсистемных аварий на инфраструктурно сложных территориях, набор классификационных признаков существенно зависит от проблемы, в рамках которой планируется использовать классификацию.

Авария является межсистемной, если в ней затронута две и более систем жизнеобеспечения (электроэнергетика, газоснабжение, теплоснабжение, транспорт и др.)

В настоящей работе МСА рассматриваются в рамках задачи оценки и обеспечения адаптивной устойчивости ИСТ. С учетом сказанного, для решения задач оценки и обеспечения адаптивной устойчивости региона в качестве классификационных признаков МСА в ИСТ предлагается выбрать следующие показатели:

- место возникновения аварии;
- количество вовлеченных систем;
- распределенность в пространстве;
- масштаб экономических последствий;
- масштаб социальных последствий;
- природа образующихся опасных факторов;
- структура развития аварийных процессов.

**По месту возникновения МСА в ИСТ** классификационные признаки соотносятся с признаками классификации по структуре ИСТ и могут быть классифицированы по виду инфраструктурной системы, в которой возникло

иницирующее событие. К таким иницирующим МСА-системам могут быть отнесены электроэнергетическая, транспортная системы, а также системы газоснабжения, водоснабжения и связи.

Тогда по месту возникновения можно выделить:

- аварии, иницируемые отказом в электроэнергетической системе;
- аварии, иницируемые отказом в системе газоснабжения;
- аварии, иницируемые отказом в транспортной системе;
- аварии, иницируемые отказом в системе водоснабжения;
- аварии, иницируемые отказом в системе связи;
- аварии, иницируемые отказом одновременно в нескольких системах.

Последняя составляющая данного списка может относиться к ситуации, когда МСА в ИСТ инициирована опасными стихийными процессами (землетрясение, наводнение, ураган и т. д.). Анализ статистических данных показал, что наиболее часто иницирующим событием межсистемных аварий являются аварии в электроэнергетических системах (рис. 3).

Примером МСА, в которой иницирующее событие произошло в транспортной системе, является крупная железнодорожная катастрофа, произошедшая на станции Рончхон в 50 км от Пхеньяна (КНДР). Вагоны с нитратом аммония сошли с рельсов и задели линии электропередач. Электрический кабель под высоким напряжением упал на вагон с химикатами,

Таблица 2

## Примеры вовлеченности инфраструктурных систем в МСА

Table 2

## Examples of the involvement of infrastructures in intersystem accidents

Система	Распределенные МСА	Макрораспределенные МСА	Мегараспределенные МСА
Электро-энергетическая система (инициатор МСА)	Теплоснабжение	Транспорт	Транспорт
	Коммунальные службы (электроснабжение домов, лифты, вентиляция)	Телекоммуникационные системы	Телекоммуникационные системы
		Коммунальные службы (электроснабжение домов, лифты, вентиляция)	Коммунальные службы (электроснабжение домов, лифты, вентиляция)
		Водоснабжение	Водоснабжение
		Теплоснабжение	Теплоснабжение
			Газоснабжение
			Нефтеснабжение
Примеры аварий	2006 — Россия, г. Электросталь	08.2003 — восточное побережье США и Канады	07.2005 — Московский регион

в результате чего произошел взрыв. Было разрушено около 1750 домов.

**По масштабу аварии МСА в ИСТ** (количество участвующих в МСА систем) можно выделить:

— распределенные МСА — отказы произошли в 2–3 системах;

— макрораспределенные МСА — отказы произошли в 4–6 системах;

— мегараспределенные МСА — отказы произошли более чем в 6 системах.

В таблице 2 приведен пример вовлеченности различных систем в аварию с учетом ее масштаба, для случая, когда инициирующее событие произошло в электроэнергетической системе.

**По распределенности МСА в пространстве** можно выделить:

— аварии на уровне района (районов) города;

— аварии на уровне территории города или промышленной агломерации;

— аварии, охватывающие город и прилегающие области или регионы;

— аварии, охватывающие несколько областей или регионов.

Примером МСА, когда последствия затронули несколько областей, является авария, произошедшая 7 октября 2003 в нескольких областях центральной и черноземной зон России. В результате урагана были оборваны многие линии электропередач. Во Владимирской области без света остались 970 населенных пунктов, в Липецкой и Смоленской — 580 сел, в Тамбовской и Белгородской — 200 населенных пунктов.

**По уровню экономических последствий** межсистемные аварии в ИСТ можно разделить на:

— микроэкономические — последствия МСА проявляются на уровне отдельных организаций;

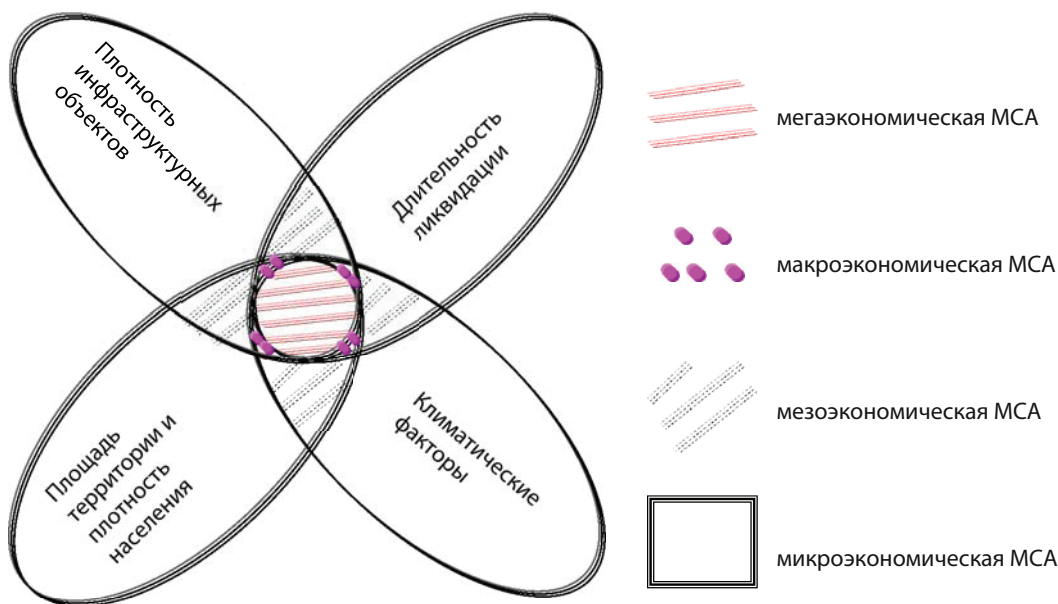
— макроэкономические — последствия МСА проявляются на уровне совокупности организаций нескольких отраслей экономики или сфер бизнеса;

— мезоэкономические — последствия МСА проявляются на уровне отдельных отраслей экономики;

— мегаэкономические — последствия МСА связаны с национальной экономикой, несколькими государствами или секторами мировой экономики.

Анализ произошедших МСА в различных ИСТ показал, что для возникновения МСА с большим масштабом экономических последствий необходимо совпадение 3 и более факторов, характеризующих как рассматриваемую территорию, так и внешние условия. К числу таких факторов могут быть отнесены длительность ликвидации МСА, площадь ИСТ, подверженной МСА, плотность инфраструктурных объектов МСА, плотность населения в зоне ИСТ, природно-климатические факторы (низкая температура воздуха, влажность, сильный ветер, сложный ландшафт и пр.).

Анализ показал, что наличие только одного из перечисленных факторов чаще всего приводит к микроэкономической МСА, сочетание двух факторов инициирует мезоэкономическую МСА, три или четыре фактора в большинстве случаев инициируют макроэкономическую МСА и одновременное наличие пяти из вышеперечисленных факторов могут повлечь за собой мегаэкономические последствия. Графическая интерпретация влияния факторов на масштабы МСА показана на рисунке 4.



**Рис. 4.** Графическая интерпретация влияния факторов на масштабы МСА  
**Fig. 4.** Graphical interpretation of the influence of factors on the scale of ISAs

**По масштабу социальных последствий** выделим:

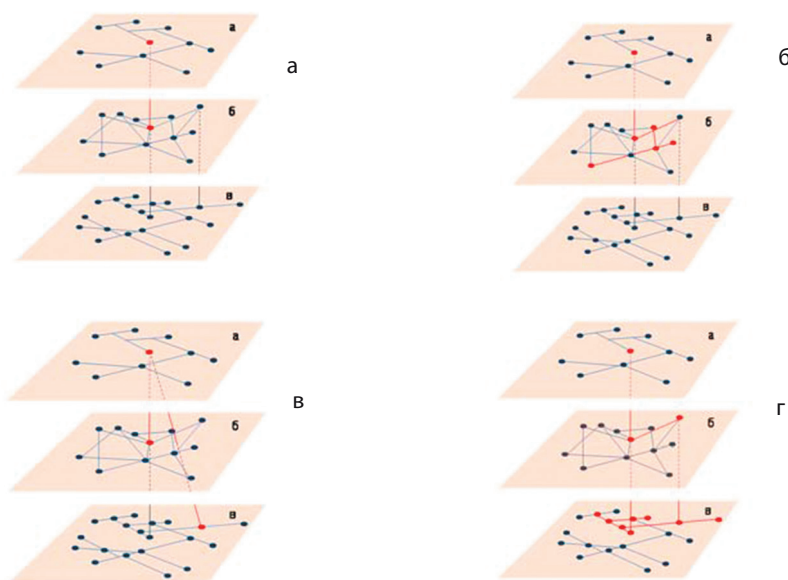
- локальные аварии — последствия отразились на группах людей;
- региональные аварии — пострадали общности людей на отдельных территориях (область, регион);
- межрегиональные аварии — последствия ощутимы на национальном и межстрановом уровне.

Примером межрегиональной МСА, когда социальные последствия в виде смертельных случаев и заболеваний разной тяжести прояв-

ляются у населения нескольких стран, является авария на Чернобыльской АЭС в мае 1986 г.

Если в межсистемных авариях присутствуют опасные производственные объекты, размещенные в ИСТ, целесообразно провести классификацию по природе образующихся опасных факторов:

- МСА с образующимися химически опасными факторами;
- МСА с образующимися пожаро- и взрывоопасными факторами;
- МСА с образующимися биологически опасными факторами;



**Рис. 5.** Классификация МСА по типу развития аварийных процессов.  
**Fig. 5.** ISA classification according to the type of the development of emergency processes

— МСА с образующимися гидродинамически опасными факторами;

— МСА с комплексным проявлением опасных факторов.

Анализ произошедших МСА и также качественный анализ возможных топологий сценариев развития МСА в ИСТ позволили предложить авторами следующую классификацию структуры МСА (Lesnykh, 2016):

аварии с отсутствием ветвления (рис. 5а);

аварии с ветвлением в системах (рис. 5б);

аварии с ветвлением между системами (рис. 5в);

аварии с ветвлением в системах и между системами (рис. 5г).

Приведенные на рисунке 5 слои представляют собой различные взаимодействующие системы жизнеобеспечения. Связи между слоями (пунктирные линии) отражают передачу возмущений, возникающих в результате аварий. Наиболее масштабные последствия возникают в случае возникновения каскадного развития аварии в нескольких взаимодействую-

щих системах (рис. 5г). Интерес также представляет ситуация, когда возникает межсистемный каскад, при этом в самих системах каскадного развития аварий не наблюдается (рис. 5в).

### Заключение

Необходимость проведенного анализа и классификации связана с многообразием МСА и необходимостью выбора методических и модельных подходов к оценке уровня адаптивной устойчивости инфраструктурно сложных территорий. Предложенные классификационные признаки, включающие достаточно широкий набор характеристик, могут быть основой для дальнейшего развития системы классификации МСА. Предложенные качественные подходы к выбору классификационных признаков могут быть использованы для обоснования состава математических моделей инфраструктурно сложных территорий, формирования требований к критерию оценки адаптивной устойчивости и создания моделей взаимодействующих систем в составе ИСТ.

### Список источников

- Балабейкина О. А., Файбусович Э. Л. Уровень урбанизации территорий Российской Федерации. Региональный аспект // Географический вестник. 2018. № 1 (44). С. 72–82. DOI: doi.org/10.17072/2079-7877-2018-1-72-82.
- Ганага С. В., Ковалев С. А. Моделирование аварии в местах пересечения трубопроводов с помощью программных комплексов ANSYS и LS-DYNA // Вести газовой науки. 2012. № 10. С.133–140.
- Лесных В. В., Тимофеева Т. Б. Адаптивная устойчивость сложных объектов и систем — мода или новая парадигма? // Управление риском. 2019. № 4. С. 48–52.
- Малинецкий Г. Г., Кочкаров А. А. Управление безопасностью и стойкостью сложных систем к внешним воздействиям // Проблемы управления. 2005. № 5. С. 70–76.
- Мастерова О. А., Барская А. В. Эксплуатация электроэнергетических систем и сетей: учеб. пособие. Томск : ТПУ, 2006. 100 с.
- Мельников А. В. Анализ риска. Каскадные аварии на объектах добычи природного газа. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 224 с.
- Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник в 4 т. / под общ. ред. Ю. Н. Руденко. Т. 2: Надежность электроэнергетических систем. Москва : Энергоатомиздат, 2000. 565 с.
- Надежность систем энергетики и их оборудования: справочник в 4 т. / под общ. ред. Ю. Н. Руденко. Т. 3. Кн. 1 Надежность систем газо- и нефтеснабжения. Москва : Недра, 1994. 414 с.
- Метод описания сценариев каскадных и межсистемных аварий / В. А. Пантелеев, И. А. Кириллов, М. А. Берберова, С. В. Клименко // Ситуационные центры и информационно-аналитические системы для задач мониторинга и безопасности (SCVRT2017). Труды междунар. конф. Москва — Протвино, 28–30 нояб. 2017 г. С. 239–244.
- Снижение рисков каскадных аварий в электроэнергетических системах / отв. ред. Н. И. Воропай. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011. 303 с.
- A meta-model for representing system-of-systems ontologies / M. Young, S. Jiyoun, S. Yong-Jun, et al. // Proceedings of the 6th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems May 29. Sweden : Gothenburg, 2018. 33 p. P. 1–7.
- Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements / D. Rehak, et al. // International Journal of Critical Infrastructure Protection. 2019. No. 25. P. 125–138. DOI: doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.03.003.
- Dobson I., Carreras B. A., Newman D. E. A Loading-Dependent Model of Probabilistic Cascading Failure // Probability in the Engineering and Informational Sciences. 2005. No. 19 (1). P. 15–32.
- Francis R., Bekera B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems // Reliability Engineering & System Safety. 2014. No. 121. P. 90–103.
- Gritzalis D., Theoharidou M., Stergiopoulos G. Critical Infrastructure Security and Resilience: Theories, Methods, Tools and Technologies. Heidelberg : Springer, 2019. 313 p.



Hokstad Per, Utne I., Vatn J. Risk and Interdependencies in Critical Infrastructures: A Guideline for Analysis. London : Springer-Verlag, 2012. 252 p.

Hosseini S., Barker K., Ramirez Marquez J. E. A review of definitions and measures of system resilience // Reliability Engineering & System Safety. 2016. No. 145. P. 47–61.

Indexing resilience: a primer for insurance markets and economies / T. Holzheu, P. Saner, M. Rischatsch, et al. // Sigma. 2019. No. 5. P. 1–44.

Lesnykh V., Petrov V., Timofeeva T. Problems of Risk Assessment in Intersystem Failures of Life Support Facilities // International Journal of Critical Infrastructures. 2016. No. 12 (3). P. 213–228. DOI: doi.org/10.1504/IJCIS.2016.079014.

Moghim S., Kaveh G. Countries' classification by environmental resilience // Journal of environmental management. 2018. No. 230. P. 345–351.

Resilience: Theory and Application / J. Carlson, R. Haffenden, G. Bassett, et al. // Argonne National Laboratory Report. United States: N. p., 2012. P. 1–64. DOI: doi.org/10.2172/1044521.

Risk Assessment in Complex Interacting Infrastructure Systems / D. E. Newman, B. Nkei, B. A. Carreras, et al. // Proceedings of 2nd thirty-eighth Hawaii International Conference on System Sciences. 2005. P. 62–63. DOI: doi.org/10.1109/HICSS.2005.524.

Simmie J. The economic resilience of regions: Towards an evolutionary approach // Cambridge Journal of Regions, Economy and Society. 2009. No. 3 (1). P. 27–43. DOI: doi.org/10.1093/cjres/rsp029.

Wu Z., Lu X., Noori M. Resilience of Critical Infrastructure Systems. Emerging Developments and Future Challenges. Boca Raton Publishing, 2020. 244 p. DOI: doi.org/10.1201/9780367477394.

Yu C., Hao Z. Resilience Classification Research of Water Resources System in a Changing Environment // Proceedings of 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. 2008. P. 3741–3744. DOI: doi.org/10.1109/ICBBE.2008.437.

## References

Baek, Y. M., Song, J., Shin, Y. J., Park, S. & Bae, D. (2018). A meta-model for representing system-of-systems ontologies. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems May 29, 2018* (pp. 1–7). Sweden: Gothenburg. DOI: 10.1145/3194754.3194755.

Balabeikina, O. & Faibusovich, E. (2018). The urban extension level of the Russian Federation's territory: regional aspect. *Geographical Bulletin [Geograficheskiy vestnik]*, 1(44), 72–82 DOI: 10.17072/2079-7877-2018-1-72-82. (In Russ.)

Carlson, J., Haffenden, R., Bassett, G., Buehring, W., Collins, M., Folga, S., ... Whitfield, R. (2012). *Resilience: Theory and Application*. Argonne National Laboratory Report, 64. DOI: 10.2172/1044521

Dobson, I., Carreras, B. A. & Newman, D. E. (2005) A Loading-Dependent Model of Probabilistic Cascading Failure. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 19(1), 15–32.

Francis, R. & Bekera B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 90–103.

Ganaga, S. V. & Kovalev, S. A. (2012). Modeling the Accident at the Pipeline Intercrossing Using ANSYS and LS-DYNA Software. *Vesti Gazovoy Nauki*, 2(10), 133–140. (In Russ.)

Gritzalis, D., Theoharidou, M. & Stergiopoulos, G. (2019). *Critical Infrastructure Security and Resilience: Theories, Methods, Tools and Technologies*. Heidelberg: Springer, 313.

Hokstad, P., Utne, I. & Vatn, J. (Eds.) (2012). *Risk and Interdependencies in Critical Infrastructures: A Guideline for Analysis*. London: Springer-Verlag, 252.

Holzheu, T., Saner, P., Rischatsch, M., Tamm, K. & Lechner, R. (2019). Indexing resilience: a primer for insurance markets and economies. *Sigma*, 5, 1–44.

Hosseini, S., Barker, K. & Ramirez Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47–61.

Lesnykh, V. & Timofeeva, T. (2019). Resilience — Fashion or New Paradigm? *Upravlenie riskom [Risk Management]*, 4, 48–52. (In Russ.)

Lesnykh, V., Petrov, V. & Timofeeva, T. (2016). Problems of Risk Assessment in Intersystem Failures of Life Support Facilities. *International Journal of Critical Infrastructures*, 12(3), 213–228. DOI: 10.1504/IJCIS.2016.079014.

Malinetski, G. G. & Kochkarov, A. A. (2005). Safety and resilience management of complex systems under external impact. *Problemy upravleniya [Control Sciences]*, 5, 70–76. (In Russ.)

Masterova, O. A. & Barskya, A. V. (2006). *Ekspluatatsiya elektroenergeticheskikh sistem i setey: ucheb. Posobie [Operation of power systems and networks]*. Tomsk: TPU, 100. (In Russ.)

Melnikov, A. V. (2007). *Analiz riska. Kaskadnye avarii na obektakh dobychi prirodnogo gaza [Risk analysis. Cascade Accidents at Natural Gas Production Facilities]*. LAP Lambert Academic Publishing, 224.

Moghim, S. & Kaveh Garna, R. (2018). Countries' classification by environmental resilience. *Journal of environmental management*, 230, 345–351.

Newman, D. E., Nkei, B., Carreras, B. A., Dobson, I., Lynch, V. E. & Gradney, P. (2005). Risk Assessment in Complex Interacting Infrastructure Systems. In: *Proceedings of 2nd thirty-eighth Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 62–63). Hawaii. DOI: 10.1109/HICSS.2005.524.

Pantelev, V. A., Kirillov, I. A., Berberova, M. A. & Klimenko, S. V. (2017). Method Cascade and Intersystem Accidents Scenarios Description. In: *Trudy mezhdunar. konf. «Situatsionnye tsentry i informatsionno-analiticheskie sistemy dlya zadach monitoringa i bezopasnosti (SCVRT2017)» [SCVRT2017 The Conference Proceedings]* (pp. 239–244). Moscow: Protvino. (In Russ.)

Rehak, D., Senovsky, P., Hromada, M. & Lovecek, T. (2019). Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 25, 125–138. DOI: 10.1016/j.ijcip.2019.03.003

Rudenko, Yu. N. (Ed.). (1994). *Nadezhnost sistem energetiki i ikh oborudovaniya: spravochnik v 4 t. T. 3. Kn. 1 Nadezhnost sistem gazo- i neftesnabzheniya [Reliability of Power Systems and Their Equipment. Handbook. In 4 volumes. Vol. 3. Book 1. Reliability of gas and oil transportation systems]*. Moscow: Nedra, 414. (In Russ.)

Rudenko, Yu. N. (Ed.). (2000). *Nadezhnost sistem energetiki i ikh oborudovaniya. Spravochnik v 4 t. T. 2: Nadezhnost elektroenergeticheskikh sistem [Reliability of Power Systems and Their Equipment. Handbook. In 4 volumes. Vol. 2. Reliability of Power Systems]*. Moscow: Energoatomizdat, 565. (In Russ.)

Simmie, J. (2009). The economic resilience of regions: Towards an evolutionary approach. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 3(1), 27–43. DOI: 10.1093/cjres/rsp029.

Voropai, N. I. (Ed.). (2011). *Snizhenie riskov kaskadnykh avariiv v elektroenergeticheskikh sistemakh [Reducing the risk of cascading blackouts in electric power systems]*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 302. (In Russ.)

Wu, Z., Lu, X. & Noori, M. (2020). *Resilience of Critical Infrastructure Systems. Emerging Developments and Future Challenges*. Boca Raton Publishing, 244. DOI: 10.1201/9780367477394

Yu, C. & Hao, Z. (2008). Resilience Classification Research of Water Resources System in a Changing Environment. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering* (pp. 3741–3744). DOI: 10.1109/ICBBE.2008.437.

### Информация об авторах

**Лесных Валерий Витальевич** — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, Российский университет дружбы народов (РУДН); Scopus Author ID: 6602914103; <https://orcid.org/0000-0003-2043-401X> (Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: [vvlesnykh@gmail.com](mailto:vvlesnykh@gmail.com)).

**Тимофеева Татьяна Борисовна** — кандидат технических наук, доцент, Государственный университет управления (ГУУ); Scopus Author ID: 57191157903 <https://orcid.org/0000-0002-3783-0046> (Российская Федерация, 115432, г. Москва, Рязанский пр-кт, д. 99; e-mail: [tanuta75@mail.ru](mailto:tanuta75@mail.ru)).

### About the authors

**Valery V. Lesnykh** — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Science Worker of the Russian Federation, RUDN University; Scopus Author ID: 6602914103; <http://orcid.org/0000-0003-2043-401X> (6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: [vvlesnykh@gmail.com](mailto:vvlesnykh@gmail.com)).

**Tatiana B. Timofeeva** — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, State University of Management, Scopus Author ID: 57191157903; <https://orcid.org/0000-0002-3783-0046> (99, Ryazanskiy Ave., Moscow, 115432, Russian Federation; e-mail: [tanuta75@mail.ru](mailto:tanuta75@mail.ru)).

*Дата поступления рукописи: 18.05.2020.*

*Прошла рецензирование: 28.07.2020.*

*Принято решение о публикации: 07.04.2022.*

*Received: 18 May 2020.*

*Reviewed: 28 Jul 2020.*

*Accepted: 07 Apr 2022.*