

Формальные модели жизнеспособности региональных критических инфраструктур*

А.В. МАСЛОБОВ

Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты, Россия

Аннотация. В работе проведен системный анализ известных формальных моделей и метрик оценки жизнеспособности критических инфраструктур. Рассмотренные модели и метрики являются формальной основой имитационного моделирования и автоматизации процессов управления рисками и комплексной безопасностью региональных социально-экономических систем. Приводятся отличительные особенности этих моделей. Дана общая характеристика количественных и качественных подходов к оценке жизнеспособности организационных и технических систем. Разработана концептуальная модель жизнеспособности региональных критических инфраструктур. Применение предложенных в статье математического аппарата и формальных моделей жизнеспособности региональных критических инфраструктур позволяет на качественно новом уровне исследовать и оценить динамические характеристики функционирования и развития региональных социально-экономических систем с точки зрения робастности, восстанавливаемости и адаптивности образующих их критически важных объектов и инфраструктур.

Ключевые слова: формализация, модель, оценка, жизнеспособность, критическая инфраструктура, управление рисками, социально-экономическая система, региональная безопасность, надежность.

DOI: 10.14357/20790279220307

Введение

В последние годы фокус научных разработок в области анализа рисков нарушения безопасности региональных критических инфраструктур [1] сместился в сторону исследования и обеспечения их жизнеспособности [2, 3]. Это связано, главным образом, с тем, что в настоящее время проблемы управления жизнеспособностью критических инфраструктур и критически важных объектов региональных социально-экономических систем все больше приобретают глобальный интернациональный характер. О важности вопросов обеспечения жизнеспособности региональных критических инфраструктур для экономики и защищенности населения страны свидетельствует ряд нормативных документов, принятых на государственном

уровне, например, «Стратегия национальной безопасности Российской Федерации» [4]. При этом, ситуация осложняется тем, что в нашей стране медленными темпами развивается теория моделирования и анализа жизнеспособности региональных социально-экономических систем, истоки которой исторически были заложены почти сто лет назад и опубликованы в работе [5], переизданной в наши дни. Вместе с тем, до сих пор отсутствует четкое понимание принципов оценки и механизмов управления жизнеспособностью различных видов критических инфраструктур в регионе и образующих их критически важных объектов в условиях воздействия множественных угроз. Нормативно-правовые документы, регламентирующие методики моделирования и парирования потенциальных угроз для элементов региональных критических инфраструктур либо не учитывают специ-

* Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0023).

фику этих сложных крупномасштабных объектов и функционально ограничены, либо вовсе отсутствуют или находятся в стадии разработки. Решение этих проблем представляется актуальным для теории и практики управления комплексной безопасностью социально-экономических систем и имеет определенный интерес, как для исследователей и экспертов в области безопасности сложных систем, так и для субъектов управления (лиц, принимающих решения) и разработчиков современных систем обеспечения безопасности критически важных объектов. Современные фундаментальные работы по общей теории систем [6, 7] существенно повлияли на развитие системного подхода к управлению рисками и безопасностью в целом и охватывают более широкую проблематику, чем только оценка жизнеспособности региональных критических инфраструктур.

Несмотря на это, отсутствие единой методологии для оценки и анализа жизнеспособности региональных критических инфраструктур, неполнота и противоречивость данных об их состоянии, а также неопределенность информационной структуры процессов принятия управленческих решений в этой области являются основными проблемами эффективного управления жизнеспособностью региональных социально-экономических систем. Это, в свою очередь, предопределяет цель настоящей работы, которая заключается в разработке и исследовании формальных моделей и методов оценки жизнеспособности региональных критических инфраструктур, основанных на формализации и комбинированном качественном и количественном анализе интегральных показателей безопасности критически важных объектов региона, включая факторы риска возникновения неблагоприятных событий (кризисных ситуаций), в общем и целом влияющих на жизнеспособность региональных критических инфраструктур и качество управления их состоянием защищенности на соответствующем уровне иерархии принятия решений. На базе анализа и применения формализованных моделей и методов системной оценки жизнеспособности критических инфраструктур предполагается поэтапное формирование рекомендаций по созданию принципиально новых и совершенствованию существующих комплексных автоматизированных систем обеспечения региональной безопасности в ситуационных центрах региона. Для построения и реализации эффективного плана антикризисных мероприятий по противодействию потенциальным угрозам и опасностям в условиях возникновения региональных кризисных ситуаций [8] субъектам ситуационного управления (риск-менеджерам) тре-

буются максимально релевантные и реалистичные интегральные оценки уязвимости и жизнеспособности региональных критических инфраструктур с учетом взаимозависимости объектов, входящих в эти инфраструктуры.

Далее в статье рассматриваются качественные и количественные модели для получения таких оценок, формализующие понятие «жизнеспособности» региональных критических инфраструктур в виде строгих формальных конструкций, представленных в аналитической форме, и основанные на совместном анализе различных показателей надежности, безопасности отказоустойчивости и живучести критически важных объектов региона. Предлагаемые в работе модели обеспечивают как моделирование динамики состояния региональных критических инфраструктур, так и исследование сценариев поведения образующих их элементов в условиях действия внешних и внутренних угроз. Приведенные модели могут быть использованы в качестве основы для дальнейшего имитационного моделирования, анализа и автоматизации процессов управления организационной, технологической, социетальной и других видов жизнеспособности региональных критических инфраструктур на всех уровнях организации систем поддержки принятия решений ситуационных центров региона.

1. Теоретические основы исследования

Согласно ФЗ № 187 «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [9] региональную критическую инфраструктуру можно определить как часть гражданской инфраструктуры, представляющую собой совокупность физических или виртуальных систем и средств, важных для государства в такой мере, что нарушение их работоспособности, либо полная деструкция могут привести к негативным, в том числе необратимым, последствиям для обороноспособности, экономики, национальной безопасности, здоровья и качества жизни населения региона и страны в целом.

В настоящее время за рубежом наблюдается активизация деятельности по формированию новых механизмов правового регулирования региональной безопасности, направленных на поддержание устойчивости региональных критических инфраструктур. В России такая работа по созданию средств защиты и нормативно-методической базы обеспечения региональной безопасности, ориентированных на управление гипотетическими и запроектными рисками, способными вызвать нарушение региональных критических инфраструктур вследствие возникно-

вения чрезвычайных ситуаций на критически важных объектах региона, также интенсивно ведется, но находится еще в начальной стадии развития и требует привлечения к этой работе научного и экспертного сообщества для повышения ее эффективности. Особенно актуальной эта задача становится в условиях современной геополитической обстановки в мире и цифровой трансформации государственного и регионального управления внутри страны. Это подтверждается увеличением количества инцидентов, происходящих на объектах региональных критических инфраструктур, а также статистикой роста угроз безопасности в различных сферах жизнедеятельности по материалам открытой официальной отчетности силовых ведомств. Необходимость снижения уязвимости критически важных объектов региона и обеспечения комплексной безопасности региональных социально-экономических систем от реализации множественных угроз различной природы выдвигает принципиально новые требования к характеристикам защищенности и устойчивости региональных критических инфраструктур, охватывающих и формирующих подобные объекты и системы. Одним из путей решения сформулированной проблемы является расширение функционального аппарата современной теории и практики обеспечения безопасности сложных систем за счет перехода к всеобъемлющей концепции жизнеспособности [2, 3, 10] этих систем и ее применения в ситуационном управлении региональной безопасностью. Это позволит создать благоприятные условия для поддержания защитного свойства самосохранения, то есть жизнеспособности, и повышения адаптивности региональных критических инфраструктур.

Впервые понятие жизнеспособности (от латинского слова «resiliere» – приходить в норму) было введено Холлингом [11] в 1973 г. в области геологических систем и подразумевает способность объекта или системы восстанавливать свою функциональность (нормальное состояние функционирования) после возникновения критических отказов или нештатных ситуаций, повлекших нарушение их работоспособного состояния. Впоследствии эта концепция получила свое развитие и в других актуальных приложениях, например, для анализа и минимизации рисков социально-технических, кибер-физических, экологических, промышленных и инженерных систем. Так постепенно появились области жизнеспособности – технологическая, организационная, социетальная и другие, которые стали предметом самостоятельных исследований, как в России, так и за рубежом. При этом, стоит отметить, что жизнеспособность социально-экономических систем в целом с точки зрения науки о безопасно-

сти и науки об управлении сложными системами является наименее изученной областью и может служить перспективным объектом комплексных междисциплинарных исследований.

С возрастающим интересом к концепции жизнеспособности одновременно с этим появился широкий спектр определений термина «жизнеспособность» и стали зарождаться методологические подходы к пониманию и концептуализации этой новой научной категории в различных областях ее применения. Некоторые из них чем-то похожи, другие пересекаются с уже известными концепциями, такими как устойчивость, надежность, безопасность, живучесть и другими, а многие охватывают несколько научных направлений.

В отечественных исследованиях жизнеспособность зачастую трактуется через устойчивость, что создает определенные предпосылки для формализации и оценки жизнеспособности сложных систем на основе применения математического аппарата и классических моделей теории устойчивости, предложенных, например, в работах [12, 13]. С позиции зарубежных исследований [14] жизнеспособность можно охарактеризовать как способность системы (объекта), подверженной влиянию негативных факторов, своевременно прогнозировать и поглощать возможные деструктивные воздействия, противостоять им, гибко адаптироваться к непрерывным и непредсказуемым изменениям и восстанавливаться после реализации угроз и опасностей в приемлемое время, в пределах допустимых параметров деградации и с наименьшими затратами и потерями, включая полное или частичное сохранение своей структуры и жизненно важных функций. На основе анализа литературы и обобщения известных определений понятия «жизнеспособности» в настоящей работе предлагается определить эту научную категорию в следующей наиболее общей содержательной форме.

Жизнеспособность – это такое защитное свойство социально-экономической/организационной системы (критической инфраструктуры), называемое самосохранением, при котором на выбранном интервале времени в условиях воздействия на ее элементы неопределенных по составу, типу и уровню внутренних и внешних угроз (дестабилизирующих факторов):

- реализуется комплекс превентивных антикризисных мер, обеспечивающих удаленность равновесных состояний и траекторий движения системы от критических ситуаций с заданным запасом прочности (живучести);
- система способна выполнять предписанные ей функции в заданных режимах и условиях функ-

- ционирования с сохранением значений всех рабочих технологических параметров, показателей качества и динамических характеристик в этих допустимых пределах;
- на основе универсальных законов управления с обратной связью гарантируется минимально допустимая потеря управляемости и качества функционирования, а также адаптивность и возможность полного или частичного восстановления функций системы при любых ограниченных возмущениях и воздействиях вне зависимости от их природы и масштаба.

Данное определение используется в контексте задач управления комплексной безопасностью региональных социально-экономических систем, методов анализа и обеспечения жизнеспособности региональных критических инфраструктур.

Известные сегодня формальные модели и подходы к формализации, измерению и оценке жизнеспособности региональных критических инфраструктур принято подразделять на два широких класса: качественные и количественные методы. Качественные подходы традиционно оперируют концептуальными, в том числе семантическими и когнитивными, моделями и полуколичественными (экспертными) методами формализованного представления и анализа жизнеспособности сложных систем. Концептуальные модели дают достаточно полное содержательное и формальное описание жизнеспособности как объекта исследования, но, как правило, не дают количественную меру этого свойства системы. Полуколичественные методы основаны на экспертных оценках ряда наиболее значимых для конкретного класса систем характеристик жизнеспособности. По результатам опроса экспертов полученные оценки агрегируются в интегральный показатель жизнеспособности системы. При этом мнения экспертов измеряются, например, по шкале отношений Лайкерта (0-10) или процентной шкале (0-100) согласно классической теории измерений [15], то есть таким образом экспертные измерения фактически переводятся в количественный вид.

Количественные методы формализации и оценки жизнеспособности систем включают в себя детерминированные, вероятностные и структурно-функциональные модели. Эти модели обычно формализуют общие метрики жизнеспособности и характеризуют структурную динамику системы. На их основе жизнеспособность системы количественно оценивается путем сравнения показателей функционирования системы или параметров состояния отдельных ее элементов до и после возникновения критической ситуации (реализации

угрозы), независимо от структуры системы и без акцента на специфические особенности системы, хотя моделирование динамики функционирования системы может потребовать понимания закономерностей поведения системы. Эти метрики пригодны для различных классов систем со сходной логикой функционирования.

Выделяют детерминированные количественные модели жизнеспособности, статические по своей природе и не учитывающие стохастичность системы, то есть в которых практически все зависимости и показатели являются неизменными во времени, и стохастические, которые описывают поведение системы в динамике, то есть во времени, и учитывают вероятностный характер изменения параметров функционирования системы. Вероятностные модели жизнеспособности позволяют также учесть эпистемологическую и алеаторическую неопределенность (например, вероятность реализации случайной угрозы) в процессе оценки показателей качества функционирования системы, в то время как детерминированные модели не предусматривают такой возможности. Большинство известных вероятностных моделей формализуют жизнеспособность в виде аддитивной или мультипликативной свертки показателей надежности, безопасности, адаптивности и восстанавливаемости системы после инициализации критических ситуаций и реализации угроз.

Структурно-функциональные модели позволяют исследовать, как изменения структуры и целевых функций системы влияют на характеристики ее жизнеспособности и ее поведение в целом. В рамках структурного подхода к формализации и анализу жизнеспособности используются три типа моделей: оптимизационные, нечетко-множественные, имитационные. Следует отметить большой потенциал использования имитационных моделей, построенных с помощью специализированных агентных языков программирования [7, 16], например, Microsoft Axum, в решении задач оценки и анализа системных рисков жизнеспособности объектов различной природы и масштаба. Агентное имитационное моделирование хорошо зарекомендовало себя для исследования природоподобных и живых систем. Поэтому, при рассмотрении любых моделей жизнеспособности прослеживаются определенные аналогии с моделями биологических систем. В частности, при создании таких моделей особый интерес представляют пионерские работы по гомеостатике [17, 18].

Вместе с тем, в работе [19] подробно рассматриваются различные подходы к систематизации оценки рисков: вероятностный, модельный, экспертный и

социологический. Эти подходы могут быть эффективно использованы для построения и исследования динамических моделей жизнеспособности сложных систем, в том числе в комбинации друг с другом и с другими методами системного анализа.

Далее в работе приводятся примеры рассмотренных типов моделей, обеспечивающих оценку и формальный анализ меры жизнеспособности организационных и технических систем. Эти модели адаптированы для формализованного представления жизнеспособности региональных критических инфраструктур. По ходу изложения материала объекты «критическая инфраструктура» и «система» для данного конкретного исследования условно отождествляются.

2. Модели и метрики жизнеспособности систем

В работе [2] предложена концептуальная модель региональной критической инфраструктуры в терминах теоретико-множественных отношений и в операторной форме, имеющая многоуровневую иерархическую структуру и описывающая временную последовательность смены состояний объектов критической инфраструктуры. Дискретная математическая схема модели включает отношения и атрибуты объектов и связанных с ними процессов функционирования критической инфраструктуры. Компоненты модели являются взаимозависимыми функциями. В модели учитывается цикличность функционирования объектов критической инфраструктуры, что позволяет исследовать временные закономерности функционирования этих объектов в зависимости от изменения параметров состояния критической инфраструктуры и множества управляющих воздействий. В работе [2] формализация термина «жизнеспособность» критической инфраструктуры приводится в матричном виде. Матрица жизнеспособности представляет собой матрицу устойчивых состояний критической инфраструктуры. Столбцы матрицы жизнеспособности соответствуют числу учитываемых в интегральной оценке рисков нарушения безопасности критической инфраструктуры компонентов жизнеспособности (организационная, технологическая, экологическая, социальная и др.), а строки – числу оцениваемых показателей по каждому компоненту с максимальным набором параметров. Отдельно взятый элемент матрицы представляет собой вектор-функцию параметров для каждого компонента жизнеспособности критической инфраструктуры, либо скалярную величину. При моделировании критических инфраструктур матрица жизнеспособности обеспечивает синтез и анализ сценариев достижения приемлемого (требуемого для заданных условий) уровня жизнеспособности критически важных объектов.

Вместе с тем, исследование [2] предлагает формальные конструкции для формализованного представления жизнеспособности региональных критических инфраструктур в аналитической форме:

$$\left| st_i^j - st_i(ps, t) \right| \geq \sigma_i, \left| st_i^B - st_i(ps, t) \right| \geq \sigma_i, i = \overline{1, k}, \quad (1)$$

где $st_1(ps, t), st_2(ps, t), \dots, st_k(ps, t)$ – множество фазовых переменных состояния критической инфраструктуры с заданным набором параметров $ps \in PS$; st_i^H и st_i^B – критические нижние и верхние граничные значения переменных состояния критической инфраструктуры соответственно, выход за пределы которых переводит критическую инфраструктуру из нормального состояния функционирования в критическое (неустойчивое); σ_i – смещение текущего состояния $st_i(ps, t)$ критической инфраструктуры от граничных верхних и нижних критических значений st_i^B и st_i^H соответственно, причем параметр σ_i можно использовать как количественную характеристику удаленности текущего состояния критической инфраструктуры от центра безопасности, определяющую степень устойчивости для данного состояния критической инфраструктуры. Эту характеристику в теории безопасности сложных систем, согласно [20], принято называть индексом безопасности.

В случае, когда параметры вектора состояний критической инфраструктуры \vec{st} взаимозависимы, совокупный индекс безопасности σ_i^* , определяющий жизнеспособность критической инфраструктуры, в аналитической форме задается следующей метрикой:

$$\sum_{i=1}^k \alpha_i \left| st_i^H - st_i(ps, t) \right| \geq \sigma_i^*, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^k \alpha_i \left| st_i^B - st_i(ps, t) \right| \geq \sigma_i^*,$$

где $\alpha_i > 0$ – заданные вещественные положительные коэффициенты.

С учетом наличия неопределенности, возникающей вследствие влияния внешней среды на процесс функционирования объектов критической инфраструктуры приведенная в [2] вероятностная модель жизнеспособности региональной критической инфраструктуры имеет вид:

$$\Pr \left\{ \left| st_i^H - M[st_i(ps, t)] \right| \geq \sigma_i \right\} \geq 1 - \varepsilon_i, \quad (3)$$

$$\Pr \left\{ \left| st_i^B - M[st_i(ps, t)] \right| \geq \sigma_i \right\} \geq 1 - \varepsilon_i,$$

где $i = \overline{1, k}$, \Pr – символ вероятности; σ_i – индекс безопасности критической инфраструктуры, определяющий удаленность математического ожидания $M[st_i(ps, t)]$ случайного процесса $st_i(ps, t)$ от предельно допустимых нижних и верхних граничных значений параметров состояния критической инфраструктуры; ε_i – заданное достаточно малое положительное число.

При использовании формальной модели (1)-(3) необходимо учитывать то, что в процессе функционирования объектов критической инфраструктуры каждое состояние $st_i(ps, t)$ с определенной вероятностью проходит вблизи других состояний критической инфраструктуры. Такая особенность случайного процесса $st_i(ps, t)$ называется эргодичностью. Это свойство динамических систем, в которых фазовые средние состояния совпадают с временными. Вместе с тем, в процессе изменения состояний функционирования критической инфраструктуры в темпе должна обеспечиваться возможность вычисления $M[st_i(ps, t)]$.

Другой подход к формализации жизнеспособности критических инфраструктур продемонстрирован в работе [21], в которой предложена статическая модель жизнеспособности (4), обеспечивающая оценку потери жизнеспособности системы в детерминированном случае. В модели исходный уровень показателей качества функционирования критической инфраструктуры (рабочих характеристик системы) принимается равным 100%. Модель (4) позволяет сопоставить параметры состояния нарушенной критической инфраструктуры с ухудшенными характеристиками с плановыми показателями качества функционирования критической инфраструктуры в течение установленного времени восстановления работоспособности системы:

$$CIR = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt, \quad (4)$$

где CIR – показатель восстановления жизнеспособности критической инфраструктуры; $Q(t)$ – функционал рабочих характеристик критической инфраструктуры; t_0 – время возникновения критической ситуации (время инициализации угрозы); t_1 – время останова процесса реализации восстановительных мероприятий (время возврата критической инфраструктуры в нормальное состояние функционирования после деструктивного воздействия).

Для формализации жизнеспособности критических инфраструктур в работе [22] применяется триадная (треугольная) модель (5), на основе которой жизнеспособность системы определяется путем вычисления доли суммарных возможных

потерь работоспособности системы на некотором заданном продолжительном интервале времени T^* работы системы по формуле:

$$CIR(X, T) = \frac{T^* - XT/2}{T^*} = 1 - \frac{XT}{2T^*}, \quad (5)$$

где T^* – заданный продолжительный интервал времени функционирования системы, на котором зафиксирована потеря функциональности системы (сбой/критическая ситуация); $X \in [0, 1]$ – доля (в %) потерь функциональности системы после сбоя (реализации угрозы); $T \in [0, T^*]$ – время, требуемое для полного восстановления работоспособности системы.

При использовании треугольной модели жизнеспособности (5) могут быть получены схожие оценки жизнеспособности системы на основе различных сочетаний X и T в том случае, если определены оптимальные соотношения (баланс) между утраченной функциональностью системы и временем ее восстановления для одного и того же уровня жизнеспособности системы.

Из формулы (5) видно, что общие возможные потери функциональности системы можно рассчитать как площадь треугольника ($XT/2$) для одной критической ситуации. Эту модель можно распространить на случай определения момента наступления критической ситуации и времени активации механизмов частичного восстановления системы, в том числе после реализации нескольких последовательных деструктивных воздействий. Достоинством модели (5), безусловно, является ее простота, однако для некоторых классов систем и типов критических ситуаций линейный вид функции восстановления работоспособности не всегда характерен. Кроме того, концептуальное описание жизнеспособности системы в модели (5) предполагает, что снижение работоспособности системы после воздействия дестабилизирующих факторов (угроз) происходит незамедлительно. Это может быть справедливо для какого-то одного класса систем, в то время как для других может наблюдаться постепенное ухудшение характеристик функциональности с течением времени.

Исследование [23] определяет жизнеспособность объектов социально-экономических систем как способность объекта функционально поддерживать работу всей системы в случае возникновения критических ситуаций. Для этого в [23] предложена статическая модель жизнеспособности системы (6), которая также является детерминированной. Модель задает меру отношения предотвращенного снижения показателей работоспособности системы к максимально возможному

ухудшению рабочих характеристик ее функционирования:

$$CIR = \frac{\% \Delta DY^{\max} - \% \Delta DY}{\% \Delta DY^{\max}}, \quad (6)$$

где CIR – жизнеспособность системы; $\% \Delta DY$ – разница между эффективностью работы системы в нормальном режиме и ожидаемой эффективностью функционирования системы после возникновения критической ситуации; $\% \Delta DY^{\max}$ – разница между эффективностью штатного функционирования системы и эффективностью работы системы в наихудшем случае воздействия на нее деструктивных факторов.

Для анализа динамических характеристик жизнеспособности сложных систем в работе [23] также рассматриваются и определяются временные зависимости между рабочими характеристиками (показателями эффективности) системы и различными аспектами восстановления ее работоспособности. Динамическая модель жизнеспособности системы задается следующей формулой:

$$CIR = \sum_{i=1}^N SO_{HR}(t_i) - SO_{WR}(t_i), \quad (7)$$

где CIR – мера жизнеспособности системы, являющаяся функцией восстанавливаемости от SO_{HR} ; SO_{HR} – эффективность функционирования системы при ускоренном восстановлении; SO_{WR} – эффективность работы системы без ускоренного восстановления; t_i – i -й временной шаг процесса восстановления работоспособности системы; N – рассматриваемое число тактов восстановления.

Процедура вычисления динамических характеристик жизнеспособности системы на основе модели (7) является относительно простой. Оценка показателя жизнеспособности системы в модели (7) строго не ограничивается значениями на отрезке от 0 до 1, но в некоторых случаях может быть зафиксирована в этих пределах, чтобы обеспечить пригодное на практике толкование и измерение жизнеспособности системы. К примеру, особенно удобным является использование промежуточных значений в интервале (0,2;0,8), по мнению экспертов.

В работе [24] разработана зависящая от времени количественная метрика жизнеспособности, позволяющая формально определить жизнеспособность системы как отношение восстановления работоспособности к потерям функциональности. Зависимая от времени модель жизнеспособности системы формализуется следующей формальной конструкцией:

$$\beta_{\varphi}(t | e^j) = \frac{\varphi(t | e^j) - \varphi(t_d | e^j)}{\varphi(t_0) - \varphi(t_d | e^j)}, \quad (8)$$

где $\varphi(t)$ – функция эффективности работы системы в определенный момент времени t ; e^j – критическая ситуация в момент времени t_e , причем жизнеспособное поведение системы является функцией от e^j ; $\beta_{\varphi}(t | e^j)$ – принятое в работе [24] обозначение меры жизнеспособности системы, поскольку символ R , как правило, используется для обозначения надежности в теории надежности.

При количественной оценке жизнеспособности системы, согласно [24], важно учитывать три состояния системы:

- 1) стабильное исходное состояние системы, представляющее собой состояние нормального функционирования системы до возникновения критической ситуации (начинается в момент времени t_0 и заканчивается в t_e);
- 2) критическое состояние системы, вызванное деструктивными воздействиями (e^j) в момент времени t_e , последствия которых проявляются до момента времени t_d , характеризует эффективность работы системы в промежутке времени от t_d до t_s ;
- 3) стабилизированное состояние функционирования системы после восстановления, которое соответствует новому устойчивому состоянию с новым показателем эффективности работы системы, когда завершены все восстановительные мероприятия, инициированные в момент времени t_s .

Важными характеристиками жизнеспособности системы являются надежность (способность системы поддерживать исходный нормальный режим работы системы до наступления критической ситуации), степень защищенности/уязвимости (способность системы предотвращать первоначальные негативные воздействия после возникновения критической ситуации e^j) и восстанавливаемость (способность системы своевременно восстанавливаться в результате реализации угроз e^j). Как видно из формулы (8), числитель метрики жизнеспособности выражает уровень восстановления системы к моменту времени t , а знаменатель характеризует общие потери работоспособности системы после наступления критической ситуации e^j .

Модель (8) обеспечивает также расчет общей стоимости восстановленной системы после сбоя как суммы затрат на реализацию действий по обеспечению жизнеспособности системы и стоимости потерь, понесенных по причине неработоспособности системы в результате критической ситуации. Оценка и планирование меропри-

ятий на поддержание жизнеспособности системы с использованием модели (8), предложенной в [24], основаны на поэтапном моделировании смежных состояний системы.

В работе [25] предложена другая разновидность модели жизнеспособности сложной системы в приложении к задаче оценки устойчивости типовой критической информационной инфраструктуры предприятия. Формальная модель определяется следующим формализмом:

$$CIR = \max \sum_{i=1}^m z_i \frac{d_i}{c_i}, \quad (9)$$

где m – число операций, выполняемых в информационной системе предприятия; d_i – требуемое время на восстановление работы системы в случае сбоя операции i , $i = 1..m$; c_i – время завершения операции i ; z_i – весовой коэффициент, определяющий степень важности операции i для эффективности работы системы.

Формализуемый показатель жизнеспособности системы в модели (9) принимает значения больше 1, если все операции в работе системы будут восстановлены в течение требуемого времени, а величина этого показателя определяет уровень жизнеспособности системы, то есть чем она выше, тем система является более надежной и отказоустойчивой. Основным ограничением применения этой метрической модели жизнеспособности является то, что алгоритм (план) действий, направленных на восстановление работоспособного состояния системы после сбоя, и число выполняемых системой операций считаются известными, в то время как в действительности в системах могут возникнуть заранее непредвиденные критические ситуации.

Формализация жизнеспособности транспортной критической инфраструктуры представлена в работе [26], в которой предлагается формальная модель (10), позволяющая количественно оценить уровень жизнеспособности транспортной сети как ожидаемую долю расходов на восстановительные ресурсы после сбоя, которая для данной транспортной системы может быть удовлетворена в рамках заранее определенного плана и бюджета восстановительных мероприятий.

$$CIR = E \left(\frac{\sum_{w \in W} d_w}{\sum_{w \in W} D_w} \right) = \frac{1}{\sum_{w \in W} D_w} E \left(\sum_{w \in W} d_w \right), \quad (10)$$

где d_w – параметр, количественно определяющий максимальную потребность в восстановительных ресурсах, которая может быть удовлетворена для пары w пункт отправления – пункт назначения по-

сле возникновения критической ситуации в сети; D_w – потребность в восстановительных ресурсах, которая может быть удовлетворена для пары w до наступления критической ситуации.

Ограничением использования этой формальной модели является то, что в ней не учитывается специфика и результативность мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособности системы до и после возникновения критических ситуаций, что особенно важно при учете времени восстановления для получения адекватной оценки жизнеспособности системы.

В [27] разработана метрическая модель оценки жизнеспособности системы, формализующая взаимосвязь жизнеспособности с мгновенным и максимальным возмущением (нарушением) системы. Модель (11) является детерминированной. Показатель жизнеспособности принимает значения от 0 до 1. Когда степень последствий деструктивного воздействия на систему равна нулю ($D_x=0$), показатель жизнеспособности достигает максимального значения:

$$CIR = \left[\frac{2|D_0|}{|D_0| + |D_x|} \right] - 1, \quad (11)$$

где CIR – жизнеспособность системы; D_0 – максимальная интенсивность «поглощаемых» сил и средств без нарушения функциональности системы; D_x – степень последствий деструктивного воздействия на безопасность системы в момент времени (t_x).

Недостатком модели (11) является то, что она не учитывает время восстановления системы и, подобно треугольной модели жизнеспособности (5), может возвращать одно и то же значение показателя жизнеспособности для двух систем с разным временем восстановления.

В работе [28] представлены формализованные метрические модели локальной и глобальной жизнеспособности критических инфраструктур (12), предназначенные для моделирования и оценки жизнеспособности городской транспортной системы с точки зрения задач управления общественной и транспортной безопасностью:

$$CIR_L = \frac{dS(t)}{dt}, CIR_G = \int_{t_b}^{t_e} CIR_L = \int_{t_b}^{t_e} \frac{dS(t)}{dt}, \quad (12)$$

где $S(t)$ – показатель безопасности системы, физический смысл которого состоит в оценке совокупного эффекта деструктивного воздействия всех факторов, которые, согласно [28], могут негативно повлиять на состояние безопасности системы; CIR_L – локальная жизнеспособность транспортной критической инфраструктуры,

определяющая мгновенную сопротивляемость системы в отношении действующих на нее негативных факторов на основе показателя безопасности; CIR_G – глобальная жизнеспособность транспортной критической инфраструктуры, которая рассчитывается путем интегрирования локальной жизнеспособности на некотором временном интервале между моментом времени (t_b), когда происходит возмущение системы после деструктивного воздействия, и моментом времени (t_e), когда возмущение системы и действие негативных факторов прекращаются.

Использование класса динамических моделей жизнеспособности критических инфраструктур предлагается в исследовании [29]. Формальная метрическая модель жизнеспособности CIR_i системы для критической ситуации i , возникающей в ней имеет следующий вид:

$$CIR_i = S_p \frac{F_r F_d}{F_0 F_0},$$

$$S_p = \begin{cases} (t_\delta / t_r^*) \exp[-\alpha(t_r - t_r^*)], & \text{для } t_r \geq t_r^*, \\ (t_\delta / t_r^*), & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (13)$$

где S_p – скорость восстановления системы, предполагающая экспоненциальный рост; F_0 – показатель эффективности функционирования системы в первоначальном состоянии; F_r – показатель эффективности работы системы в новом стабильном состоянии после проведения восстановительных мероприятий; F_d – показатель работоспособности системы непосредственно после возникновения критической ситуации; t_δ – время простоя системы или максимально допустимое резервное время ожидания запуска процесса восстановления системы после наступления критической ситуации; t_r – время окончательного восстановления работоспособности системы или время достижения системой нового устойчивого (равновесного) состояния; t_r^* – время для полного завершения первоначальных действий по восстановлению работы системы; α – параметр, контролирующий затухание системы, то есть степень ее деградации, до тех пор, пока система не перейдет в новое устойчивое состояние (состояние равновесия).

Модель (13) формализует меру жизнеспособности системы как абсорбционную способность (функцию поглощения) результатов воздействия множественных угроз с точки зрения соотношения эффективности работы системы в исходном устойчивом состоянии и эффективности, обеспеченной в результате перехода в новое устойчивое состояние функционирования после восстановления систе-

мы F_r / F_0 . Стоит заметить, что значения показателя жизнеспособности в модели (13) не ограничиваются диапазоном $[0, 1]$. Это, в свою очередь, затрудняет определение и понимание предельных значений этого показателя. Кроме того, экспоненциальный рост функции восстановления работоспособности системы, регулирующей механизм повышения жизнеспособности, не всегда подходит для описания реального поведения системы. Взаимосвязь между абсорбционной способностью и адаптивностью системы представляется не совсем ясной. В работе [29] предполагается, что соотношение F_d / F_0 характеризует способность системы поглощать деструктивные воздействия (угрозы) при отсутствии восстановительных механизмов или действий, а соотношение F_r / F_0 характеризует адаптивность системы, которая непосредственно связана с проводимыми восстановительными мероприятиями по ликвидации последствий возникновения критических ситуаций в системе. Адаптивность системы отражает ее способность быстро восстанавливать потерянный уровень функциональности в заданное время, который не был своевременно воспринят и оценен за счет ее абсорбционной способности в условиях критической ситуации. То есть, для удельной адаптивности системы восстановленный уровень функциональности системы F_r можно условно соотнести с разницей между начальной эффективностью работы системы F_0 и эффективностью функционирования системы F_d после возникновения критической ситуации: $F_r / (F_0 - F_d)$.

Класс детерминированных формальных моделей жизнеспособности развивается в работе [30], в которой предложена зависящая от времени модель жизнеспособности критической инфраструктуры следующего вида:

$$CIR = \frac{\int_{t_0}^{t_1} [Q(t)] dt}{100(t_1 - t_0)}, \quad (14)$$

где CIR – показатель изменения (восстановления) жизнеспособности системы; $Q(t)$ – функция эффективности работы системы (начальный уровень эффективности функционирования системы не принимается равным 100%); t_0 – время возникновения критической ситуации; t_1 – время окончания реализации восстановительных мероприятий; $t_1 - t_0$ – продолжительность процесса восстановления работоспособности системы.

Другой вид детерминированной модели жизнеспособности системы, предложенной в работе [31], учитывает как план мероприятий, направленных на восстановление работы системы до и после

возникновения критической ситуации, так и степень важности (вес) проводимых восстановительных работ до и после наступления критической ситуации:

$$CIR = \alpha \int_{T_{LC}} \frac{Q_1(t)}{T_{LC}} dt + (1 - \alpha) \int_{T_{LC}} \frac{Q_2(t)}{T_{LC}} dt, \quad (15)$$

где CIR – жизнеспособность системы; $Q_1(t)$ – функция качества сервисного обслуживания системы до наступления критической ситуации; $Q_2(t)$ – функция качества сервисного обслуживания системы после возникновения критической ситуации; T_{LC} – время стабилизации состояния системы (продолжительность переходного процесса); α – весовой коэффициент, отражающий степень важности качественных характеристик деятельности по сервисному обслуживанию системы до и после возникновения критической ситуации.

Величина показателя жизнеспособности системы, формализуемого в модели (15), зависит от значений весовых коэффициентов α . Поэтому, из-за различий в предпочтениях лиц, принимающих решения, могут быть получены разные значения показателя жизнеспособности системы для одних и тех же условий и исходных данных.

Вероятностный подход к оценке жизнеспособности системы рассматривается в работе [32]. В оценке учитываются два показателя функционирования системы: потеря функциональности системы и продолжительность восстановления ее работоспособности после возникновения критической ситуации. Жизнеспособность системы определяется как вероятность того, что первичное снижение эффективности работы системы в результате наступления критической ситуации будет меньше, чем максимально допустимая потеря функциональности, а продолжительность полного восстановления работоспособности будет меньше, чем максимально допустимое время возмущения системы (продолжительность воздействия на систему дестабилизирующих факторов). Вероятностная модель такой меры жизнеспособности представлена в следующем формализованном виде:

$$CIR = P(A | i) = P(r_0 < r^* \text{ and } t_1 < t^*), \quad (16)$$

где A – множество организационных и технических критериев качества функционирования системы; r^* – максимально допустимая потеря эффективности работы системы; t^* – максимально допустимое время восстановления работоспособности системы; i – степень возмущения системы в результате деструктивных воздействий.

В работе [32] проведена серия имитационных экспериментов по моделированию критических си-

туаций в системе, на основе чего было получено распределение вероятностей для модели (16) исходя из числа прогонов модели, не соответствующих установленным критериям эффективности A . Отличительной особенностью формальной метрической модели (16) является учет неопределенности в количественном определении жизнеспособности системы. Однако, предложенная в [32] модель не рассматривает случаи, когда потеря эффективности системы и продолжительность восстановления ее функциональности после реализации угрозы превышают свои максимально допустимые значения.

Иная разновидность формальной модели жизнеспособности системы приведена в работе [33]. Разработанная стохастическая модель (17) предназначена для оценки «годовой жизнеспособности» системы в условиях множественных угроз (опасностей) и формализует зависящую от времени меру жизнеспособности системы. Представленная в (17) метрика позволяет оценить среднее отношение площади между фактической кривой эффективности функционирования системы $P(t)$ и временной осью к площади между заданной кривой эффективности работы системы $TP(t)$ и временной осью за годичный период времени T . Неопределенность в модели (17) учитывается путем моделирования целевой кривой эффективности функционирования системы как стохастического процесса:

$$CIR = E \left[\frac{\int_0^T P(t) dt}{\int_0^T TP(t) dt} \right] = E \left[\frac{\int_0^T TP(t) dt - \sum_{n=1}^{N(T)} AIA_n(t_n)}{\int_0^T TP(t) dt} \right], \quad (17)$$

где CIR – стохастический показатель жизнеспособности системы, поскольку фактическая эффективность системы $P(t)$ моделируется как стохастический процесс, а заданная эффективность системы $TP(t)$ может иметь вид стохастического процесса или некоторой детерминированной функции.

Выражение $\sum_{n=1}^{N(T)} AIA_n(t_n)$ описывает множествен-

ные угрозы, где n – соответствует n -ой угрозе (критической ситуации); $N(t)$ – общее число критических ситуаций, возникающих в системе за период времени T ; t_n – случайная величина, описывающая время наступления n -ой критической ситуации в системе; $AIA_n(t_n)$ – площадь между кривыми фактической $P(t)$ и целевой $TP(t)$ эффективности функционирования системы соответственно для n -й критической ситуации (угрозы).

В исследовании [34] предложен другой вид зависящей от времени вероятностной модели (18) жизнеспособности системы. Эта модель учитывает как превентивные меры по парированию угроз, так и восстановительные действия, направленных на устранение последствий критических ситуаций в системе. Профиль угрозы (отказа) является мерой запаса прочности (устойчивости) системы и избыточности резервов на восстановление после сбоя, а профиль восстановления системы определяет возможность ее восстанавливаемости в результате реализации угрозы:

$$CIR = \frac{T_i + F\Delta T_f + R\Delta T_r}{T_i + \Delta T_f + \Delta T_r},$$

$$F = \frac{\int_{t_i}^{t_f} f(t)dt}{\int_{t_i}^{t_f} Q(t)dt}, \quad R = \frac{\int_{t_r}^{t_f} r(t)dt}{\int_{t_r}^{t_f} Q(t)dt}, \quad (18)$$

где CIR – жизнеспособность системы; T_i – наработка до возникновения критической ситуации; T_f – наработка до инициализации угрозы (отказа); T_r – наработка до восстановления; $\Delta T_f = T_f - T_i$ – продолжительность отказа (реализации угрозы); $\Delta T_r = T_r - T_f$ – продолжительность восстановления работоспособности системы; F – профиль угрозы, являющийся мерой робастности и резервируемой надежности системы по нескольким траекториям f для хрупких деструкций, вязких (пластичных) разрушений и плавных (без нарушения работоспособности системы) отказов системы; R – профиль восстановления системы, представляющий собой меру восстанавливаемости системы после сбоя по нескольким траекториям r в зависимости от выпуклости или вогнутости функции восстановления.

Наработка до отказа T_f характеризуется функцией плотности вероятности, которая является отрицательной производной функции надежности. Эта характеристика является одним из наиболее комплексных показателей жизнеспособности системы, предписывающая действия по смягчению последствий реализации угроз (обеспечению безопасности) и стратегии управления системой при заданном режиме работы на случай непредвиденных ситуаций, то есть длительность восстановления работоспособности системы. Модель (18) позволяет оценить отношение запаса прочности системы (робастности) к резервируемой надежности (избыточности резервов на восстановление) и

отношение «находчивости» (способности системы к поиску/высвобождению ресурсов для выхода из критической ситуации) системы к скорости ее восстановления путем использования профиля угрозы F и профиля восстановления R соответственно.

Другой подход [35] определяет жизнеспособность как условную вероятность безотказного удовлетворительного состояния функционирования системы в период времени $t+1$ при заданном неудовлетворительном состоянии работы системы на интервале времени t . Вероятностная модель жизнеспособности имеет следующий вид:

$$CIR = P\{S(t+1) \in NF \mid S(t) \in F\}, \quad (19)$$

где $S(t)$ – функция, характеризующая состояние системы в момент времени t ; NF и F – состояние безотказной работы системы и состояние отказа соответственно.

В работе [36] вводится вероятностная модель (20) для оценки жизнеспособности городской инфраструктуры (дорожной транспортной сети) в случае землетрясения. Формальное определение жизнеспособности системы основано на эффективности пространственного распределения узлов сети инфраструктуры. Эффективность двух узлов в сетевой инфраструктуре города определяется обратно пропорционально кратчайшему расстоянию между этими узлами. Формализация такого показателя жизнеспособности представлена в виде следующей формальной конструкции:

$$CIR = \frac{1}{P_D E_0} \int_0^{P_r} E(P_r) dP_r, \quad (20)$$

где P_D – доля перемещенного населения; E_0 – работоспособность городской инфраструктуры до землетрясения; P_r – мера хода восстановления инфраструктуры; $E(P_r)$ – кривая восстановления доли перемещенного населения.

В работе [36] эффективность городской инфраструктуры (дорожной транспортной сети) определяется исходя из плотности населения.

Метрическая модель жизнеспособности системы (20) является вероятностной вследствие стохастической природы P_D . Формализуемый в модели (20) показатель жизнеспособности системы принимает значения от 0 до 1, поскольку нормализация выполняется по P_D и E_0 . Несмотря на то, что этот показатель используется для оценки жизнеспособности транспортной инфраструктуры города (дорожной сети), он применим и к другим системам жизнеобеспечения, таким как энергетическая инфраструктура (сети тепло- и электроснабжения), коммунальная инфраструктура (система водоснабжения и т.п.) при условии существования

подходящей функции для повышения эффективности работы системы. Развитие модели (20) с учетом временной зависимости параметров позволит проводить моделирование P_D с использованием имитационных динамических моделей.

В работе [37] разработана вероятностная независимая от времени модель жизнеспособности критической инфраструктуры (21), обеспечивающая анализ действий как до, так и после наступления критической ситуации. В рамках этой модели показатель жизнеспособности определяется как сумма коэффициентов пассивной живучести (надежности) и проактивной живучести (восстановления) системы после возникновения критической ситуации. Показатель жизнеспособности системы может принимать значения в диапазоне от 0 до 1:

$$CIR = R + \rho = R + \kappa \cdot \Lambda_p \cdot \Lambda_D (1 - R), \quad (21)$$

где CIR – жизнеспособность системы; R – надежность системы; ρ – восстанавливаемость системы; κ – вероятность успешного восстановления системы после наступления критической ситуации; Λ_p – вероятность безошибочного прогноза критической ситуации; Λ_D – вероятность корректной диагностики критической ситуации.

В выражении (21) восстанавливаемость системы определяется как степень восстановления надежности и рассчитывается как общая вероятность возникновения критической ситуации в системе E_{sf} , корректной диагностики критической ситуации E_{cd} , безошибочного прогноза критической ситуации E_{cp} и успешного восстановления системы E_{mr} после наступления критической ситуации.

Вычисление коэффициента восстановления системы ρ проводится по следующей формуле:

$$\rho = P(E_{mr} | E_{cp} E_{cd} E_{sf}) \times P(E_{cp} | E_{cd} E_{sf}) \times P(E_{cd} | E_{sf}) \times P(E_{sf}). \quad (22)$$

В отличие от большинства известных исследований, модель (21) учитывает надежность и превентивные меры по предотвращению возникновения критических ситуаций, как составляющую количественной оценки жизнеспособности системы, в то время как большинство других метрических моделей оценки жизнеспособности изначально функционально зависят от степени первоначальных деструктивных воздействий и продолжительности процесса восстановления системы после сбоя. Следует отметить, что значения показателя жизнеспособности CIR в (21) ограничены в пределах $[0, 1]$, то есть CIR принимает 0, когда действия по восстановлению системы не выполняются или процесс восстановления дает сбой, либо затруднен по какой-то иной причине,

и принимает верхнее граничное значение 1, когда система полностью восстанавливается после критической ситуации. Достоинство модели жизнеспособности (21) заключается в учете превентивных и восстановительных мер, принимаемых как до, так и после возникновения критических ситуаций в системе. Как показано в (22), процесс восстановления системы не зависит от времени и, следовательно, не учитывается ее продолжительность. В связи с тем, что в модели (21) учитывается оценка надежности системы, такое формализованное представление меры жизнеспособности в значительной степени подходит для измерения жизнеспособности технических систем, поскольку их надежность хорошо исследована и может быть более точно рассчитана на основе известных эффективных методов анализа и оценки отказоустойчивости данного класса систем. Расчет условной вероятности может быть затруднен, особенно когда критическая ситуация возникает впервые. Любые ошибки в оценке условной вероятности на основе экспертных знаний могут привести к неправильному определению параметров и описанию характера процесса восстановления системы и, как следствие, к неточности в измерении ее жизнеспособности.

Исследование [38] демонстрирует похожую вероятностную, зависящую от времени модель жизнеспособности системы (23), также учитывающую меры противодействия угрозам безопасности как до, так и после возникновения критических ситуаций в системе. Формализуемый показатель жизнеспособности также принимает значения от 0 до 1. Модель (23) формализует жизнеспособность критической инфраструктуры как функцию надежности и восстанавливаемости системы:

$$CIR = R + \Lambda(1 - R) = R + \left[\prod_{i=1}^4 \beta_i \right] (1 - R), \quad (23)$$

где CIR – жизнеспособность системы; R – надежность системы; β_1 – восстанавливаемость/ремонтпригодность системы (вероятность восстановления системы за заданное время); β_2 – способность организации-собственника системы противодействовать угрозам безопасности системы; β_3 – эффективность прогностического управления и контроля работоспособности системы; β_4 – обслуживаемость (обеспеченность технической поддержкой) системы.

В работе [39] предложена вероятностная, зависящая от времени модель жизнеспособности системы (24). В модели учитывается специфика как предаварийных, так и послеаварийных действий по

превентивному поддержанию эффективной работы системы в условиях множественных угроз и восстановлению ее функциональности в случае наступления критических ситуаций. Показатель жизнеспособности системы принимает значения от 0 до 1:

$$CIR = R + \mu[V, M], \quad (24)$$

где CIR – жизнеспособность системы; R – надежность системы; μ – восстанавливаемость (функция восстановления) системы; V – уязвимость системы; M – ремонтпригодность системы.

В работе [40] предлагается зависящую от времени модель жизнеспособности системы (25), которая учитывает антикризисные мероприятия, проводимые как до, так и после возникновения критических ситуаций в системе. Показатель жизнеспособности также принимает значения от 0 до 1:

$$CIR = r_1\lambda_1 + r_2\lambda_2 + r_3\lambda_3, \sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0, i = \overline{1,3}, \quad (25)$$

где CIR – жизнеспособность системы; r_1 – поглощающая способность системы (абсорбционная составляющая); r_2 – адаптивность системы (адаптационная составляющая); r_3 – восстанавливаемость системы (саморегулирующая составляющая); λ_i – весовой коэффициент i -й составляющей в оценке жизнеспособности системы.

Согласно результатам исследования [41] уровень жизнеспособности элемента критической инфраструктуры определяется как среднее арифметическое значений характеристик, участвующих в его оценке, по следующей формуле:

$$CIR_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i, \quad (26)$$

где CIR_E – жизнеспособность элемента критической инфраструктуры (измеряется в %); K_i – характеристики жизнеспособности элемента критической инфраструктуры, таких как робастность, резервируемая надежность, восстанавливаемость, адаптивность и т.д. (эти показатели измеряются в %); n – общее число участвующих в рассмотрении характеристик, определяющих жизнеспособность элемента критической инфраструктуры.

Величина отдельных показателей жизнеспособности элемента критической инфраструктуры определяется средневзвешенным значением их параметров:

$$K_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_j v_j, \quad (27)$$

где K_i – i -ая составляющая жизнеспособности элемента критической инфраструктуры (измеряется в %); P_j – j -ый параметр i -ой составляющей жизне-

способности элемента критической инфраструктуры (измеряется в %); v_j – j -ый нормированный вес j -го параметра i -ой составляющей жизнеспособности элемента критической инфраструктуры (принимает значения в диапазоне $[0,1]$); m – общее число параметров, характеризующих i -ую составляющую жизнеспособности элемента критической инфраструктуры.

По формуле (28) определяются заданные параметры жизнеспособности элемента критической инфраструктуры как средневзвешенные значения отдельных измеряемых показателей, декомпозированных для этих параметров. Поскольку значения измеряемых показателей оцениваются по балльной шкале в интервале от 1 до 5 [41], выражение (28) содержит дополнительный множитель 20, посредством чего получается результат, выраженный в процентах:

$$P_j = 20 \sum_{k=1}^l MP_k w_k, \quad (28)$$

где P_j – j -ый параметр показателя жизнеспособности элемента критической инфраструктуры верхнего уровня (измеряется в %); MP_k – k -ый измеряемый показатель жизнеспособности элемента критической инфраструктуры нижнего уровня (измеряется в баллах); w_k – k -ый нормированный вес k -го измеряемого показателя жизнеспособности элемента критической инфраструктуры нижнего уровня, принимающий значения в диапазоне $[0,1]$; l – общее число измеряемых частных показателей нижнего уровня для j -го параметра показателя жизнеспособности верхнего уровня.

Расчетная процедура по формулам, предложенным в [41], использует линейную агрегацию взвешенных значений показателей жизнеспособности системы разных уровней декомпозиции. Такой метод оценки может быть связан с рядом проблем. В частности, существенным является наличие неявной возможности подстановки, то есть возможности уравнивания (компенсации) меньшего значения одного показателя более высоким значением другого. Это может представлять проблему, особенно если необходимо сравнивать результат оценки, например, для разных элементов критической инфраструктуры. Преимуществом линейной агрегации является легкость понимания и относительная простота интерпретации результатов вычислений для предложенного метода оценки. При этом, если в будущем проблема сопоставимости элементов (соизмеримости показателей) будет решена, то разработанную в [41] формальную модель меры жизнеспособности элемента критической инфраструктуры потребуется

пересмотреть с учетом применения некомпенсационных методов.

С учетом вышеупомянутых зависимостей и приведенных формализмов (26)-(28) формула для получения интегральной оценки жизнеспособности элемента критической инфраструктуры может быть записана в следующей форме:

$$CIR_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m 20v_j \sum_{k=1}^l MP_k w_k, \sum_{j=1}^m v_j = \sum_{k=1}^l w_k = 1. \quad (29)$$

Значения частных показателей и параметров жизнеспособности рассчитываются на основе применения известных методов оценки робастности, восстанавливаемости и адаптивности сложных систем. Интегральная оценка жизнеспособности критической инфраструктуры получается на самом верхнем уровне декомпозиции системы для всех агрегированных оценок по всем образующим ее элементам. Таким образом, оценка жизнеспособности критической инфраструктуры (системы) с использованием формальной модели (29) может быть получена как на уровне отдельных элементов инфраструктуры (комплексная оценка), так и на уровне составляющих жизнеспособности элемента критической инфраструктуры (частичная оценка), а также на уровне детализированных параметров компонентов жизнеспособности, специфичных для данного элемента критической инфраструктуры (элементарная оценка). Такой подход к оценке жизнеспособности системы обеспечивает «сквозное выявление» уязвимостей системы, и формирование превентивных мер по повышению стабильности и эффективности функционирования системы на всех этапах жизненного цикла в условиях действия множественных угроз различной природы.

На базе результатов исследования [41] в работе [42] создана многоуровневая иерархическая концептуальная модель для оценки и формального анализа уровня жизнеспособности критических инфраструктур различного типа. Модель описывается следующими формальными конструкциями:

$$CIR = f(CIR_{Tech}, CIR_{Pers}, CIR_{Org}, CIR_{Part}), \quad (30)$$

$$CIRI = \frac{1}{7} \sum_{q=1}^7 \left[\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l u_k \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i X_{k,j,i} \right] \right] \right], \quad (31)$$

где CIR – жизнеспособность критической инфраструктуры; CIR_{Tech} – технологическая жизнеспособность; CIR_{Pers} – индивидуальная (личная) жизнеспособность; CIR_{Org} – организационная жизнеспособность; CIR_{Part} – кооперативная (коллективная) жизнеспособность; $CIRI$ – интегральный показатель жизнеспособности критической

инфраструктуры, рассчитываемый на основе значений показателей на 2, 3 и 4 уровнях декомпозиции системы оценки соответственно; $X_{k,j,i}$ – полученные оценки частных показателей жизнеспособности на 2, 3 и 4 уровнях соответственно; n, m, l – число оцениваемых показателей жизнеспособности на 2, 3 и 4 уровнях соответственно; u_k, v_j, w_i – весовые коэффициенты (веса) для частных показателей 2, 3 и 4 уровня соответственно, принимающие значения от 0 до 1 в зависимости от степени значимости показателей, участвующих в оценке.

В исследовании [43] предложено расширение формальной модели жизнеспособности системы (23), разработанной в [38] для количественного анализа устойчивости критических инфраструктур Евроарктического региона, за счет использования специальных переменных-ковариатов и методов ковариационного анализа. Согласно модели [38] оценка жизнеспособности системы в некоторый момент времени t ($CIR(t)$) может быть получена по следующей формуле:

$$CIR(t) = R(t) + \Lambda(t)(1 - R(t)), \quad (32)$$

где $R(t)$ – надежность системы, а $\Lambda(t)$ – эффективность хода восстановления (восстанавливаемость) системы после возникновения критической ситуации, которая формализуется следующей расчетной формулой:

$$\Lambda(t) = \prod_{i=1}^4 \beta_i, \quad (33)$$

где β_1 и β_2 – нарушенные ремонтпригодность и сервисная обслуживаемость системы; β_3 – эффективность прогностического управления и контроля работоспособности системы до наступления критической ситуации; β_4 – организационная устойчивость в случае возникновения критической ситуации, то есть жизнеспособность владельца системы (способность организации-собственника системы противодействовать угрозам безопасности системы).

В рамках формальных описаний (32)-(33) надежность определяется, как способность системы поддерживать требуемую функциональность и эффективность в течение заданного периода времени при заданных условиях [37]. В свою очередь, ремонтпригодность определяется, как способность элемента системы при заданных условиях использования сохранять или восстанавливать исходное работоспособное состояние для выполнения требуемых функций после сбоя с учетом того, что поддержка функционирования и техническое обслуживание системы реализуются в определенных

режимах, по установленным регламентам и с применением соответствующих средств и ресурсов [44]. Обслуживаемость является неотъемлемым функциональным свойством системы, обеспечивающим эффективную и действенную техническую поддержку системы на протяжении ее жизненного цикла. Надежность, ремонтпригодность и обеспеченность сервисной поддержкой относятся к техническим аспектам жизнеспособности сложных систем. Вместе с тем, при оценке жизнеспособности системы необходимо учитывать и организационные аспекты жизнеспособности, такие как устойчивость и живучесть организации-владельца системы в плане способности парирования угроз безопасности и преодоления нестабильных состояний и неопределенных критических ситуаций. В этом контексте важная роль отводится оценке эффективности прогностического управления рисками нарушения работоспособности системы и контроля (диагностики) состояний функционирования системы до и после возникновения критических ситуаций. Это помогает детектировать потенциальные источники опасностей, определять дефекты и области уязвимости системы, чтобы впоследствии надлежащим образом поддерживать устойчивое функционирование и развитие системы на всех этапах жизненного цикла. Эффективность прогностического управления и контроля работоспособности системы до и после сбоя является ключевым показателем, определяющим возможность преобразования уязвимых систем в жизнеспособные системы.

Ковариационная модель жизнеспособности системы, основанная на применении ковариатов и являющаяся модификацией модели анализа устойчивости критических инфраструктур (23), задается следующей формулой:

$$CIR_{\theta}(t, c, c(t)) = R_{\theta}(t, c, c(t)) + \Lambda_{\theta}(t, c, c(t)) [1 - R_{\theta}(t, c, c(t))]. \quad (34)$$

При этом для сложных последовательно-параллельных систем с n последовательными и m параллельными подсистемами приведенную выше формулу можно переписать в другом виде:

$$CIR_{\theta}(t, c, c(t)) = \prod_{i=1}^n \left[1 - \left[\prod_{j=1}^m (1 - R_{j\theta}(t, c, c(t))) (1 - \Lambda_{j\theta}(t, c, c(t))) \right] \right] = \prod_{i=1}^n \left[1 - \left[\prod_{j=1}^m 1 - \psi_{j\theta}(t, c, c(t)) \right] \right] \quad (35)$$

где $CIR_{\theta}(t, c, c(t))$, $R_{\theta}(t, c, c(t))$, $\Lambda_{\theta}(t, c, c(t))$ – ковариационные показатели жизнеспособности, надежности и эффективности хода восстановления системы соответственно; c и $c(t)$ – независимые от времени и зависящие от времени наблюдаемые ковариаты; θ – символ, обозначающий учет фактора влияния ненаблюдаемых ковариатов. Чтобы использовать предложенные в [43] формальные конструкции в оценке жизнеспособности системы, следует определить значения ковариационных показателей надежности, ремонтпригодности (восстанавливаемости) и сервисной обслуживаемости системы с применением ковариатов. Для этих целей используются распространенные регрессионные модели Кокса [45].

В работе [46] предложена нечетко-множественная модель, формализующая понятие и меру оценки жизнеспособности критической инфраструктуры. В качестве параметров этой модели используются нечеткие лингвистические переменные для выражения относительной значимости факторов жизнеспособности. Такой подход применяется для ранжирования нескольких факторов жизнеспособности, включая стратегии планирования, возможности и мощность внутренних ресурсов, внутренний проблемный мониторинг, человеческий фактор, качество функционирования, внешний ситуационный анализ, возможности и эффективность внешних ресурсов, конструктивные параметры (расчетные коэффициенты), возможности обнаружения потенциальных угроз и опасностей, реагирование на критические ситуации, адаптивность систем, согласованность совместных действий, ситуационную осведомленность, готовность, культуру обучения, отчетность, гибкость, избыточность (резервирование), поддержку управления (руководства), отказоустойчивость и т.д.

Теория нечетких множеств [47] обеспечивает возможность системным аналитикам работать с лингвистическими переменными и приближенными решениями, а также изолировать влияние действующих факторов. Теория нечетких множеств является производной от обобщения классической теории множеств и используется в нечеткой логике. В теории нечетких множеств знак « \sim » над символом переменной обозначает нечеткое множество. Треугольные нечеткие числа обычно используются для представления нечетких множеств. Треугольное нечеткое число « $\tilde{\alpha}$ » определяется в виде $\tilde{\alpha} = (l, m, u)$. Компоненты l, m, u характеризуют соответственно минимально возможное, наиболее оптимистическое и максимально возможное значения, выражающие природу некоторого нечеткого события $\tilde{\alpha}$. Все полученные треугольные

нечеткие оценки по каждому влияющему фактору на k -м уровне должны агрегироваться. Следовательно, при числе экспертов Z и когда треугольная нечеткая оценка z -го экспертного суждения о текущем состоянии i -го действующего фактора на k -м уровне равна $\tilde{S}_z = (a_z, b_z, c_z)$, $z = 1, Z$, интегральная треугольная нечеткая оценка всех экспертных суждений (\tilde{S}_i) о состоянии i -го фактора на k -м уровне может быть получена на основе формулы:

$$\tilde{S}_i = (a_i, b_i, c_i) = \left(\min_z \{a_z\}, \frac{\sum_{z=1}^Z b_z}{Z}, \max_z \{c_z\} \right), \quad z = \overline{1, Z}, \quad (36)$$

где a_z, b_z, c_z – минимально возможное, наиболее оптимистичное и максимально возможное значения z -й экспертной оценки текущего состояния i -го влияющего фактора на k -м уровне соответственно.

Агрегированные треугольные нечеткие числа являются нечеткими экспертными оценками текущего состояния влияющих факторов на k -м уровне. В результате дефазификации эти нечеткие оценки преобразуются в четкие оценки. Четкое значение треугольного нечеткого числа $\tilde{\alpha} = (l, m, u)$ можно определить по его четкому вероятностному среднему значению ($\overline{M}(\tilde{\alpha})$) по формуле:

$$\overline{M}(\tilde{\alpha}) = m + \frac{\beta - \alpha}{6} = m + \frac{(u - m) - (m - l)}{6}. \quad (37)$$

Следовательно, четкая оценка текущего состояния i -го влияющего фактора (S_i) на уровне k может быть получена по формуле:

$$S_i = \overline{M}(\tilde{S}_i) = \frac{(a_i + 4b_i + c_i)}{6}. \quad (38)$$

Приближенная оценка каждого влияющего фактора на $(k - 1)$ уровне может быть рассчитана как взвешенная сумма оценок порождающих его влияющих факторов на k -м уровне с применением формулы:

$$(S_j)_{k-1} = \left(\sum_{i=1}^n W_i S_i \right)_k, \quad \sum_{i=1}^n W_i = 1, \quad (39)$$

где n – число влияющих факторов, связанных с j -м влияющим фактором на уровне $k - 1$; W_i и S_i являются соответственно весом и оценкой i -го влияющего фактора на k -м уровне и принимают значения от 0 до 1. Эти веса могут быть вычислены с применением методов принятия оптимальных

решений и многокритериальной оптимизации [48], например, метода анализа иерархий в комбинации с нечетким методом экспертных оценок Дельфи. Следует отметить, что в процессе агрегирования оценок необходимо использовать дополнительные оценки по тем факторам, которые оказывают негативное влияние.

В конечном счете, интегральная оценка показателя жизнеспособности системы (критической инфраструктуры) представляет собой средневзвешенное значение оценок всех характеристик жизнеспособности на верхнем (l -м) уровне декомпозиции системы и вычисляется по формуле:

$$CIR = \sum_{i=1}^4 W_{RC_i} S_{RC_i}, \quad (40)$$

где S_{RC_i} и W_{RC_i} – итоговые оценки и веса i -й составляющей жизнеспособности критической инфраструктуры (надежность, восстанавливаемость, прогнозируемая управляемость, операционная и функциональная эффективность) на верхнем (l -м) уровне декомпозиции системы соответственно.

Заключение

За последнее десятилетие концепция жизнеспособности получила широкое признание в разных научных кругах. Важность этого направления исследований для теории и практики управления безопасностью сложных систем подчеркивается и на государственном уровне. До настоящего времени учеными неоднократно предпринимались усилия по формализации, измерению и оценке жизнеспособности социально-экономических систем различного уровня (критически важный объект, критическая инфраструктура, город, регион и т.д.), но ряд ключевых проблем по-прежнему остается нерешенным. Акцент в данной работе был сделан на обзор и систематизацию формализованных моделей к формальному определению понятия жизнеспособности региональных критических инфраструктур для последующего анализа и оценки уязвимости и устойчивости региональных социально-экономических систем. В связи с наличием широкого спектра различных по существу (в чем-то противоречивых, а в чем-то взаимодополняющих) концептуальных подходов к определению и формализации категории жизнеспособности систем, сегодня отсутствуют точные и комплексные методы качественной и количественной оценки жизнеспособности региональных критических инфраструктур.

Поддержание стабильного функционирования и поступательного риск-устойчивого развития

региональных социально-экономических систем, чувствительных к деструктивным воздействиям гетерогенных факторов, является сложной многоаспектной задачей с точки зрения науки о безопасности и риск-менеджмента. Внешние и внутренние угрозы негативно влияют на работу всех элементов региональных систем, которые, в свою очередь, по-разному реагируют на возникновение критических ситуаций. Некоторые из критически важных объектов региона крайне уязвимы и в случае экстремальных событий могут даже терять свою функциональность, а сам процесс их восстановления и адаптации к новым условиям функционирования является весьма дорогостоящим и продолжительным по времени. Для противодействия множественным угрозам различной природы критические инфраструктуры региона должны быть жизнеспособными, а региональные социально-экономические системы обладать свойством жизнеспособности, то есть быстро восстанавливаться и адаптироваться к изменениям параметров среды функционирования с минимальными потерями и ущербами в условиях влияния на их элементы неопределенных по составу, типу и уровню внутренних и внешних дестабилизирующих факторов.

В работе предложены формализованные модели жизнеспособности региональных критических инфраструктур, являющиеся формальной основой для системной оценки рисков, имитационного моделирования и автоматизации процессов управления комплексной безопасностью региональных социально-экономических систем. Представленные модели применимы для формального описания основных видов жизнеспособности критически важных объектов (организационной, технологической, социальной, экономической и других), а также могут быть расширены на все типы критических инфраструктур, включая возможность адаптации моделей к конкретным особенностям (специфике) этих объектов и сценариям развития критических ситуаций в регионе. Модели планируется использовать в составе систем поддержки принятия решений, предназначенных для информационно-аналитического обеспечения региональных ситуационных центров. Совместное применение моделей обеспечивает возможность учета, преобразования и интегральной оценки отдельных количественных и качественных показателей безопасности критически важных объектов и инфраструктур региона для получения единой метрики жизнеспособности региональных социально-экономических систем. Именно в этом и заключается инновационный потенциал рассмотренных в статье формальных моделей жизнеспособности.

Такой подход к сопряжению различных типов моделей хорошо развит в рамках современных исследований по синергетике в управлении и прогнозировании [49]. Стоит также отметить, что с тематикой исследования региональных критических инфраструктур сильно пересекаются работы по «большим системам» [50]. В этих работах существенное внимание уделяется проблематике оптимизации «больших систем», как с точки зрения ситуационного управления, так и управления их развитием.

Поскольку модели и методы управления рисками критических инфраструктур региона в фокусе поддержания их жизнеспособности являются недостаточно изученными и требуют более глубокой научной проработки, дальнейшие исследования будут направлены на постановку и решение глобальной задачи оптимизации управления жизнеспособностью региональных критических инфраструктур, представляющей собой суперпозицию локальных задач по обеспечению безопасности отдельно взятых критически важных объектов региона; разработку общей методологии комплексной оценки и сценарного анализа жизнеспособности региональных критических инфраструктур; разработку механизмов согласования взаимосвязанных показателей региональной безопасности и жизнеспособности для различных типов критических инфраструктур; проектирование системы ситуационного управления жизнеспособностью критических инфраструктур региона; создание стандартов в области обеспечения жизнеспособности региональных социально-экономических систем.

Литература

1. Цыгичко В.Н., Черешкин Д.С., Смолян Г.Л. Безопасность критических инфраструктур. М.: УРСС. 2019. 200 с.
2. Маслобоев А.В., Быстров В.В. Концептуальная модель жизнеспособности критических инфраструктур в контексте современной теории безопасности сложных систем // Экономика. Информатика. 2020. Т. 47. №3. С. 555-572.
3. Masloboev A.V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience // Reliability and quality of complex systems. 2020. No. 4(32). P. 115-130.
4. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации (Указ Президента РФ № 400 от 02 июля 2021 г.). URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/QZw6hSk5z9gWq0p1D1ZzmR5cER0g5tZC.pdf>.

5. Богданов А.А. Тектология: Всеобщая организационная наука. М.: URSS. 2019. 680 с.
6. Моделирование социо-эколого-экономической системы региона / Под ред. В.И. Гурмана, Е.В. Рюминой. М.: Наука. 2001. 175 с.
7. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика. 2013. 295 с.
8. Маслобоев А.В. Модели региональных кризисных ситуаций и их применение в системах поддержки принятия решений ситуационных центров // Труды ИСА РАН. 2021. Т. 71. №3. С. 57-71.
9. Федеральный закон от 26 июля 2017 года № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/1906>.
10. Bertocchi G., et al. Guidelines for Critical Infrastructures Resilience Evaluation. Rome, Italy: Italian Association of Critical Infrastructures Experts. 2016. 101 p.
11. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems // Annual review of ecology and systematics. 1973. No. 4. P. 1-23.
12. Баркин А.И. Абсолютная устойчивость систем управления. М.: URSS. 2020. 176 с.
13. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. М.: Гостехиздат. 1950. 472 с.
14. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M., Qarahasanlou A.N., Barabadi A. The Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review // Energies. 2021. No. 14. Article number: 1571.
15. Пфанцгль И. Теория измерений. М.: Мир, 1976. 248 с.
16. Емельянов В.В., Ясиновский С.И. Введение в интеллектуальное имитационное моделирование сложных дискретных систем и процессов. Язык РДО. М.: АНВИК. 1998. 432 с.
17. Горский Ю.М. Гомеостатика: модели, свойства, патологии // Гомеостатика живых, технических, социальных и экологических систем. Новосибирск: Наука. 1990. С. 20–67.
18. Кестлер А. Дух в машине // Вопросы философии. 1993. № 10. С. 93-122.
19. Черешкин Д.С., Ройзензон Г.В., Бритков В.Б. Применение методов искусственного интеллекта для анализа риска в социально-экономических системах // Информационное общество. 2020. № 3. С. 14–24.
20. Палюх Б.В., Богатилов В.Н., Алексеев В.В., Пророков А.Е. Приложения метода разделения состояний к управлению технологической безопасностью на основе индекса безопасности. Тверь: Изд-во ТвГТУ. 2009. 398 с.
21. Bruneau M., et al. A framework to quantitatively assess and enhance the science the seismic resilience of communities // Earthquake spectra. 2003. No. 19(4). P. 733-752.
22. Zobel C.W. Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience // Decision Support Systems. 2011. No. 50(2). P. 394-403.
23. Rose A. Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions // Environmental hazards. 2007. No. 7(4). P. 383-398.
24. Henry D., Ramirez-Marquez J.E. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time // Reliability engineering and system safety. 2012. No. 99. P. 114-122.
25. Wang J.W., Gao F., Ip W.H. Measurement of resilience and its application to enterprise information systems // Enterprise Information Systems. 2010. No. 4(2). P. 215-223.
26. Chen L., Miller-Hooks E. Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport // Transportation Science. 2012. No. 46(1). P. 109-123.
27. Orwin K.H., Wardle D.A. New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances // Soil biology and biochemistry. 2004. No. 36. P. 1907-1912.
28. Enjalbert S., Vanderhaegen F., Pichon M., Abel Ouedraogo K., Millot P. Assessment of transportation system resilience // Human modeling in assisted transportation (In Cacciabue C., Hjalmdahl M., Luedtke A., Riccioli C. eds.). Springer-Verlag Italia Milano. 2011. P. 335-341.
29. Francis R., Bekera B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems // Reliability engineering and system safety. 2014. No.12. P. 90-103.
30. Tierney K., Bruneau M. Conceptualized and measuring resilience // Transportation Research News Magazine. 2007. No. 250. P. 14-17.
31. Cimellaro G.P., Reinhorn A., Bruneau M. Seismic resilience of a hospital system // Structure and Infrastructure Engineering. 2010. No. 6. P. 127-177.
32. Chang S.E., Shinozuka M. Measuring improvements in the disaster resilience of communities // Earthquake spectra. 2004. No. 20(3). P. 739-755.
33. Ouyang M., Duenas-Osorio L., Min X. A three-stage resilience analysis framework for urban

- infrastructure systems // *Structural Safety*. 2012. Vol. 36-37. P. 23-31.
34. *Ayyub B.M.* Systems resilience for multi-hazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making // *Risk Analysis*. 2014. No. 34(2). P. 340-355.
 35. *Hashimoto T.* Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation // *Water Resources Research*. 1982. Vol. 18, No. 1. P. 14-20.
 36. *Franchin P., Cavalieri F.* Probabilistic assessment of civil infrastructure resilience to earthquakes // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015. No. 30(7). P. 583-600.
 37. *Youn B.D., Hu C., Wang P.F.* Resilience-driven system design of complex engineered systems // *Journal of Mechanical Design*. 2011. No. 133. P. 1-15.
 38. *Rød B., Barabadi A., Gudmestad O.* Characteristics of Arctic infrastructure resilience: application of expert judgement // *Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference* (Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016). Cupertino, California. 2016. P. 1226-1233.
 39. *Sarwar A., Khan F., Abimbola M., James L.* Resilience analysis of a remote offshore oil and gas facility for a potential hydrocarbon release: resilience analysis of a remote offshore operation // *Risk Analysis*. 2018. No. 38(8). P. 1601-1617.
 40. *Najarian M., Lim G.J.* Design and assessment methodology for system resilience metrics // *Risk Analysis*. 2019. No. 39(9). P. 1885-1898.
 41. *Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Lovecek T.* Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements // *International Journal of critical infrastructure protection*. 2019. No. 25. P. 125-138.
 42. *Pursiainen, C., Rød, B., Baker, G., Honfi, D., Lange, D.* Critical Infrastructure Resilience Index // *Proceedings of the 26th European Safety and Reliability conference, ESREL* (Glasgow, Scotland, September 25-19, 2016). In Walls, Revie & Bedford (Eds.), *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice*. London, UK: Taylor & Francis Group. 2017. P. 2183-2189.
 43. *Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M., Qarahasanlou A.N., Barabadi A.* Resilience analysis: A formulation to model risk factors on complex system resilience // *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*. 2021. No. 12(5). P. 871-883.
 44. *Barabadi A., Markeset T.* Reliability and maintainability performance under Arctic conditions // *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2011. No. 2. P. 205-217.
 45. *Cox D.R., Oakes D.* *Analysis of Survival Data*. New York: Chapman & Hall/CRC. 1984. 212 p.
 46. *Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M., Qarahasanlou A.N., Barabadi A.* Resilience estimation of critical infrastructure systems: Application of expert judgment // *Reliability Engineering and System Safety*. 2021. Vol. 215. Article no. 107849.
 47. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. No. 3. P. 338-353.
 48. *Ларучев О.И.* Вербальный анализ решений. М.: Наука, 2006. 181 с.
 49. *Каница С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.* Синергетика и прогнозы будущего. 3-е изд. М.: Едиториал УРСС. 2003. 288 с.
 50. Управление развитием крупномасштабных систем / С.Н. Васильев, А.А. Макаров, В.Л. Макаров и др. М.: Физматлит, 2015. 473 с.

Маслобоев Андрей Владимирович. Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН), г. Апатиты, Россия. Заведующий лабораторией. Ведущий научный сотрудник. Института информатики и математического моделирования ФИЦ КНЦ РАН. Главный научный сотрудник. Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН. Доктор технических наук, доцент. Количество печатных работ: более 200 (в т.ч. 1 монография). Область научных интересов: системный анализ, моделирование социально-экономических систем, ситуационное управление, теория безопасности систем, мультиагентные системы. E-mail: masloboev@iimm.ru

Formal models of the regional critical infrastructure resilience

A.V. Masloboev

Federal Research Center «Kola Science Center of Russian Academy of Sciences»,
Apatity, Russia

Abstract. For the purpose of unified formalized representation and formal apparatus extension of the theory of regional security, a systematic analysis of known formal models and metrics for assessing the resilience of critical infrastructures is carried out. The examined models and metrics refer to the formal framework for simulation and automation of risk and comprehensive security management processes in regional socio-economic systems. The distinctive features of these models are discussed. A general description of quantitative and qualitative approaches to assessing the resilience of organizational and technical systems is given. A conceptual model of the regional critical infrastructure resilience has been developed. The application of proposed mathematical apparatus and formal models of the regional critical infrastructure resilience allows us to study and evaluate the dynamic characteristics of the functioning and development of regional socio-economic systems on a qualitatively new plane in terms of robustness, recoverability and adaptability of its backbone critical facilities and infrastructures. That provides efficiency enhancement of the preventive look-ahead control, prognostic and health management of the element operation performance state of regional critical infrastructures to mitigate the effects of multiple hazards and maintain the required level of regional security under given conditions by means of situational centers in the region.

Keywords: *formalization, model, assessment, resilience, critical infrastructure, risk management, socio-economic system, regional security, reliability.*

DOI: 10.14357/20790279220307

References

1. *Tsygichko V.N., Chereshekin D.S., Smolyan G.L.* Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur [Safety of critical infrastructures]. M.: URSS, 2019. 200 s.
2. *Masloboev A.V. Bystrov V.V.* Kontseptual'naya model' zhiznesposobnosti kriticheskikh infrastruktur v kontekste sovremennoy teorii bezopasnosti slozhnykh sistem [Conceptual model of critical infrastructure resilience in the context of modern security theory of complex systems] // *Ekonomika. Informatika*. 2020. T. 47, №3. S. 555-572.
3. *Masloboev A.V.* Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience // *Reliability and quality of complex systems*. 2020. No. 4(32). pp. 115-130.
4. *Strategiya natsional'noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii (utv. Ukazom Prezidenta RF № 400 ot 02 iyulya 2021 g.)* [National Security Strategy of the Russian Federation (approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 400, July 02, 2021)]. URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/QZw6hSk5z9gWq0pID1ZzmR5cER0g5tZC.pdf>.
5. *Bogdanov A.A.* Tektologiya: Vseobshchaya organizatsionnaya nauka [Tectology: General organizational science]. M.: URSS, 2019. 680 s.
6. *Modelirovanie sotsio-ekologo-ekonomicheskoy sistemy regiona* [Modeling of the socio-ecological-economic system of the region] / Pod red. V.I. Gurmana, E.V. Ryuminoy. M.: Nauka, 2001. 175 s.
7. *Makarov V.L., Bakhtizin A.R.* Sotsial'noe modelirovanie – novyy komp'yuternyy proryv (agent-orientirovannye modeli) [Social modeling – a new computer breakthrough (agent-based models)]. M.: Ekonomika, 2013. 295 s.
8. *Masloboev A.V.* Modeli regional'nykh krizisnykh situatsiy i ikh primenenie v sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy situatsionnykh tsentrov [Models of Regional Crisis Situations and Their Application in Decision Support Systems of Situational Centers] // *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk*. 2021. T. 71, №3. S. 57-71.
9. *Federal'nyy zakon ot 26 iyulya 2017 goda № 187-FZ «O bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii»* [Federal Law No. 187-FZ, July 26, 2017 “On the Security of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation”]. URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/1906>.
10. *Bertocchi G., et. al.* Guidelines for Critical Infrastructures Resilience Evaluation. Rome, Italy: Italian Association of Critical Infrastructures Experts, 2016. 101 p.
11. *Holling C.S.* Resilience and stability of ecological systems // *Annual review of ecology and systematics*. 1973. No. 4, pp. 1-23.
12. *Barkin A.I.* Absolyutnaya ustoychivost' sistem upravleniya [Absolute stability of control

- systems]. M.: URSS, 2020. 176 s.
13. *Lyapunov A.M.* Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya [The general problem of motion stability]. M.: Gostekhizdat, 1950. 472 s.
 14. *Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M., Qarahasanlou A.N., Barabadi A.* The Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review // *Energies*. 2021. No. 14. Article number: 1571.
 15. *Pfantsagl' I.* Teoriya izmereniy [Theory of measurements]. M.: Mir, 1976. 248 s.
 16. *Emel'yanov V.V., Yasinovskiy S.I.* Vvedenie v intellektual'noe imitatsionnoe modelirovanie slozhnykh diskretnykh sistem i protsessov. Yazyk RDO [Introduction to intelligent simulation modeling of complex discrete systems and processes. RDO language]. M.: ANVIK, 1998. 432 s.
 17. *Gorskiy Yu.M.* Gomeostatika: modeli, svoystva, patologii [Homeostatics: models, properties, pathologies] // *Gomeostatika zhivnykh, tekhnicheskikh, sotsial'nykh i ekologicheskikh sistem*. Novosibirsk: Nauka, 1990. S. 20–67.
 18. *Kestler A.* Dukh v mashine [Spirit in the machine] // *Voprosy filosofii*. 1993. № 10. S. 93-122.
 19. *Chereshkin D.S., Royzenzon G.V., Britkov V.B.* Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta dlya analiza riska v sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh [Application of artificial intelligence methods for risk analysis in socio-economic systems] // *Informatsionnoe obshchestvo*. 2020. № 3. S. 14–24.
 20. *Palyukh B.V., Bogatikov V.N., Alekseev V.V., Prorokov A.E.* Prilozheniya metoda razdeleniya sostoyaniy k upravleniyu tekhnologicheskoy bezopasnost'yu na osnove indeksa bezopasnosti. [Applications of the state separation method to process safety management based on the safety index] Tver': Izd-vo TvGTU, 2009. 398 s.
 21. *Bruneau M., et al.* A framework to quantitatively assess and enhance the science the seismic resilience of communities // *Earthquake spectra*. 2003. No. 19(4). pp. 733-752.
 22. *Zobel C.W.* Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience // *Decision Support Systems*. 2011. No. 50(2). pp. 394-403.
 23. *Rose A.* Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions // *Environmental hazards*. 2007. No. 7(4). pp. 383-398.
 24. *Henry D., Ramirez-Marquez J.E.* Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time // *Reliability engineering and system safety*. 2012. No. 99. pp. 114-122.
 25. *Wang J.W., Gao F., Ip W.H.* Measurement of resilience and its application to enterprise information systems // *Enterprise Information Systems*. 2010. No. 4(2). pp. 215-223.
 26. *Chen L., Miller-Hooks E.* Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport // *Transportation Science*. 2012. No. 46(1). pp. 109-123.
 27. *Orwin K.H., Wardle D.A.* New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances // *Soil biology and biochemistry*. 2004. No. 36. pp. 1907-1912.
 28. *Enjalbert S., Vanderhaegen F., Pichon M., Abel Ouedraogo K., Millot P.* Assessment of transportation system resilience // *Human modeling in assisted transportation* (In Cacciabue C., Hjalmdahl M., Luedtke A., Riccioli C. eds.). Springer-Verlag Italia Milano. 2011. pp. 335-341.
 29. *Francis R., Bekera B.* A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems // *Reliability engineering and system safety*. 2014. No.12. pp. 90-103.
 30. *Tierney K., Bruneau M.* Conceptualized and measuring resilience // *Transportation Research News Magazine*. 2007. No. 250. pp. 14-17.
 31. *Cimellaro G.P., Reinhorn A., Bruneau M.* Seismic resilience of a hospital system // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2010. No. 6. pp. 127-177.
 32. *Chang S.E., Shinozuka M.* Measuring improvements in the disaster resilience of communities // *Earthquake spectra*. 2004. No. 20(3). pp. 739-755.
 33. *Ouyang M., Duenas-Osorio L., Min X.* A three-stage resilience analysis frame-work for urban infrastructure systems // *Structural Safety*. 2012. Vol. 36-37. pp. 23-31.
 34. *Ayyub B.M.* Systems resilience for multi-hazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making // *Risk Analysis*. 2014. No. 34(2). pp. 340-355.
 35. *Hashimoto T.* Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation // *Water Resources Research*. 1982. Vol. 18, No. 1. pp. 14-20.
 36. *Franchin P., Cavalieri F.* Probabilistic assessment of civil infrastructure resilience to earthquakes // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015. No. 30(7). pp. 583-600.
 37. *Youn B.D., Hu C., Wang P.F.* Resilience-driven system design of complex engineered systems // *Journal of Mechanical Design*. 2011. No. 133. pp. 1-15.
 38. *Rød B., Barabadi A., Gudmestad O.* Characteristics of Arctic infrastructure resilience: application

- of expert judgement // Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference (Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016). Cupertino, California. 2016. pp. 1226-1233.
39. Sarwar A., Khan F., Abimbola M., James L. Resilience analysis of a remote offshore oil and gas facility for a potential hydrocarbon release: resilience analysis of a remote offshore operation // Risk Analysis. 2018. No. 38(8). pp. 1601-1617.
40. Najarian M., Lim G.J. Design and assessment methodology for system resilience metrics // Risk Analysis. 2019. No. 39(9). pp. 1885-1898.
41. Rehak D., Senovsky P., Hromada M., Lovecek T. Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements // International Journal of critical infrastructure protection. 2019. No. 25. pp. 125-138.
42. Pursiainen C., Rød B., Baker G., Honfi D., Lange D. Critical Infrastructure Resilience Index // Proceedings of the 26th European Safety and Reliability conference, ESREL (Glasgow, Scotland, September 25-19, 2016). In Walls, Revie & Bedford (Eds.), Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice. London, UK: Taylor & Francis Group, 2017. pp. 2183-2189.
43. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M., Qarahasanlou A.N., Barabadi A. Resilience analysis: A formulation to model risk factors on complex system resilience // International Journal of Systems Assurance Engineering and Management. 2021. No. 12(5). pp. 871-883.
44. Barabadi A., Markeset T. Reliability and maintainability performance under Arctic conditions // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2011. No. 2. pp. 205-217.
45. Cox D.R., Oakes D. Analysis of Survival Data. New York: Chapman & Hall/CRC, 1984. 212 p.
46. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M., Qarahasanlou A.N., Barabadi A. Resilience estimation of critical infrastructure systems: Application of expert judgment // Reliability Engineering and System Safety. 2021. Vol. 215. Article no. 107849.
47. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, no. 3. pp. 338-353.
48. Larichev O.I. Verbal'nyy analiz resheniy [Verbal decision analysis]. M.: Nauka, 2006. 181 s.
49. Kapitsa S.P., Kurdyumov S.P., Malinetskiy G.G. Sinergetika i prognozy budushchego. 3-e izd. [Synergetics and forecasts of the future. 3rd Edition]. M.: Editorial URSS, 2003. 288 s.
50. Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem [Development management of large-scale systems] / S.N. Vasil'ev, A.A. Makarov, V.L. Makarov i dr. M.: Fizmatlit, 2015. 473 s.

Masloboev A.V. Federal Research Center “Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences” (KSC RAS), Apatity, Russia. Head of the Laboratory of Information technologies for regional development management. Leading Researcher of the Institute for Informatics and Mathematical Modeling KSC RAS. Chief researcher of the Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. Doctor of Technical Sciences. Associate Professor. He graduated from the Petrozavodsk State University in 2006. Number of publications: more than 200 (including 1 monograph). Research interests: system analysis, modeling of socio-economic systems, situational control, theory of system security, multi-agent systems. E-mail: masloboev@iimm.ru