

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION HISTORY

УДК 004.94,338.24

DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-3-555-572

## Концептуальная модель жизнеспособности критических инфраструктур в контексте современной теории безопасности сложных систем

**А.В. Маслобоев, В.В. Быстров**

Институт информатики и математического моделирования Федерального исследовательского центра  
«Кольский научный центр Российской академии наук»,  
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14  
E-mail: masloboev@iimm.ru

### Аннотация

В работе предлагается развитие современной теории безопасности сложных систем и расширение области ее применения на класс критических инфраструктур для исследования системных связей и закономерностей, определяющих жизнеспособность критических инфраструктур в условиях неопределенности и риска. Проведен анализ проблематики и состояния исследований в области обеспечения жизнеспособности критических инфраструктур в России и за рубежом. Разработана концептуальная модель жизнеспособности критической инфраструктуры на базе функционально-целевого подхода и теории управления. В рамках модели предложена формализация понятий «критическая инфраструктура» и «жизнеспособность», конкретизирующая содержание этой предметной области исследования с помощью новых формальных конструкций, что позволило расширить формальный аппарат теории безопасности систем и сделать его более конструктивным. Это обеспечило основу для формальной постановки общей задачи управления жизнеспособностью критических инфраструктур и создания концептуальной модели системы управления жизнеспособностью критических инфраструктур.

**Ключевые слова:** критическая инфраструктура, жизнеспособность, система управления, формализация, концептуальная модель, социально-экономическая безопасность.

**Благодарности:** результаты получены в рамках выполнения государственного задания ИИММ КНЦ РАН (№ 0226-2019-0035). Научное обоснование разработок для задач исследования устойчивости критической инфраструктуры Северного морского пути частично поддержано РФФИ (проект 18-07-00167-а).

**Для цитирования:** А.В. Маслобоев, В.В. Быстров. 2020. Концептуальная модель жизнеспособности критических инфраструктур в контексте современной теории безопасности сложных систем. Экономика. Информатика. 47 (3): 555–572. DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-3-555-572.

## Conceptual model of critical infrastructures resilience in the context of modern theory of complex system security

**A.V. Masloboev, V.V. Bystrov**

Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Centre  
«Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences»,  
14 Fersman St, Apatity, Murmansk region, 184209, Russia  
E-mail: masloboev@iimm.ru

### Abstract

The research work proposes modern theory development of complex system security and its application range extension to the class of critical infrastructures for system interrelations and regularities analysis, which define

critical infrastructure resilience under uncertainty and risk impacts. The survey of problems and state-of-the-art issues in the field of critical infrastructure resilience support in Russia and abroad is carried out. Critical infrastructure resilience conceptual model based on functional-target approach and control theory is developed. Within the bounds of model the concept formalization of «critical infrastructure» and «resilience», which specify the content of this research field and objective by new formal constructions, is proposed. That allows formal apparatus extension of system security theory and makes it more constructive. Proposed formal representation provides the basis for general problem statement formalization of the critical infrastructure resilience management and conceptual model design of the control system of critical infrastructure resilience.

**Keywords:** critical infrastructure, resilience, control system, formalization, conceptual model, socio-economic security.

**Acknowledgements:** the study was carried out within the framework of the State Research Program of the Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of RAS (project No. 0226-2019-0035). Scientific justification of developments application for critical infrastructure resilience analysis of the Northern Sea Route was partially sponsored by the Russian Foundation for Basic Research under grant No. 18-07- 00167.

**For citation:** Masloboev A.V., Bystrov V.V. 2020. Conceptual model of critical infrastructures resilience in the context of modern theory of complex system security. *Economics. Information technologies*. 47 (3): 555–572 (in Russian). DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-3-555-572.

---

---

## Введение

Обеспечение государственной и общественной безопасности на основе развития цифровой экономики являются приоритетными целями Стратегии национальной безопасности Российской Федерации [О Стратегии, 2015] и Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года [О Стратегии, 2017]. Важной задачей, которую необходимо решить для достижения этих целей, в указанных нормативных документах отмечается повышение уровня безопасности и защищенности критически важных и потенциально опасных объектов и инфраструктур с использованием современных информационно-телекоммуникационных технологий и средств связи.

В условиях цифровизации государственного управления для решения этой задачи требуется создание и применение интеллектуальных информационно-аналитических систем и средств поддержки принятия управленческих решений в области обеспечения безопасности критических инфраструктур [Цыгичко и др., 2018; Маслобоев, Путилов, 2016].

Согласно исследованию [Цыгичко и др., 2018], под критической инфраструктурой (КИ) понимается совокупность объектов, систем и сетей, сбой в работе которых негативно отражается на различных аспектах социально-экономического развития страны, а также может повлиять на состояние здоровья и безопасности жизни населения. Исходя из этого определения, на передний план выводится задача поддержания жизнеспособности (устойчивости) КИ и их элементов в условиях влияния многообразия внутренних и внешних факторов.

Анализ современного состояния проблем управления жизнеспособностью КИ показывает, что недостаточно разработаны методологические подходы к формализации и решению задач оценки устойчивости КИ. При этом практическое отсутствие формального аппарата для интеграции известных решений в области информационной технологий управления жизнеспособностью КИ затрудняет создание и использование эффективных методов и средств поддержки принятия решений в этой сфере, особенно в условиях цифровой экономики. Наблюдается противоречие между потребностями в повышении уровня устойчивости и защищенности КИ и сложившимися формальными процедурами, не обеспечивающими на практике достаточную эффективность управления безопасностью критически важных объектов социально-экономических систем. Это обуславливает необходимость развития существующих и создания новых моделей и методов управления жизнеспособностью КИ в контексте современной теории безопасности сложных систем.

Целью настоящей работы является системный анализ состояния исследований по проблемам обеспечения жизнеспособности КИ в России и за рубежом, а также разработка концептуальной модели жизнеспособности КИ на принципах функционально-целевого подхода [Маслобоев, Путилов, 2016] и теории управления. Исследование ориентировано на последующее изучение тенденций и взаимосвязей, определяющих устойчивость КИ динамично изменяющихся социально-экономических систем Арктической зоны России.

## **1. Жизнеспособность критических инфраструктур**

### **1.1. Общие положения и определения**

На сегодняшний день одним из перспективных направлений изучения сложных динамических социально-экономических и природно-технических систем является исследование КИ. При этом сам термин «критическая инфраструктура» является собирательным и охватывает различные сферы человеческой деятельности, в рамках которых возникают вопросы сохранения жизненно важных функций общества и личности. Одно из наиболее распространенных определений КИ содержится в директиве European Council [European Council, 2008] и может быть интерпретировано как «объект, система или ее часть, которая имеет важное значение для поддержания жизненно важных функций общества, здоровья, безопасности, экономического или социального благополучия людей, нарушение или разрушение которых может оказать значительное влияние на них в результате невыполнения этих функций». Из этого определения следует, что к объектам КИ могут быть отнесены любые системы, которые оказывают воздействие на различные социальные группы, общества и общественность. При этом стоит заметить, что КИ можно условно разделить на два типа: «жесткие» КИ (физические объекты, системы и сети) и «мягкие» КИ (социально-экономические объекты и институты). Наглядными примерами КИ являются транспортный, топливно-энергетический, оборонно-промышленный комплексы и другие.

### **1.2. Состояние исследований за рубежом**

В последнее десятилетие за рубежом активно развивается комплексное научное направление, получившее название «Critical Infrastructure Resilience» (жизнеспособность КИ) и затрагивающее вопросы оценки устойчивости КИ различной природы и масштаба, а также проблемы управления безопасностью функционирования КИ. В большинстве зарубежных работ по данной тематике под жизнеспособностью КИ (системы) понимают способность системы, подверженной влиянию множественных угроз и опасностей, своевременно и эффективно противостоять, поглощать, приспосабливаться, меняться и восстанавливаться после воздействия негативных факторов путем сохранения, адаптации и восстановления системообразующих структурно-функциональных элементов [UNISDR/UNDRR]. При этом в системе могут наблюдаться синергетические эффекты и появление новых эмерджентных свойств.

Концепция жизнеспособности систем нашла применение в различных предметных областях. Так, в работе [Labaka, et. al., 2015] рассматриваются вопросы разработки типового решения (фреймворка) к управлению объектами атомной энергетики на основе концепции жизнеспособности систем. В исследовании [Holling, 1973] вводится понятие жизнеспособности и устойчивости экологических систем и описываются условия их применимости на примере динамики популяции абстрактного биологического вида. В работе [Flynn, 2008] с точки зрения жизнеспособности гражданского общества дается экспертная оценка историческим событиям в США, связанным с проявлением террористических угроз и последствиями природных стихийных бедствий. В работе [Cassotta, et. al., 2019] поднимаются вопросы международного и регионального правового регулирования жизнеспособности КИ на уровне кибербезопасности энергетического сектора экономики. Это лишь некоторые точечные примеры зарубежных исследований, проводимых в рамках концепции жизнеспособности систем, что показывает большой разброс в их тематике и задачах, на решение которых они направлены.

Такое же разнообразие наблюдается и в методологической базе исследования проблем жизнеспособности КИ. Методология исследования жизнеспособности КИ имеет пересечения

по используемым методам с другими научными дисциплинами: управлением рисками (risk management), кризисным управлением (crisis management); теорией надежности (reliability theory); управлением безопасностью (security management); безопасностью систем (system safety) и другими. Эти направления исследований оказали существенное влияние на становление и развитие теории жизнеспособности систем. Так, место теории жизнеспособности систем среди указанных научных концепций можно позиционировать как результат симбиоза соответствующих областей знаний (рис. 1).

В общем случае выбор того или иного метода исследования жизнеспособности КИ зависит от измерения устойчивости системы (resilience domain), на котором акцентирует свое внимание каждый конкретный исследователь. Так, в литературных источниках можно встретить такие точки зрения, как:

- общественная жизнеспособность (community resilience, societal resilience, human resilience) [Aldrich, Meyer, 2015; Bearse, 2014; Petersen, et. al., 2016];
- экономическая жизнеспособность (economic resilience) [Ahert, 2011];
- экологическая жизнеспособность (ecological resilience) [Wang, Blackmore, 2009];
- технологическая жизнеспособность (technological resilience, infrastructure resilience) [Youn, et. al., 2011; Righi, et. al., 2015];
- организационная жизнеспособность (organizational resilience) [Lee, et. al., 2013];
- информационная жизнеспособность (cyber resilience, information system resilience) [Björck, et. al., 2015].

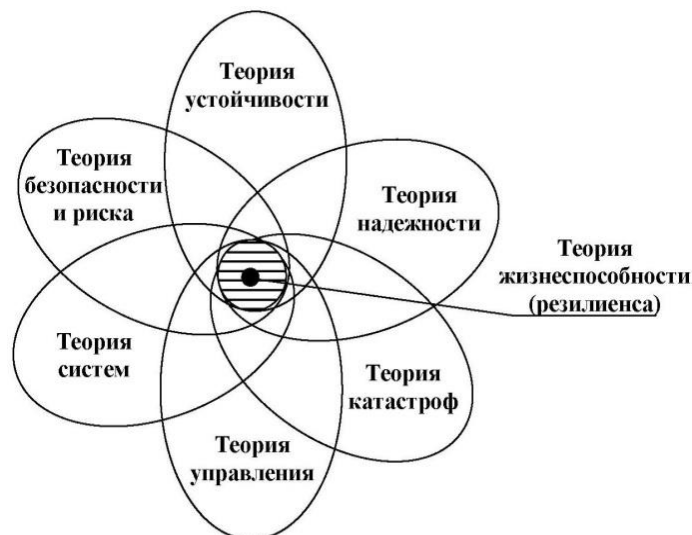


Рис. 1. Место теории жизнеспособности систем среди известных научных концепций  
Fig. 1. Resilience theory position among the state-of-the-art research conceptions

В рамках каждого из приведенных измерений жизнеспособности КИ изучаются отдельные системы, процессы и явления, наиболее значимые для решения конкретной задачи исследования. При этом в большинстве случаев опускают из рассмотрения связи изучаемого вида жизнеспособности системы с другими компонентами КИ.

Наиболее стандартизированным видом жизнеспособности систем (КИ) является организационная, что проявляется в наличии соответствующей нормативной базы. Так, известным международным стандартом в области организационной жизнеспособности является американский национальный стандарт ANSI/ASIS.SPC.1:2009 [ANSI/ASIS, 2009]. Однако, несмотря на высокую степень унификации (стандартизации), основная часть исследований и стандартов рассматривают жизнеспособность организации в узком смысле, то есть как устойчивость к различным угрозам конкретного субъекта хозяйственной деятельности. Этот факт накладывает ограничения на применимость подобного рода стандартов в тех случаях, когда необходимо оценить или выстроить систему управления организационной жизнеспособностью сети взаимодействующих организаций (компаний), каждая из которых преследует свои собственные цели и интересы.

В последнее время особое внимание в зарубежных исследованиях уделяется развитию подходов и инструментов к анализу и оценке разных видов жизнеспособности КИ. В основном решаются задачи по разработке систем индикаторов, отражающих состояние наиболее существенных факторов, оказывающих прямое или косвенное воздействие на жизнеспособность изучаемой системы. Эти индикаторные системы, как правило, имеют иерархическую структуру, а сами значения индикаторов получаются в результате сведения качественно оцененных параметров к их количественным оценкам. При этом используются методы экспертной оценки различных показателей компонентов КИ. В качестве примеров такого рода исследований можно привести проекты: Critical Infrastructure Resilience Index [Pursiainen, et. al., 2017], Benchmark Resilience Tool [BRT, 2019], Guidelines for Critical Infrastructure Resilience Evaluation [Bertocchi, et. al., 2016].

### 1.3. Состояние исследований в России

Анализ отечественной научной литературы показал, что системные исследования проблем жизнеспособности КИ в нашей стране ранее не проводились, а установление прямых аналогов концепции «жизнеспособности систем» представляется достаточно проблематичным в силу междисциплинарности и многоаспектности данного направления исследований. Вместе с тем отечественные работы с разной степенью детализации все же затрагивают отдельные измерения жизнеспособности систем в таких смежных научных дисциплинах как, например, теория надежности, ситуационное управление, риск-анализ, комплексная безопасность, управление в чрезвычайных (кризисных) ситуациях и других. Приведем примеры работ, в которых изложены различные методологические аспекты обеспечения организационной устойчивости и безопасности КИ.

Цикл исследований, представленный в монографии [Цыгичко и др., 2018], охватывает широкий спектр вопросов теории и практики управления рисками нарушения безопасности КИ и их критически важных объектов (на примере систем обеспечения безопасности транспортной инфраструктуры) в условиях неопределенности и неполноты исходной информации.

В работе [Шульц, 2015] развивается системный подход к решению проблем обеспечения безопасности критически важных объектов социально-экономических систем и защиты их от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Даются рекомендации по учету влияния человеческого фактора при расчете и анализе рисков КИ на примере системы обеспечения региональной безопасности и социальной стабильности.

Анализу основных угроз развития экономической КИ страны посвящена работа [Добровольский, 2015]. В ней приведены характеристики территорий федеральных округов и оценка их влияния на общие параметры процессов возникновения различных видов чрезвычайных ситуаций. Обосновывается необходимость совершенствования объектовых и региональных систем обеспечения комплексной безопасности КИ с учетом территориальных особенностей.

Исследование [Соложенцев, 2015] направлено на разработку технологии логико-вероятностного управления рисками развития социально-экономических систем и КИ для информационно-аналитической поддержки принятия решений. Технология реализует методику количественного анализа, оперативного и стратегического управления рисками нарушения безопасности критически важных социально-экономических объектов и КИ и идеологически восходит к работам И.А. Рябинина – основателя научного направления логико-вероятностного моделирования и анализа надёжности, безопасности и риска структурно-сложных систем.

В современных исследованиях методологическую схему принятия решений в отношении риска подразделяют на два крупных блока: оценку и/или анализ риска и управление риском. Анализ риска включает в себя идентификацию опасностей и количественную оценку риска. Управление риском подразумевает разработку альтернатив, оценку вариантов, отбор методов воздействия на объект управления и реализацию выбранных

воздействий. На сегодняшний день одной из перспективных тенденций является переход от концепции реактивного (Safety-I) к концепции проактивного (Safety-II) управления риском [Hollnagel, 2014]. Первый подход подразумевает реагирующую стратегию, фокусировку внимания на неполадках, стремление минимизировать возможный ущерб. Второй подход реализует упреждающую стратегию, концентрацию внимания на нормальном функционировании, стремление максимизировать число «успехов» и решить поставленные задачи. Отечественные работы находятся в русле концепции Safety-II. Концепция проактивного управления риском Safety-II хорошо соотносится с основными принципами концепции жизнеспособности систем, что проявляется в направленности обоих подходов на принятие упреждающих решений с целью сохранения жизненно важных функций системы даже при появлении кризисных ситуаций.

В свете повышения интереса российского и международного научного сообщества к исследованию проблем развития Арктики – стратегическому макрорегиону, во многом определяющему государственную политику мировых держав в борьбе за природные ресурсы и контроль над транспортно-логистическими связями в этом районе, наметились совместные междисциплинарные проекты, в том числе международного уровня, в части разработки теоретических и научно-практических основ обеспечения различных аспектов жизнеспособности систем и КИ Арктики, начиная от вопросов биологической адаптации человека к суровым арктическим условиям и заканчивая разработкой информационно-коммуникационных технологий для обеспечения деятельности человека в Арктике. Так, примером такого проекта может служить программа исследований Российского Фонда Фундаментальных исследований и Бельмонтского Форума (Collaborative Research Action) под общим названием «Resilience in rapidly changing Arctic systems» – жизнеспособность (устойчивость) быстро изменяющихся арктических систем.

Исследователи применяют различные подходы к изучению проблем освоения и развития арктических территорий, в том числе и концепцию жизнеспособности систем. Например, в отчете Стокгольмского Института окружающей среды [SEI, 2013] делается попытка оценить перспективы развития отдельных арктических стран и их жизнеспособность, уделяя основное внимание социально-экологическим аспектам жизнеспособности. В сегменте российских исследований Арктики акцент смещается в сторону рассмотрения экономических вопросов жизнеспособности с позиций концепции устойчивого развития и современной теории безопасности сложных систем. Это отчетливо проиллюстрировано, например, в работах по разработке индикаторов устойчивости КИ Арктики [Гутман, Басова, 2017] и по обеспечению информационной безопасности КИ Российской Федерации [Михалевич, Рыжов, 2018].

Подводя итог проведенному анализу современного состояния исследований проблем жизнеспособности КИ, можно сделать вывод, что отличительная особенность отечественных исследований от зарубежных заключается в точке зрения на изучаемые процессы и системы. Так, для зарубежных работ характерен взгляд со стороны личности и гражданского общества на проблемы безопасности КИ, в то время как российские ученые зачастую придерживаются государственных и национальных интересов в этих вопросах.

## **2. Моделирование и управление жизнеспособностью КИ**

### **2.1. Концептуальная модель КИ**

Для единого содержательного и формализованного представления КИ и связанных с ней объектов и процессов необходима разработка формальной концептуальной модели функционирования КИ. Формальная модель КИ является основой для построения методов и средств автоматизации систем управления жизнеспособностью и безопасностью КИ. Поскольку ключевой особенностью КИ региональных социально-экономических систем является большое число и разнообразие критически важных объектов, расположенных на всей территории региона, то концептуальная модель КИ имеет иерархическую структуру, включающую параметры описания процессов функционирования КИ. Выбор параметров

осуществляется сначала для всей КИ в целом, а затем для конкретных видов безопасности, характерных для данной КИ, и критически важных объектов, входящих в состав этой КИ.

Концептуальная модель КИ в терминах теоретико-множественных отношений формализуется следующей дискретной математической схемой, по сути, описывающей временную последовательность смены состояний КИ:

$$CM_{КИ} = \{O, S, D, I, E, A, C, U, R, ATR\},$$

где  $O$  – множество объектов КИ;  $S$  – множество структурных состояний КИ (система связей КИ);  $D$  – множество пространственных состояний КИ (характеристики локализации критически важных объектов и элементов социально-экономической среды);  $I$  – множество внутренних состояний критически важных объектов и элементов социально-экономической среды (показатели функционирования объектов КИ);  $E$  – множество состояний внешней среды, с элементами которой взаимодействуют объекты КИ;  $A$  – множество внешних воздействий (негативных факторов), влияющих на объекты КИ;  $U$  – множество управляющих воздействий, определяющих изменение состояния КИ и целенаправленное поведение объектов КИ;  $C$  – множество циклических состояний объектов КИ ( $C = \{c_k\}$ , где  $c_k$  – фаза цикла  $k$ -го объекта КИ), определяющих временную структуру функционирования КИ с учетом выбранного шага дискретизации;  $R$  – множество отношений между объектами модели;  $ATR$  – множество атрибутов объектов модели. Объекты модели  $S, D, I, E, A, U$  образуют фазовое пространство состояний КИ. Точка в этом пространстве определяет состояние КИ.

Динамика КИ во многом определяется поведением критически важных объектов и элементов социально-экономической среды, их взаимодействием и взаимным влиянием, в результате чего могут изменяться показатели функционирования КИ, включая внутренние состояния объектов КИ, структуру взаимосвязей, параметры локализации объектов КИ, а также характер внешних воздействий и параметры внешней среды.

Для моделирования динамики состояния КИ  $CM(j)$  на каждом  $j$  шаге необходимо установить последовательность изменения компонентов  $S, D, I, E, U$ . При этом следует учитывать, что эти компоненты являются взаимозависимыми функциями. В общем виде оператор  $F$ , моделирующий динамику состояния КИ  $CM(j)$  на  $(j+1)$ -шаге, синтезируется посредством последовательного применения операторов  $\bar{S}, \bar{D}, \bar{I}, \bar{E}, \bar{A}, \bar{U}$  и представляется следующей системой формальных конструкций:

$$F : \{CM_{КИ}(j)\} \rightarrow CM_{КИ}(j+1),$$

$$\bar{I} : \{I(j), S(j), D(j), E(j), A(j), U(j)\} \rightarrow I(j+1),$$

$$\bar{D} : \{I(j+1), S(j), D(j), E(j), A(j), U(j)\} \rightarrow D(j+1),$$

$$\bar{E} : \{I(j+1), S(j), D(j+1), E(j), A(j), U(j)\} \rightarrow E(j+1),$$

$$\bar{S} : \{I(j+1), S(j), D(j+1), E(j+1), A(j), U(j)\} \rightarrow S(j+1),$$

$$\bar{A} : \{I(j+1), S(j+1), D(j+1), E(j+1), A(j), U(j)\} \rightarrow A(n+1),$$

$$\bar{U} : \{I(j+1), S(j+1), D(j+1), E(j+1), A(j+1), U(j)\} \rightarrow U(j+1).$$

Для оценки состояния КИ на  $(j+1)$ -шаге учитываются предыдущее состояние КИ, сформировавшееся на  $j$  шаге  $CM(j)$ , и множество управляющих воздействий  $U(j)$ . При этом объекты КИ взаимодействуют в соответствии со своими целевыми функциями, что приводит к изменениям их внутренних состояний и формированию нового внутреннего состояния КИ  $I(j+1)$ . Это состояние совместно с компонентами  $S(j), D(j), E(j), A(j), U(j)$  определяет новое пространственное состояние КИ  $D(j+1)$ . Изменение параметров локализации объектов КИ или элементов социально-экономической среды приводит к изменению состояния среды их функционирования  $E(j+1)$ . В результате новое состояние структуры связей КИ  $S(j+1)$  будет определяться внутренним состоянием объектов КИ, их взаимной локализацией, ограничениями на функционирование и внешними условиями. В процессе функционирования

КИ на каждом  $j$  шаге объекты КИ подвержены внешним воздействиям  $A(j+1)$ . Относительно приведенной схемы анализа состояния объектов КИ и КИ в целом на  $(j+1)$  шаге проводится поиск множества управляющих воздействий на компоненты КИ  $U(j+1)$ , определяющих состояние развития КИ на следующем  $(j+2)$  шаге.

Для объектов КИ характерно циклическое функционирование. Это подразумевает поэтапное движение в цикле состояний до его завершения с последующим переходом в новую точку отсчета в пространстве состояний. Объекты КИ могут находиться в определенной фазе цикла, которая определяется характеристиками процессов, протекающих в этом цикле, а также состояниями объектов КИ и множеством управляющих воздействий. Поэтому от фазы цикла также зависит общее состояние КИ. Для формализации процесса построения цикла состояний объектов КИ вводится оператор  $\overline{C}$ , который имеет вид:

$$\overline{C} = \{I(j+1), S(j+1), D(j+1), E(j+1), A(j+1), U(j), C(j)\} \rightarrow C(j+1).$$

Учет цикличности в концептуальной модели КИ позволяет исследовать временные закономерности функционирования объектов КИ в зависимости от состояния КИ и множества управляющих воздействий.

Совокупность приведенных формальных конструкций представляет собой концептуальную модель функционирования КИ, которая позволяет исследовать процессы, происходящие в КИ, и обеспечивает возможность формальной постановки задачи управления жизнеспособностью и безопасностью КИ.

## 2.2. Формализация жизнеспособности КИ

В качестве теоретической основы для формализации термина «жизнеспособность» КИ (в зарубежной терминологии – «резилиенс») предлагается использовать формальные конструкции, предложенные ранее авторами в работе [Маслобоев, Путилов, 2016] и представленные в матричной форме. Столбцы матрицы жизнеспособности КИ соответствуют числу учитываемых в интегральной оценке рисков нарушения безопасности КИ компонентов жизнеспособности КИ (организационная, технологическая, экологическая, социетальная и т. д.), 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 КИ, либо скалярную величину. На этапе моделирования матрица жизнеспособности КИ обеспечивает возможность построения и исследования сценариев достижения требуемого для заданных условий или приемлемого уровня жизнеспособности КИ.

Совокупность объектов КИ образует сложную многомерную систему, которая имеет область устойчивых состояний  $ST = \{st_1, st_2, \dots, st_n\}$  и матрицу переходов из одного устойчивого состояния в другое  $CIR_{n \times m}$ . Каждое устойчивое состояние КИ характеризуется значениями некоторого набора параметров  $PS = \{ps_1, ps_2, \dots, ps_n\}$ , где  $\forall st_i \in ST, ps_i = \{ps_{i1}, ps_{i2}, \dots, ps_{ik}\}$  – значения параметров  $i$ -го устойчивого состояния. Причем значения каждого параметра должны лежать в определенном диапазоне, который может зависеть от значений остальных параметров, а также от времени ( $t$ ):

$$\forall PS_{ij} \in [f_{\min}(ps_{ij}, PS(t)), f_{\max}(ps_{ij}, PS(t))].$$

$\forall cir_{ij} \in CIR, \exists C_{ij} = \{ps_1^{ij}, ps_2^{ij}, \dots, ps_r^{ij}\}$  – цена перехода из состояния  $s_i$  в состояние  $s_j$ , причем  $\{ps_1^{ij}, ps_2^{ij}, \dots, ps_r^{ij}\} \subseteq PS$ . Тогда любой переход будет сопровождаться затратами или высвобождением (накоплением) ресурсов из набора  $C_{ij}$ . Запас ресурсов КИ ( $RS$ ) зависит от ее состояния и от времени  $RS = f(S, t)$ . Следовательно, элементы матрицы  $CIR$  (кроме элементов главной диагонали) будут также зависеть от запаса ресурсов и от времени.

Когда КИ переходит из одного устойчивого состояния в другое, происходит изменение значений данных параметров. Чтобы оценить качество каждого перехода системы,



необходимо ввести критерий как функцию от параметров каждого устойчивого состояния КИ:

$$K = f(PS) \Rightarrow Kst_i = f(ps_{i1}, ps_{i2}, \dots, ps_{ik}).$$

Матрица жизнеспособности КИ представляет собой матрицу устойчивых состояний КИ, которая позволяет определить возможные стратегии перехода КИ из начального устойчивого состояния некоторого цикла развития КИ в его конечное устойчивое состояние за ограниченное время с положительным приращением критериальной функции, позволяющей оценить каждый переход КИ с точки зрения целей моделирования динамики ее развития, то есть матрица жизнеспособности КИ обеспечивает синтез траекторий движения КИ в пространстве устойчивых состояний.

Матрица  $CIR_{n \times m}$ :

$$CIR = \begin{pmatrix} \emptyset & cir_{12}(RS, rk, t) & \dots & cir_{1m}(RS, rk, t) \\ cir_{21}(RS, rk, t) & \emptyset & \dots & cir_{2m}(RS, rk, t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ cir_{n1}(RS, rk, t) & cir_{n2}(RS, rk, t) & \dots & \emptyset \end{pmatrix},$$

где  $RS = f(S, t)$  – требуемые для перехода ресурсы;  $rk = f(P, t)$  – вероятность перехода;  $t$  – время перехода.

Цикл развития КИ ограничен по времени и по величине приращения критериальной функции. Началом цикла будем считать устойчивое состояние  $s_1$ , окончанием –  $s_g$ . В динамике жизнеспособность КИ можно условно определить как процесс риск-устойчивого развития КИ. Тогда этому поступательному процессу будет соответствовать кортеж согласованных во времени элементов матрицы жизнеспособности КИ  $CIR$ :  $CIR^* = \langle cir_1(t_1), cir_2(t_2), \dots, cir_g(t_g) \rangle$ ,  $CIR^* \subset CIR$ , для которого выполняется следующая система неравенств:

$$\begin{aligned} \delta t_{\min} &\leq t_g - t_1 \leq \delta t_{\max}, \\ \delta K_{\min} &\leq K(res_g) - K(res_1) \leq \delta K_{\max}, \end{aligned}$$

где  $\delta t_{\min}$ ,  $\delta t_{\max}$  – границы временного интервала цикла развития;  $\delta K_{\min}$ ,  $\delta K_{\max}$  – границы значений критериальной функции.

При этом все переходы между устойчивыми состояниями внутри цикла развития КИ должны быть согласованы во времени и удовлетворять ограничениям на наличие ресурсов. При оценке состояния жизнеспособности КИ, характеризующего уровень устойчивости КИ, должны также учитываться такие факторы как несимметричность переходов, время переходов и их характер, влияние внешней среды, идентификация границ и взаимосвязей циклов развития КИ. Для согласования показателей функционирования компонентов КИ, представленных в матрице жизнеспособности КИ и оптимизируемых управляющими элементами системы обеспечения безопасности КИ, целесообразно использовать формальный аппарат теории иерархических многоуровневых систем [Месарович и др., 1973] и математические модели координации индексов социально-экономического развития региона [Горошко, Бондаренко, 2015].

Жизнеспособность социально-экономических и технических систем можно трактовать как такое их свойство, при котором они продолжают адаптивно функционировать и развиваться в условиях неопределенности и воздействия множественных внешних и внутренних факторов (угроз) различной природы. Это особое защитное свойство поддерживается за счет реализации комплекса превентивных антикризисных мер, обеспечивающих нахождение системы в области устойчивых состояний и задающих траектории ее движения по направлению к центру безопасности (подмножеству наиболее устойчивых состояний). В общем случае область устойчивых состояний и центр безопасности

не совпадают. К таким защитным мерам, например, относится использование в процессе управления жизнеспособностью систем средств сценарного анализа, мониторинга и прогнозирования негативных воздействий (угроз) и их последствий, средств идентификации критических ситуаций, комплексных автоматизированных систем управления безопасностью, средств интеллектуальной поддержки принятия решений, экспертных систем ситуационного управления и других.

В аналитической форме термин «жизнеспособность» КИ можно формально представить в следующем виде:

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

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

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

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

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

С учетом наличия неопределенности, возникающей вследствие влияния внешней среды на процесс функционирования объектов КИ, вероятностную модель понятия «жизнеспособность» КИ формально можно задать в виде:

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

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

где  $i = \overline{1, k}$ ,  $\Pr$  – символ вероятности;  $\sigma_i$  – индекс безопасности КИ, 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 КИ;  $\varepsilon_i$  – заданное достаточно малое положительное число.

При использовании этого формализма необходимо учитывать то, что в процессе функционирования объектов КИ каждое состояние  $st_i(ps, t)$  с определенной вероятностью проходит вблизи других состояний КИ. 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 КИ в темпе должна обеспечиваться возможность вычисления  $M[st_i(ps, t)]$ .

С точки зрения системного подхода жизнеспособность КИ можно рассматривать как некоторую гипотетическую макросистему, подверженную воздействию внутренних и

внешних факторов. Тогда формализм для описания модели такой системы в операторной форме имеет вид:

$$CIR: X \times \Xi \times U \times SP \times \Psi \times [0, T] \rightarrow Y,$$

где  $X$  – множество идентифицируемых входных воздействий;  $\Xi$  – множество параметрических возмущений внешней среды;  $U$  – множество управляющих воздействий, направленных на стабилизацию объекта управления (КИ) в условиях параметрических возмущений посредством реализации некоторого алгоритма (программы) управления;  $SP$  – множество структурных параметров системы;  $Y$  – множество переменных состояния устойчивости КИ;  $\Psi$  – множество внутренних факторов (возмущений);  $[0, T]$  – период функционирования (цикл развития) системы; « $\times$ » – знак декартова произведения.

Внешние  $\xi \in \Xi$  и внутренние  $\psi \in \Psi$  факторы (возмущения) оказывают влияние на поведение системы через переменные  $x \in X$  и параметры  $sp \in SP$  с помощью некоторых известных механизмов:  $x = x(\xi)$  и  $sp = sp(\psi)$ . Тогда, если система допускает описание в форме дифференциальных уравнений, то модель системы имеет вид:

$$\dot{x} = f(x(\xi), u, sp(\psi), y, t),$$

где  $f$  – известная вектор-функция,  $x(\xi), u, sp(\psi), y$  – векторы множеств  $X, U, SP$  и  $Y$  соответственно с начальными условиями  $y(t_0) = y_0$ .

На основе этой модели в ходе проведения имитационных экспериментов можно проанализировать поведение системы. В зависимости от значений начальных условий  $x_0$ , типа, уровня и сочетания внешних  $\xi$  и внутренних  $\psi$  возмущений, данная модель позволяет получить семейство характерных для нее фазовых траекторий. Эти траектории являются объектом анализа системы (КИ) на устойчивость, то есть на жизнеспособность.

### 2.3. Формальная постановка задачи управления жизнеспособностью КИ

КИ является объектом управления, а задача обеспечения жизнеспособности КИ – это задача оптимального управления в условиях параметрических возмущений внешней среды (социально-экономического окружения КИ). Для оптимального управления необходимо контролировать параметры внешней среды и применять методы и алгоритмы компенсации возмущений для организации обратной связи с целью стабилизации объекта управления. Традиционно в теории управления эта задача решается путем синтеза вектор-функции управляющих воздействий  $\vec{u}(t)$  и использования комбинированной системы управления типа «объект – регулятор» (рис. 2), сочетающей в себе все достоинства принципов замкнутого и разомкнутого управления, то есть реализующей одновременное управление «по отклонению» и «по возмущению». Такой подход к решению задачи стабилизации обеспечивает возможность анализа и контроля поведения неустойчивых динамических систем, к которым относится КИ и их отдельные компоненты. Разомкнутая схема управления применяется в том случае, когда внешние возмущения  $\xi \in \Xi$  могут быть точно или приближенно измерены. Замкнутая схема управления работает по принципу отрицательной обратной связи, то есть по отклонению переменных состояния  $y(t) \in Y$  от заданных значений  $y_0(t)$ , что позволяет скомпенсировать эти отклонения, невзирая на природу внешних возмущений  $\xi$ .

В качестве регулятора для компенсации возмущений предлагается использовать инструменты информационной поддержки управления рисками нарушения безопасности КИ [Маслобоев, Путилов, 2016], обеспечивающие формирование благоприятных условий для целенаправленного поведения объекта управления (КИ).

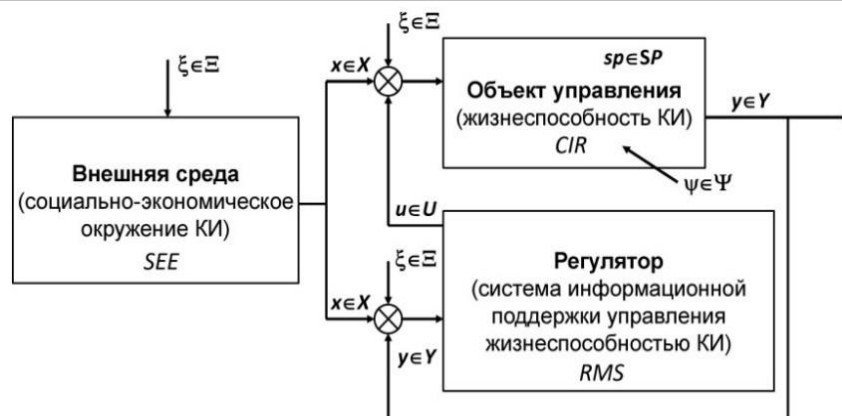


Рис. 2. Общая схема задачи управления жизнеспособностью КИ с комбинированной системой управления

Fig. 2. Problem statement general scheme of critical infrastructure resilience control with combined management system

Рассмотрим формальную постановку задачи управления жизнеспособностью КИ.

Дано:

1) Объекты управления: КИ – множество критически важных социально-экономических объектов и систем  $CIR = \{CIR_i\}$  и жизнеспособность КИ.

2) Множество параметрических возмущений внешней и внутренней среды КИ  $CIR$ :  $\xi = \{\varepsilon(\alpha(t)), \varepsilon(\beta(t)), \varepsilon(\delta(t)), \varepsilon(\rho(t)), \varepsilon(\varphi(t)), \varepsilon(\gamma(t)), \varepsilon(\eta(t))\}$ , где  $t$  – параметр времени.

Параметрические возмущения ( $\xi$ ):

$\varepsilon(\alpha(t))$  – угрозы нарушения экономической жизнеспособности КИ  $CIR$ ;

$\varepsilon(\beta(t))$  – угрозы нарушения социальной и социетальной жизнеспособности КИ  $CIR$ ;

$\varepsilon(\delta(t))$  – угрозы нарушения экологической жизнеспособности КИ  $CIR$ ;

$\varepsilon(\rho(t))$  – угрозы нарушения организационной жизнеспособности КИ  $CIR$ ;

$\varepsilon(\varphi(t))$  – угрозы нарушения технологической жизнеспособности КИ  $CIR$ ;

$\varepsilon(\gamma(t))$  – угрозы нарушения энергетической жизнеспособности КИ  $CIR$ ;

$\varepsilon(\eta(t))$  – угрозы нарушения киберфизической жизнеспособности КИ  $CIR$ .

3) Внешняя среда  $SEE$  (социально-экономическое окружение КИ, включающее хозяйствующие субъекты, управляющие элементы регионального и федерального уровня, мировые глобализационные процессы, военно-политические аспекты, международные тенденции, нормативно-правовое поле и т. д.), подверженная влиянию разнородных факторов  $\xi$  и осуществляющая прямое или косвенное воздействие  $x$  на жизнеспособность КИ.

4) Множество общих требований к социально-экономическому окружению КИ (параметрам внешней и внутренней среды):  $Tr = \{\alpha_{Tr}, \beta_{Tr}, \delta_{Tr}, \rho_{Tr}, \varphi_{Tr}, \gamma_{Tr}, \eta_{Tr}\}$ .

Найти:

1) Множество моделей оценки параметров внешней и внутренней среды  $SEE$  и  $SP$ , характеризующих жизнеспособность КИ  $CIR$ :

$$\mu(t) = \{\alpha(t), \beta(t), \delta(t), \rho(t), \varphi(t), \gamma(t), \eta(t)\},$$

$y \in Y$  – устойчивое состояние самосохранения  $CIR$  (жизнеспособность КИ),

$\mu(t)$  – функция оценки устойчивости (жизнеспособности) КИ  $CIR$ ;

2) Множество алгоритмов  $A(t) = \{A_i(t)\}$ , обеспечивающих стабилизацию объекта управления и образующих его структурных подсистем  $CIR = \{CIR_i\}$ , то есть позволяющих при реализации обеспечивать такое управление  $u \in U$ , при котором воздействия  $\xi$ ,  $\psi$  и  $x$

компенсируются, и результирующая устойчивость (жизнеспособность)  $y \in Y$  находится в допустимых пределах;

3) Модель КИ  $CIR = \{CIR_i\}$ , описывающую КИ с точки зрения состава параметров состояния (показателей) и информации, необходимой для принятия эффективных управленческих решений по обеспечению жизнеспособности КИ;

4) Регулятор  $RMS$  ( $CIR$ ), представляющий собой информационно-управляющую систему обеспечения жизнеспособности и безопасности КИ и реализующий функцию контроля параметрических возмущений  $\zeta$  и  $\psi$ , действующих на объект управления через  $SEE(x)$ , а также функцию стабилизации  $u$  объекта управления с помощью реализации соответствующих алгоритмов и программ управления  $A(t)$ ;

5) Множество подсистем  $RMS$  ( $CIR$ )  $S^{RMS} = \{S_i^{RMS}\}$  и элементов  $E^{RMS} = \{E_i^{RMS}\}$ ;

6) Множество функций подсистем  $RMS$  ( $CIR$ ):  $SF^{RMS} = \{SF_i^{RMS}\}$ ;

7) Множество ограничений по критичности подсистем  $RMS$  (по времени выполнения  $T_{CIR} = \{T_{CIR_i}\}$ ) и по критичности выполнения функционала  $F_{CIR} = \{F_{CIR_i}\}$ ;

8) Метод оценки эффективности функционирования внешней среды КИ  $SEE$  и регулятора  $RMS$ , модели и методику оценки устойчивости внутренней среды КИ и ее компонентов  $CIR = \{CIR_i\}$ .

Таким образом, задача обеспечения жизнеспособности КИ представляет собой задачу стабилизации объекта управления (КИ) по многим параметрам. Эта задача может быть сведена к задаче оптимального выбора по многим критериям.

Пусть жизнеспособность объектов КИ  $\{CIR_i\}$  характеризуется функцией  $\mu(t)$ , значение которой представляет собой вероятность нахождения КИ в устойчивом состоянии защищенности в некоторый произвольный момент времени  $T$ . Тогда можно утверждать, что задача обеспечения жизнеспособности КИ формулируется, как задача достижения максимума функции  $\mu(t)$  по  $t$  на произвольном временном интервале  $t$  (при  $t \rightarrow \infty$ ), то есть:

$$M = \max_{t \in [t_0, \infty]} \mu(t).$$

Функция  $\mu(t)$  определяется через частные функции:

$\alpha(t)$  – оценка экономической безопасности КИ в момент времени  $T$ ;

$\beta(t)$  – оценка социальной стабильности КИ в момент времени  $T$ ;

$\delta(t)$  – оценка экологической безопасности КИ в момент времени  $T$ ;

$\rho(t)$  – оценка организационной устойчивости КИ в момент времени  $T$ ;

$\varphi(t)$  – оценка технологической надежности КИ в момент времени  $T$ ;

$\gamma(t)$  – оценка энергетической безопасности КИ в момент времени  $T$ ;

$\eta(t)$  – оценка информационной безопасности КИ в момент времени  $T$ ;

$t_0$  – начальный момент времени исследования объектов КИ на жизнеспособность.

Поскольку значения частных функций представляют собой вероятности, и значение общей функции состояния жизнеспособности КИ также представляет собой вероятность, можно представить функцию  $\mu(t)$  как взвешенную аддитивную свертку этих функций:

$$\mu(t) = \omega_1 \alpha(t) + \omega_2 \beta(t) + \omega_3 \delta(t) + \omega_4 \rho(t) + \omega_5 \varphi(t) + \omega_6 \gamma(t) + \omega_7 \eta(t),$$

где  $\omega_i$  – весовые коэффициенты значимости соответствующей функции,  $\sum_{i=1}^7 \omega_i = 1$ .

Учитывая специфику объекта управления и размерность задачи, решить поставленную проблему аналитически или численно достаточно сложно. На практике существует несколько подходов к решению данной задачи, отличающихся механизмами реализации управления. Первый способ – это «жесткое» институциональное управление, предполагающее контроль

ограничений и норм деятельности, то есть координацию управления на метауровне. Вторым способом – это более «мягкое» мотивационное управление, предполагающее изменение функций полезности и предпочтений субъекта путем введения системы штрафов и поощрений за выбор тех или иных действий, то есть стимулирование деятельности субъектов управления. И наименее исследованный способ управления жизнеспособностью КИ – «мягкое» информационное управление, предполагающее изменение информации, которую использует субъект управления при принятии решений, то есть адекватную ситуации информационно-аналитическую поддержку принятия решений. Для обеспечения эффективного функционирования многоуровневой распределенной системы управления жизнеспособностью КИ перечисленные механизмы управления должны применяться одновременно, поскольку комбинированное управление предназначено для сложных динамических систем различной природы и масштаба, в которых можно выделить детерминированную часть, поддающуюся идентификации, детальному анализу, расчету и жесткому планированию, и недетерминированную, для которой такая диагностика практически невозможна. К таким системам относятся все известные виды КИ. Для решения формализованной выше задачи разработаны модели и методы, подробно изложенные в работах [Маслобоев, Путилов, 2016; Цыгичко и др., 2018] и обеспечивающие формальную основу имитационного моделирования, автоматизации и координации процессов принятия управленческих решений в сфере управления рисками нарушения жизнеспособности и безопасности КИ.

### Заключение

В ходе проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Выполнен системный анализ проблематики обеспечения жизнеспособности КИ и ее позиционирование в контексте современной теории безопасности сложных систем.
2. На основе обзора текущего состояния отечественных и зарубежных научных работ по данной тематике установлено, что комплексных исследований этой проблемной области в России не проводилось. Отечественные исследования жизнеспособности систем носят точечный характер и концентрируются в основном на вопросах безопасности КИ. В зарубежных исследованиях, напротив, не существует однозначной точки зрения на проблему жизнеспособности КИ, что проявляется в большом разнообразии интерпретаций этого понятия и используемого модельного и методического инструментария для решения частных задач оценки и анализа различных аспектов жизнеспособности систем. Этих аспектов много, и они очень разноплановые. Необходима научная проработка каждого из них с последующим обобщением в единую концепцию жизнеспособности КИ.
3. Показано, что управление жизнеспособностью КИ является сложной научно-технической проблемой, требующей единого формализованного описания предметной области, комплексного учета взаимного влияния факторов различной природы, а также систематизации методологической базы исследования и оценки ее применимости для каждого конкретного типа КИ. Для решения проблемы необходимо создание новых пост-неклассических моделей и методов управления, интегрирующих в себе все достоинства классических и неклассических принципов теории управления и кибернетики, а также основанных на системном подходе и учитывающих противоречивость отдельных задач обеспечения жизнеспособности КИ и ресурсные ограничения на различных уровнях функционирования распределенных систем управления безопасностью КИ.
4. Предложено развитие современной теории управления безопасностью сложных систем и расширена область ее применения на класс КИ для исследования системных связей, и закономерностей, определяющих жизнеспособность и устойчивость КИ в условиях неопределенности и высокой динамики внешней среды. Впервые выполнена формализация терминов «КИ» и «жизнеспособность КИ», уточняющая содержание этой предметной области исследования с помощью конкретных формализмов, что расширяет формальный аппарат теории безопасности систем и делает его более конструктивным. Это обеспечило основу для постановки общей задачи управления жизнеспособностью КИ и разработки концептуальной модели системы управления жизнеспособностью КИ.

Дальнейшие исследования будут направлены на развитие методов математического и компьютерного моделирования жизнеспособности КИ, а также на разработку моделей оценки рисков КИ и функциональной организации систем управления безопасностью КИ.

### Список литературы

1. Добровольский В.С. 2015. Проблемы и особенности обеспечения безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций объектов экономики. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 1: 87–98.
2. Горошко И.В., Бондаренко Ю.В. 2015. Согласование социальных и экономических показателей развития региона: понятие и механизмы. Проблемы управления, 1: 63–72.
3. Гутман С.С., Басова А.А. 2017. Индикаторы устойчивого развития Арктической зоны Российской Федерации: проблемы выбора и измерения. Арктика: экология и экономика. 4 (28): 32–48.
4. Маслобоев А.В., Путилов В.А. 2016. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Апатиты, КНИЦ РАН, 222.
5. Месарович М., Мако Д., Такахара И. 1973. Теория иерархических многоуровневых систем. М., Мир, 343.
6. Михалевич И.Ф., Рыжов А.П. 2018. Оценка устойчивости развития критической инфраструктуры Российской Федерации на базе технологии оценки и мониторинга информационной безопасности. Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2 (22): 7–18.
7. О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации (Указ Президента РФ от 31 декабря 2015 г. N 683). [Электронный ресурс] URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/40391>.
8. О Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года (Указ Президента РФ от 13.05.2017 г. № 208). [Электронный ресурс] URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41921>.
9. Соложенцев Е.Д. 2015. Логико-вероятностное управление риском состояния и развития социально-экономических систем и процессов. Проблемы анализа риска, 12 (1): 6–16.
10. Цыгичко В.Н., Черешкин Д.С., Смолян Г.Л. 2018. Безопасность критических инфраструктур. М., Красанд, 200.
11. Шульц В.Л., Кульба В.В., Шелков А.Б., Чернов И.В. 2015. Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством. М., Наука, 542.
12. Aldrich P.A., Meyer M.A. 2015. Social Capital and Community Resilience. *American Behavioral Scientist*, 59 (2): 254–269.
13. Ahert J. 2011. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100 (4): 341–343.
14. ANSI/ASIS 2009. Organizational Resilience: Security, Preparedness, and Continuity Management Systems - Requirements with Guidance for Use. ANSI/ASIS.SPC.1:2009. [Электронный ресурс] URL: [https://www.ndsu.edu/fileadmin/emgt/ASIS\\_SPC.1-2009\\_Item\\_No.\\_1842.pdf](https://www.ndsu.edu/fileadmin/emgt/ASIS_SPC.1-2009_Item_No._1842.pdf).
15. Bearse R. 2014. The Return on Investing in Personal resilience. The CIP Report. Center for Infrastructure Protection and Homeland Security, 12 (7): 21–24.
16. BRT - Benchmark Resilience Tool. 2019. [Электронный ресурс] URL: <https://www.resorgs.org.nz/resources/organisational-resilience-publications>.
17. Bertocchi G., Bologna S., Carducci G., Carrozzi L., Cavallini S., Lazari A., Oliva G., Traballesi A. 2016. Guidelines for Critical Infrastructures Resilience Evaluation. Associazione Italiana esperti Infrastrutture Critiche (AICC) - Italian Association of Critical Infrastructures Experts. Technical Report. DOI: 10.13140/RG.2.1.4814.6167.
18. Björck F., Henkel M., Stirna J., Zdravkovic J. 2015. Cyber Resilience - Fundamentals for a Definition. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 353: 311–316.
19. Cassotta S., Sidortsov R., Pursiainen C., Goodsite M.E. 2019. Cyber Threats, Harsh Environment and the European High North (EHN) in a Human Security and Multi-Level Regulatory Global Dimension: Which Framework Applicable to Critical Infrastructures under «Exceptionally Critical Infrastructure Conditions»? *Beijing Law Review*, 10: 317–360.
20. European Council. 2008. Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection. [Электронный ресурс] URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:345:0075:0082:EN:PDF>.
21. Flynn S.E. 2008. America the Resilient: Defying Terrorism and Mitigating Natural Disasters. *Foreign Affairs*, 83 (2): 2–8.

22. Hollnagel E. 2014. Safety-I and Safety-II. The Past and Future of Safety Management. Ashgate, England, 187.
23. Holling C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4 (1): 1–23.
24. Labaka, L., Hernantes, J., Sarriegi J.M. 2015. Resilience framework for Critical Infrastructures: An Empirical Study in a Nuclear Plant. *Reliability Engineering and System Safety*, 141: 92–105.
25. Lee A.V., Vargo J., Seville E. 2013. Developing a Tool to Measure and Compare Organizations' Resilience. *Natural Hazards Review*, 14 (1): 29–41.
26. Petersen L. et al. 2016. Social resilience criteria for critical infrastructures during crises. IMPROVER D4.1. [Электронный ресурс] URL: [www.improverproject.eu](http://www.improverproject.eu).
27. Pursiainen C.H., Rød B., Baker G., Honfi D., Lange D. 2017. Critical Infrastructure Resilience Index: in book «Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice». CRC Press, 2183–2189.
28. Righi A.W., Saurin T.A., Wachs, P. 2015. A systematic literature review of resilience engineering: Research areas and a research agenda proposal. *Reliability Engineering and System Safety*, 141: 142–152.
29. SEI. 2013. Arctic Resilience Interim Report. Stockholm Environment Institute and the Stockholm Resilience Centre. [Электронный ресурс] URL: <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/ArcticResilienceInterimReport2013-LowRes.pdf>.
30. UNISDR/UNDRR (n.d.). Terminology on disaster risk reduction. [Электронный ресурс] URL: <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>.
31. Wang C., Blackmore J. 2009. Resilience Concepts for Water Resource Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135 (6): 528–536.
32. Youn B.D., Hu. C., Wang P. 2011. Resilience-driven System Design of Complex Engineered Systems. *Journal of Mech Design*, 133 (10): 10108–10110.

## References

1. Dobrovolsky V.S. 2015. Security and safety support problems and peculiarities under emergency situations of economy objects. *Problems of safety and emergency situations*, 1: 87–98. (in Russian)
2. Goroshko I.V., Bondarenko Yu.V. 2015. Social and economic indicators coordination of regional development: concept and techniques. *Control problems*, 1: 63–72. (in Russian)
3. Gutman S.S., Basova A.A. 2017. Indicators of sustainable development of Russian Federation Arctic zone: problems of selection and measurement. *The Arctic: ecology and economy*. 4 (28): 32–48. (in Russian)
4. Masloboev A.V., Putilov V.A. 2016. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike* [Information dimension of regional security in the Arctic]. Apatity: KSC RAS, 222. (in Russian)
5. Mesarovich M., Mako D., Takakura I. 1973. *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh system* [Theory of hierarchical multi-level systems]. Moscow, Mir, 343. (in Russian)
6. Mikhalevich I.F., Ryzhov A.P. 2018. Sustainability assessment of Russian Federation critical infrastructure development based on information security evaluation and monitoring technologies. *Intelligent systems. Theory and applications*. 2 (22): 7–18. (in Russian)
7. National security strategy of Russian Federation (President of RF decree 31 December 2015 no. 683). [Electronic resource] Available at: <http://kremlin.ru/acts/bank/40391>. (in Russian)
8. Economic security strategy of Russian Federation until 2030 (President of RF decree 13 May 2017 no. 208). [Electronic resource] Available at: <http://kremlin.ru/acts/bank/41921>. (in Russian)
9. Solozhentsev E.D. 2015. Risk logical-and-probabilistic control of socio-economic systems and processes state and development. *Risk analysis problems*, 12 (1): 6–16. (in Russian)
10. Tsygichko V.N., Chereskin D.S., Smolyan G.L. 2018. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur* [Safety of critical infrastructures]. Moscow, Krasand, 200. (in Russian)
11. Shul'ts V.L., Kul'ba V.V., Shelkov A.B., Chernov I.V. 2015. *Stsenarnyy analiza v upravlenii geopoliticheskim informatsionnym protivoborstvom* [Scenario analysis in geopolitical information resistance management]. Moscow, Nauka, 542. (in Russian)
12. Aldrich P.A., Meyer M.A. 2015. Social Capital and Community Resilience. *American Behavioral Scientist*, 59 (2): 254–269.
13. Ahert J. 2011. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100 (4): 341–343.
14. ANSI/ASIS 2009. *Organizational Resilience: Security, Preparedness, and Continuity Management Systems - Requirements with Guidance for Use. ANSI/ASIS.SPC.1:2009*. [Electronic resource] Available at: [https://www.ndsu.edu/fileadmin/emgt/ASIS\\_SPC.1-2009\\_Item\\_No.\\_1842.pdf](https://www.ndsu.edu/fileadmin/emgt/ASIS_SPC.1-2009_Item_No._1842.pdf).



15. Bearse R. 2014. The Return on Investing in Personal resilience. The CIP Report. Center for Infrastructure Protection and Homeland Security, 12 (7): 21–24.
16. BRT – Benchmark Resilience Tool. 2019. [Electronic resource] Available at: <https://www.resorgs.org.nz/resources/organisational-resilience-publications>.
17. Bertocchi G., Bologna S., Carducci G., Carrozzi L., Cavallini S., Lazari A., Oliva G., Traballesi A. 2016. Guidelines for Critical Infrastructures Resilience Evaluation. Associazione Italiana esperti Infrastrutture Critiche (AIIC) - Italian Association of Critical Infrastructures Experts. Technical Report. DOI: 10.13140/RG.2.1.4814.6167.
18. Björck F., Henkel M., Stirna J., Zdravkovic J. 2015. Cyber Resilience - Fundamentals for a Definition. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 353: 311–316.
19. Cassotta S., Sidortsov R., Pursiainen C., Goodsite M.E. 2019. Cyber Threats, Harsh Environment and the European High North (EHN) in a Human Security and Multi-Level Regulatory Global Dimension: Which Framework Applicable to Critical Infrastructures under «Exceptionally Critical Infrastructure Conditions»? *Beijing Law Review*, 10: 317–360.
20. European Council. 2008. Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection. [Electronic resource] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:345:0075:0082:EN:PDF>.
21. Flynn S.E. 2008. America the Resilient: Defying Terrorism and Mitigating Natural Disasters. *Foreign Affairs*, 83 (2): 2–8.
22. Hollnagel E. 2014. *Safety-I and Safety-II. The Past and Future of Safety Management*. Ashgate, England, 187.
23. Holling C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4 (1): 1–23.
24. Labaka, L., Hernantes, J., Sarriegi J.M. 2015. Resilience framework for Critical Infrastructures: An Empirical Study in a Nuclear Plant. *Reliability Engineering and System Safety*, 141: 92–105.
25. Lee A.V., Vargo J., Seville E. 2013. Developing a Tool to Measure and Compare Organizations' Resilience. *Natural Hazards Review*, 14 (1): 29–41.
26. Petersen L. et al. 2016. Social resilience criteria for critical infrastructures during crises. IMPROVER D4.1. [Electronic resource] Available at: [www.improverproject.eu](http://www.improverproject.eu).
27. Pursiainen C.H., Rød B., Baker G., Honfi D., Lange D. 2017. Critical Infrastructure Resilience Index: in book «Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice». CRC Press, 2183–2189.
28. Righi A.W., Saurin T.A., Wachs, P. 2015. A systematic literature review of resilience engineering: Research areas and a research agenda proposal. *Reliability Engineering and System Safety*, 141: 142–152.
29. SEI. 2013. Arctic Resilience Interim Report. Stockholm Environment Institute and the Stockholm Resilience Centre. [Electronic resource] Available at: <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/ArcticResilienceInterimReport2013-LowRes.pdf>.
30. UNISDR/UNDRR (n.d.). Terminology on disaster risk reduction. [Electronic resource] Available at: <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>.
31. Wang C., Blackmore J. 2009. Resilience Concepts for Water Resource Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135 (6): 528–536.
32. Youn B.D., Hu. C., Wang P. 2011. Resilience-driven System Design of Complex Engineered Systems. *Journal of Mech Design*, 133 (10): 10108–10110.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Маслобоев Андрей Владимирович**, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий управления региональным развитием, Институт информатики и математического моделирования Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты, Россия

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andrey V. Masloboev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher in Department of Information Technologies for Regional Development Management, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Center “Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

**Быстров Виталий Викторович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории информационных технологий управления региональным развитием, Институт информатики и математического моделирования Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты, Россия

**Vitaly V. Bystrov**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher in Department of Information Technologies for Regional Development Management, Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Center “Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia