УДК 004.94, 338.24 DOI 10.21685/2307-4205-2019-4-3

А. В. Маслобоев, В. А. Путилов

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ[1]

A. V. Masloboev, V. A. Putilov

A GENERIC SYSTEM-DYNAMIC MODEL FOR REGIONAL SECURITY CONTROL

Аннотация. Для прогнозирования динамики показателей безопасности региона при заданных параметрах и ограничениях разработана комплексная системно-динамическая модель региональной безопасности. Модель создана на основе интегрированной концептуальной модели региональной безопасности и библиотеки типовых имитационных шаблонов с применением метода синтеза имитационных моделей сложных систем, предложенного в Институте информатики и математического моделирования Кольского научного центра РАН и обеспечивающего синтез моделей системной динамики из соответствующих концептуальных моделей. Модель представляет собой комплекс функциональных модельных блоков, позволяющих оценить состояние и тенденции развития региональных элементов и подсистем: демография, производство, рынок труда, наука и образование, окружающая среда и др. Для каждого компонента на модели формализованы основные риски. Модель отличается композитной структурой, т.е. структура модели динамически формируется из конечного числа типовых модельных шаблонов, что повышает корректность модели и сокращает время на ее конфигурацию «под задачу». В модели используется оригинальная система показателей безопасности, созданная в результате обобщения существующих индикаторных систем и формирования интегральных показателей, полученных путем свертки ряда групп общепринятых индикаторов безопасности. Модель включает также индивидуальные показатели региона, отражающие специфику Арктической зоны России.

Ключевые слова: системно-динамическая модель, информационная поддержка, управление, имитационное моделирование, региональная безопасность.

Abstract. For regional security index dynamics forecasting under specified characteristics and constraints an integrated system-dynamic model for regional security management support has been developed. The model is designed on the basis of regional security unified conceptual model and by application of system-dynamic model synthesis method of complex systems. The model correspond an assembly of functional model units which provide state-of-the-art and tendencies of regional components (population, industry, labour-market, technology and education, environment, etc.) development assessment. For each component within the model the main risks are formalized. The distinctive feature of the model is composite structure, which dynamically forms from among the problem-oriented model patterns, that provides model validity enhancement and model setting time reduction for it configuration under concrete problem-solving. The model use an original security metrics system, which is implemented as a result of generalization of existing indicator systems and formation of integral indexes, derived by the standard safety indicator groups convolution. The model involves individual regional development indicators, which reflect specificity of the Arctic region.

Keywords: system-dynamic model, information support, control, simulation, regional security.

Введение

Согласно исследованиям [1, 2], с точки зрения системного подхода сложность управления региональной безопасностью состоит в том, что региональная социально-экономическая система как

[1] Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема НИР № 0226-2019-0035) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 18-07-00167-а, 19-07-01193-а).

© Маслобоев А. В., Путилов В. А., 2019

объект управления представляет собой совокупность тесно взаимосвязанных различных по масштабам и структуре естественных и искусственных подсистем, объединяющих в единое целое экономическую инфраструктуру, социальную сферу, производство, окружающую среду, сферу перераспределения, различные социальные группы и большие коллективы людей. Чем выше степень гармонизации развития региональных компонентов, тем выше уровень региональной безопасности, т.е. защищенность региона от влияния внутренних и внешних угроз различной природы.

Развиваемая в настоящей работе методология управления региональной безопасностью так же, как и концепция устойчивого развития, базируется на системном подходе, т.е. рассматривает объект управления (страну, регион, город, конкретную отрасль и т.п.) как систему. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность использования современных достижений в сфере компьютерных технологий и методов моделирования для повышения эффективности и безопасности функционирования региональных социально-экономических систем, в том числе разработку новых методов и средств информационной поддержки управления безопасностью развития этих систем.

Для прогнозирования динамики показателей безопасности региона, оптимизируемых различными элементами многоуровневой системы управления региональной безопасностью, сценарного анализа и оценки результативности реализации антикризисных мероприятий необходимо использовать специальные методы моделирования. Такие перспективные во времени оценки способно дать имитационное моделирование региональной безопасности. Основное назначение имитационной модели – сделать прогноз показателей безопасности при заданных параметрах и ограничениях.

Имитационные модели реализуются с помощью агентной технологии [3] и системной динамики [4]. Системно-динамические модели используются для приближенного прогноза и выявления тенденций в динамике показателей безопасности, а агентные модели – для более точных количественных оценок этих показателей.

В качестве входных параметров имитационных моделей региональной безопасности используется система показателей безопасности региона – набор определенных параметров для каждой области региональной безопасности, формализация и декомпозиция которых производятся в терминах концептуальной модели региональной безопасности [2] на основе функционально-целевого подхода [5]. Переход от концептуальной модели к модели системной динамики реализуется на основе разработанного в Институте информатики и математического моделирования Кольского научного центра РАН метода концептуального синтеза динамических моделей сложных систем [6], обеспечивающего синтез моделей системной динамики из соответствующих концептуальных моделей.

Нотация и метод системной динамики

Эффективным подходом к моделированию региональных систем является метод системной динамики [7, 8]. Данный метод применяется для исследования динамически сложных систем с множественными и, как правило, неоднородными обратными связями, что затрудняет, а зачастую делает невозможным применение аналитических методов для моделирования таких систем. Важным достоинством инструментальных средств системно-динамического моделирования является возможность оперативной модификации не только параметров модели, но и ее структуры непосредственно в ходе реализации вычислительного эксперимента. Отмеченные аспекты и имеющийся мировой опыт позволяют констатировать большой потенциал приложения метода системной динамики в задачах управления устойчивым развитием региональных систем, характеризующихся сложностью, большой длительностью развития, слабой формализованностью и новизной ситуаций.

Как отмечается в работе [4], в специализированных системах построения и исследования моделей системной динамики используется специальный графический язык представления моделей. При построении модели реальной системы в среде системно-динамического моделирования предварительно производится структурная декомпозиция исследуемой системы, т.е. выделяются составляющие ее элементы и связи между ними. Структура модели в системах динамического моделирования, подобных Powersim [9], задается следующим набором множеств: $\{L, F, V, C, R\}$, где L – множество уровней, F – множество потоков, V – множество переменных, C – множество констант, R – множество связей. Для элементов каждого множества в системе имеется специальная графическая нотация, представленная на рис. 1. Каждый из элементов модели может быть либо скаляром, либо иметь специфический тип (перечисление, подмножество перечисления, числовое подмножество) [4].

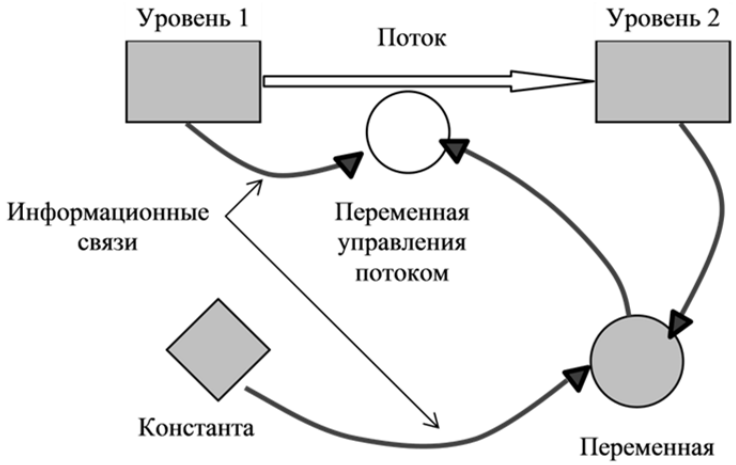

Рис. 1. Структурные элементы системы динамического моделирования

Структура и состав системно-динамической модели

Концептуальная модель предметной области «региональная безопасность» включает в себя иерархическую древовидную структуру – дерево целей, которое отражает процесс декомпозиции главной цели «обеспечение региональной безопасности» на подцели, такие как «обеспечение экономической безопасности региона», «обеспечение экологической безопасности региона» и т.д. Кроме того, в модели формализованы базовые показатели социально-экономической системы региона. Структура модели получена в результате декомпозиции следующих базовых показателей: валовой региональный продукт, население, бюджет и др. Примитивами (объектами нижнего уровня декомпозиции) модели являются: выручка от продажи товаров, себестоимость проданных товаров, численность населения по возрастным группам, среднедушевые денежные доходы населения по каждой группе, среднегодовая численность занятых в экономике, инвестиции в основной капитал, среднегодовая заработная плата, уровень безработицы, миграционный прирост, естественный прирост, уровень социальной обеспеченности, количество предприятий (рабочих мест), социальное потребление, федеральная финансовая помощь.

В ходе исследований разработана библиотека системно-динамических шаблонов для имитационных моделей процессов управления региональной безопасностью. Типовые шаблоны реализованы в интегрированной среде системно-динамического моделирования Powersim [9] и двух специализированных приложений – редактора шаблонов и системы прикладного имитационного моделирования [10]. Шаблоны созданы для таких концептуальных классов, как: объекты обеспечения безопасности, субъекты управления безопасностью, действующие внутренние и внешние факторы, кризисные ситуации, сценарии снижения рисков воздействия потенциальных угроз и опасностей и др. Синтез проблемно-ориентированных имитационных моделей из шаблонов осуществляется на основе концептуального описания решаемой задачи.

На основе концептуальной модели и созданной библиотеки типовых имитационных шаблонов с применением метода синтеза моделей системной динамики из соответствующих концептуальных моделей разработана комплексная системно-динамическая модель региональной безопасности Арктической зоны Российской Федерации (АЗ РФ). Модель обеспечивает прогноз показателей региональной безопасности при заданных параметрах и ограничениях, а также позволяет выявлять тенденции в динамике этих показателей при различных сценариях развития региона. Получаемые на основе модели прогнозные оценки используются для формирования интегрального показателя региональной безопасности, а также в задачах координации процессов принятия решений на разных уровнях управления безопасностью региона. Обобщенная схема построения комплексной имитационной модели региональной безопасности приведена на рис. 2.

Созданная модель в отличие от известных динамических моделей [8, 11, 12], являющихся базовыми для моделирования устойчивого развития макросистем различного уровня, позволяет учитывать наиболее существенные компоненты региональных социально-экономических систем, важные с точки зрения региональной специфики и целей моделирования устойчивого развития. Модель состоит из следующих основных компонентов: население региона, производство, финансы, рынок

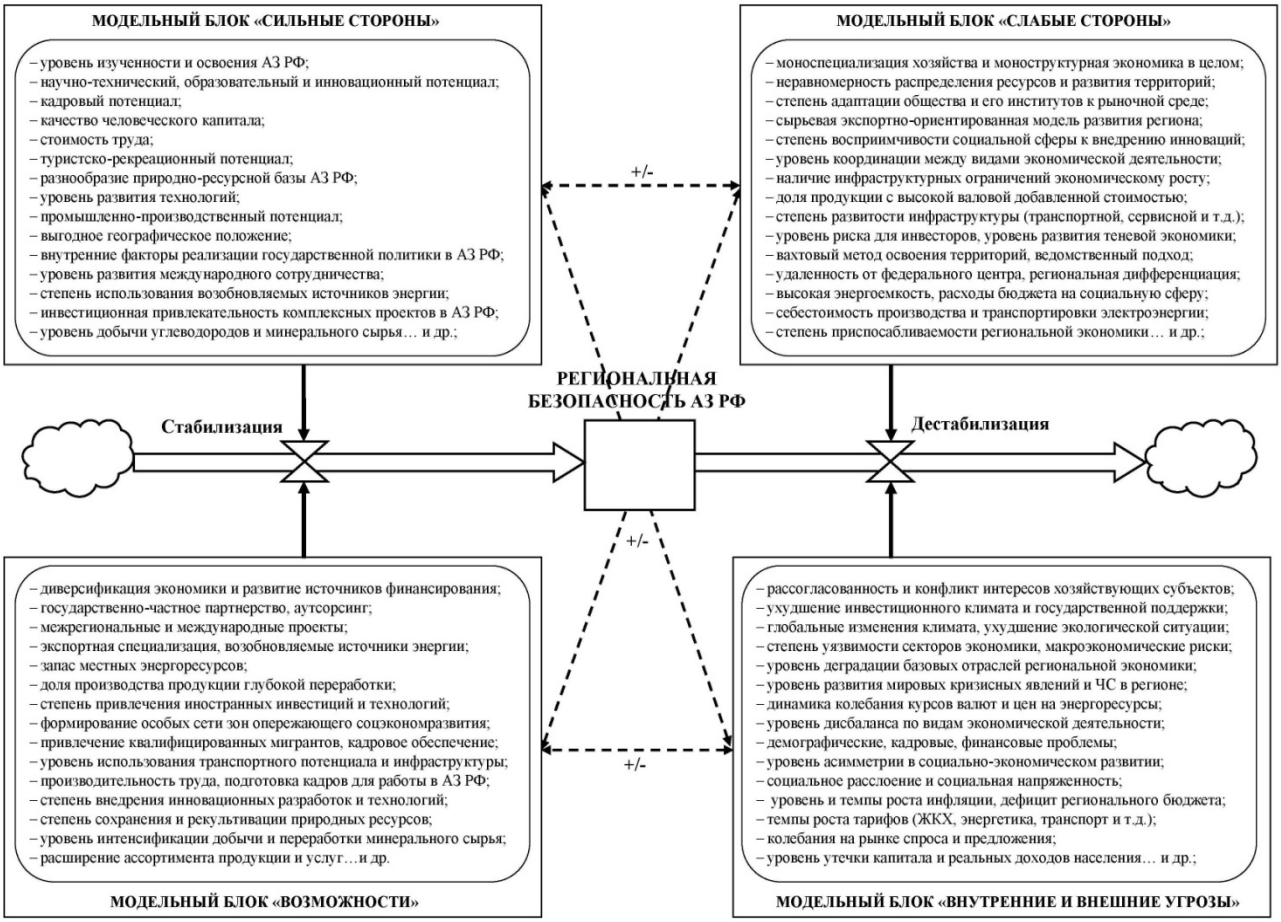

Рис. 3. Состав комплексной имитационной модели региональной безопасности

Основные уравнения системно-динамической модели

Валовой региональный продукт. В качестве основы для формализации показателя «валовой региональный продукт» (ВРП) предложено использовать комбинацию известных модельных уравнений, представленных в работах [4, 13, 21]. Далее приведем эти уравнения.

ВРП региона вычисляется как пропорция от ВВП в сопоставимых ценах:

$$VRP_t^c = k_{1t} \cdot VVP_t^c , \quad (1)$$

где VRP_t^c – ВРП региона в году t; индекс c означает, что используются сопоставимые цены, если без индекса – текущие; VVP_t^c – валовой внутренний продукт (ВВП) в году t в сопоставимых ценах; k_{1t} – коэффициент пропорциональности, задаваемый экспертом.

ВРП региона в текущих ценах вычисляется как произведение ВРП в сопоставимых ценах на дефлятор ВРП, который согласно исследованию [13] задается экспертно:

$$VRP_t = VRP_t^c \cdot D_t(VRP), \quad (2)$$

где $D_t(VRP)$ – базовый дефлятор ВРП.

Инвестиции в основной капитал региона в сопоставимых ценах вычисляются как линейная функция от ВРП в сопоставимых ценах:

$$I_t^c = r_1 VRP_t^c + r_2 , \quad (3)$$

где r_1 и r_2 – коэффициенты регрессии.

труда, наука и образование, окружающая среда, технологические инновации, ресурсная база. Для каждого компонента на модели формализованы основные риски. Модель представлена совокупностью композитных модельных блоков (рис. 3), описывающих состояние промышленного и инновационного потенциала региональной экономики, кадровой и экологической безопасности. Модель обеспечивает оценку и анализ динамики потенциальных угроз безопасности при различных сценариях развития региона с предоставлением эксперту возможностей для вариативного расчета и оперативного корректирования показателей региональной безопасности в рамках существующей статистической отчетности. Модель учитывает систему ограничений для показателей и их взаимозависимость. В пределах этих ограничений может быть реализован один из нескольких вариантов развития.

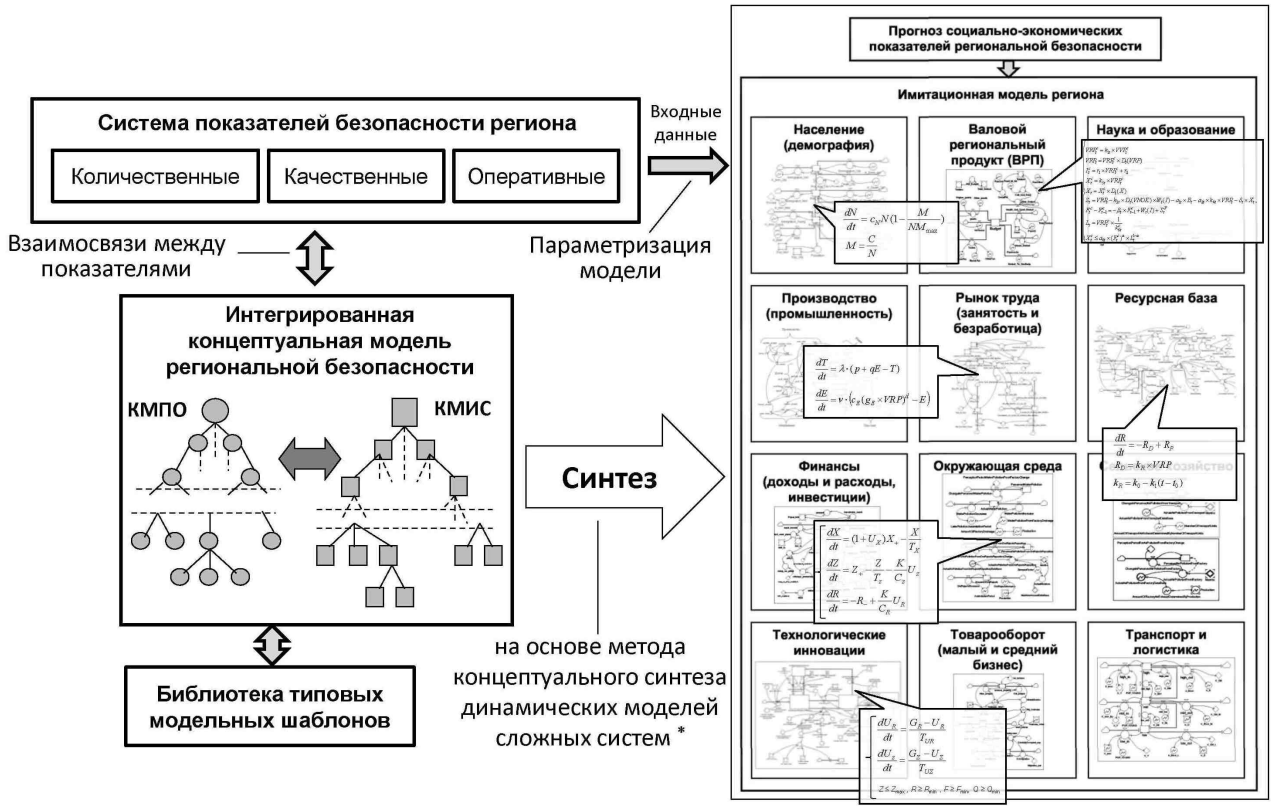

Рис. 2. Общая схема построения комплексной имитационной модели безопасности региона

Сплошными и крупными стрелками на рис. 3 обозначены информационные потоки, пунктирными стрелками – положительные и отрицательные обратные связи между элементами модели, прямоугольником – уровень (накопитель), изменяющийся под влиянием потоков компенсирующих и дестабилизирующих факторов. Знак «+» над линией информационной связи определяет положительный характер влияния рассматриваемых элементов друг на друга, т.е. если увеличение значения одного элемента системы приводит к возрастанию значения другого элемента системы. Знак «–» – отрицательный характер влияния, т.е. если увеличение значения одного элемента системы приводит к уменьшению значения другого элемента системы.

Согласно гипотезе, выдвинутой в работе [13], в имитационной модели региона выбираются переменные, которые на определенных интервалах времени меняются медленно («медленные переменные»). Это обеспечивает возможность прогнозировать тенденции многих показателей и исследовать их факторные взаимосвязи.

Ансамбль имитационных моделей промышленного потенциала региона включает в себя модели основных отраслей экономики АЗ РФ [14]: горнопромышленного, топливно-энергетического, рыбопромышленного, транспортного и сельскохозяйственного комплексов. Созданные модели позволяют путем многократной имитации оценивать экономический и связанный с ним экологический риски различных сценариев развития регионов АЗ РФ.

Суммарное сальдо S_t состоит из двух слагаемых

$$S_t = S_{1t} + S_{2t}, \tag{4}$$

где S_{1t} – сальдо экспорта и импорта; S_{2t} – межрегиональное сальдо.

Оценка сальдо S_t происходит следующим образом:

$$S_t = VRP_t - VNOK_t - (Z_t - Z_{t-1}) - P_t, \tag{5}$$

где $VNOK_t$ – валовое накопление основного капитала в регионе в году t; Z_t – запасы материальных оборотных средств в регионе в году t; P_t – конечное потребление на территории региона.

Валовое накопление основного капитала пропорционально вводам основных фондов:

$$VNOK_t^c = q_t W_t(I), \tag{6}$$

где $W_t(I)$ – вводы основных фондов в сопоставимых ценах (функция от инвестиций в основной капитал разных моментов времени); q_t – коэффициент пропорциональности, задаваемый экспертом.

Конечное потребление зависит от расходов консолидированного бюджета и доходов сектора домашнего хозяйства:

$$P_t = a_{1t} B_t + a_{2t} D_t, \tag{7}$$

где B_t – расходы консолидированного бюджета; D_t – доход сектора домашнего хозяйства. Показатель B_t является управляющим параметром.

Зависимость доходов домашних хозяйств от *VRP*:

$$D_t = k_{4t} VRP_t, \tag{8}$$

где k_{4t} – коэффициент пропорциональности, задаваемый экспертом.

Зависимость прироста материальных оборотных средств от выпуска региональной экономики:

$$Z_t - Z_{t-1} = \delta_t X_t,$$

где X_t – выпуск всех отраслей экономики региона в году t; δ_t – коэффициент пропорциональности, задаваемый экспертом.

Ограничение производственных мощностей региона:

$$X_t^c \le a_{0t} (F_t^c)^a L_t^{1-a}, \tag{9}$$

где F_t^c – стоимость основных фондов в году t; L_t – численность занятых в регионе в году t; a_{ot} – коэффициент эффективности технологий.

Оценка численности занятых:

$$L_t = VRP_t^c \frac{1}{k_{6t}^c}, \tag{10}$$

где k_{6t}^c – производительность труда по ВРП в сопоставимых ценах.

Оценка выпуска экономики региона в сопоставимых ценах согласно работе [13]:

$$X_t^c = k_{5t} VRP_t^c, \tag{11}$$

где k_{5t} – коэффициент пропорциональности, задаваемый экспертом.

Динамика основных фондов:

$$F_t^c - F_{t-1}^c = -\beta_t F_{t-1}^c + W_t(I) + S_t^F, \tag{12}$$

где β_t – коэффициент выбытия основных фондов; S_t^F – межрегиональное сальдо обмена основными фондами.

Учитывая уравнения (1)–(12), получаем следующую систему для неизвестных параметров:

$$\begin{cases} VRP_t^c = k_{1t} VVP_t^c, \\ VRP_t = VRP_t^c D_t(VRP), \\ I_t^c = r_1 VRP_t^c + r_2, \\ X_t^c = k_{5t} VRP_t^c, \\ X_t = X_t^c D_t(X), \\ S_t = VRP_t - k_t D_t(VNOK) W_t(I) - a_{1t} B_t - a_{2t} k_{4t} VRP_t - \delta_t X_t, \\ F_t^c - F_{t-1}^c = -\beta_t F_{t-1}^c + W_t(I) + S_t^F, \\ L_t = VRP_t^c \dfrac{1}{k_{6t}^c}, \\ X_t^c \le a_{0t} (F_t^c)^a \times L_t^{1-a}, \end{cases} \tag{13}$$

где $D_t(X)$ – базовый дефлятор выпуска экономики региона; $D_t(VNOK)$ – базовый дефлятор валового накопления основного капитала.

В работе [21] предлагается подбирать связи между переменными, исходя из динамики соответствующих показателей в прошлом и на основании экспертных оценок.

В дополнение к представленным уравнениям далее приведем формальное описание отдельных блоков модели в приложении к каждому сектору региональной экономики АЗ РФ. Уравнения получены на основе результатов исследований, изложенных в работах [4, 15, 21].

Демография. В основу демографического уравнения положено квазилогистическое уравнение [16], характеризующее ресурсное ограничение по душевому конечному потреблению:

$$\frac{dN}{dt} = c_N N \left(1 - \frac{M}{N M_{\max}} \right), \tag{14}$$

где c_N – темп прироста численности населения; N – численность населения; M – уровень жизни (потребление на душу населения); $M_{\max}$ и c_N – параметры-константы:

$$M = \frac{C}{N}, \tag{15}$$

где $C = g_c VRP$ – конечное потребление; g_c – доля ВРП, идущая на конечное потребление; VRP – валовой региональный продукт.

В работах [4, 13] установлено, что для задач социально-экономического планирования на региональном уровне в области демографии важен прогноз не только общей численности населения, доли экономически активного населения, численности занятых и безработного населения, но и прогноз возрастной структуры населения. В частности, в работе [13] показано, что знание численности населения пенсионного возраста на 3–10 лет вперед позволит скорректировать бюджетную стратегию региона. Поэтому для блока демографии дополнительно используется модель [13], основанная на классическом методе компонент (или метод передвижки возрастов, когортный анализ). Согласно работе [13] в рамках метода компонент все населения региона делится на группы людей одного возраста, т.е. годовые когорты. Кроме того все когорты делятся на мужские и женские, для корректной оценки воспроизводственного потенциала населения. Для каждой когорты определяются собственные коэффициенты рождаемости, смертности и миграции. Использование такой дополнительной модели демографии обеспечивает возможность решения задач разработки миграционной политики, прогнозирования объема пенсионных выплат на 3–5 лет, анализа различных аспектов социально-экономического развития, связанных с занятостью населения.

Экономический потенциал (финансы). Уравнение для основного капитала имеет вид

$$\frac{dK}{dt} = VNOK - \mu K, \tag{16}$$

где $VNOK$ – валовое накопление, $VNOK = g_k VRP$, причем $g_c + g_k = 1$; g_k – доля ВРП, идущая в основной капитал; g_c – доля ВРП, идущая на конечное потребление; VRP – валовой региональный продукт; μ – коэффициент износа основных фондов; K – капитал (финансы).

Ресурсный потенциал (ресурсы). Под ресурсами R будут пониматься, прежде всего, невозобновляемые топливно-энергетические ресурсы. Величина R характеризует разведанные запасы ресурсов (т.е. доказанные и пригодные к добыче). Согласно работе [17] вопрос о коммерческой выгодности этих запасов приводит к более сложной постановке задачи, при которой потребуется дополнительно моделировать поведение цены на ресурс, что довольно сложно. Предполагается, что описать движение физических потоков в целом, т.е. добычу и потребление основных энергоресурсов, возможно без прогноза цен на ресурсы. В этом случае согласно [21] используется следующее уравнение в общем виде:

$$\frac{dR}{dt} = -R_D + R_P, \tag{17}$$

где R – запасы ресурсов; R_D – добыча ресурсов; R_P – пополнение запасов, разведка:

$$R_D = k_R VRP, \tag{18}$$

где k_R – энергоемкость ВРП, т.е. отношение использованной (или произведенной) энергии к ВРП; VRP – валовой региональный продукт.

Коэффициент энергоемкости k_R может использоваться в качестве управляющего параметра: задавая его поведение во времени, получается сценарий развития ресурсного сектора региональной экономики:

$$k_R = k_0 - k_1(t - t_0). \tag{19}$$

Инновационный потенциал (технологии). Технологический потенциал – показатель, плохо измеримый в количественном эквиваленте. С точки зрения экономики содержательно технологии – это все, что повышает эффективность использования различного типа ресурсов (материальных, кадровых, финансовых и т.д.). Технологии призваны увеличить объем производимой продукции и приносить прибыль за счет повышения производительности труда и качества используемого капитала при создании нового продукта. Согласно [21] для учета взаимосвязей ВРП, капитала, численности населения и технологий используется следующий аналог производственной функции вида

$$VRP = TK^{\alpha} \cdot N^{1-\alpha}, \tag{20}$$

где VRP – валовой региональный продукт; T – уровень технологий; K – капитал (финансы); N – численность населения; α – параметр, причем $\alpha \in [0{,}25;0{,}4]$. Диапазон значений параметра α указан с учетом допущений, изложенных в работе Pricewatershouse Coopers [18] и обоснован с точки зрения теории экономического роста [19].

ВРП задается функцией Кобба – Дугласа при техническом прогрессе, нейтральном по Хиксу [19]. Вместе с тем можно использовать производственную функцию при техническом прогрессе, нейтральном по Харроду (когда множитель появляется при N). В последнем случае, например, под уровнем технологий может подразумеваться уровень образования как фактор, отвечающий за «качество» населения и рабочей силы [21].

Несмотря на это, вопрос о выборе производственной функции нужного вида остается нерешенным. Основная трудность состоит в следующем: переменные ВРП VRP, капитал K, численность населения N, время t обладают высокой степенью корреляции между собой. В работе [21] показано, что определить, исходя из регрессии, параметр α и какой вид более подходящий, не представляется возможным из-за эффекта мультиколлинеарности. Такой произвол не может быть устранен эконометрическими методами. В этом случае требуется волевое решение.

Уравнение для технологий будет уточнено в следующем секторе, поскольку предполагается его связь с образованием.

Интеллектуальный потенциал (образование). В качестве характерной величины предлагается выбрать ожидаемую продолжительность времени обучения E, выражаемую в годах (аналогич-

но, как и ожидаемая продолжительность жизни). Как и в работе [21], условно будем предполагать, что чем дольше длится процесс обучения человека, тем выше уровень его образования. Исходя из гипотетической связи между технологическим потенциалом (технологиями) и образованием, можно определить динамическое уравнение для уровня технологий. Рост продолжительности времени обучения приводит к повышению уровня образования, которое, в свою очередь, приводит к росту качества рабочей силы, что косвенно влияет на развитие технологий.

Согласно исследованию [22] зависимость между величинами уровня технологий T и продолжительности времени обучения E можно считать линейной с колебаниями, которые вызваны запаздыванием. Тогда динамическое уравнение для уровня технологий примет вид

$$\frac{dT}{dt} = \lambda(p + qE - T), \tag{21}$$

где λ – коэффициент старения технологий, обратный характерному времени запаздывания, которое принимается 10±5 лет; p и q – коэффициенты; λ = 0,10 ± 0,03, p = 59,2 ± 7,2, q = 12,59 ± 0,73; E – уровень образования; T – уровень технологий.

Связь продолжительности обучения с расходами на образование характеризуется уравнением

$$\frac{dE}{dt} = \nu\left(c_E(g_E \cdot VRP)^d - E\right), \tag{22}$$

где v – коэффициент, обратный характерному времени запаздывания; g_E – доля ВРП, идущая в образование; c_E, d – коэффициенты; ν = 0,2 ± 0,1, g_E = 0,045 ± 0,0, c_E = 10,0 ± 0,1, d = 0,394 ± 0,015.

Природно-промышленный комплекс. Предлагается воздействовать на региональную социально-экономическую систему путем распределения капиталовложений в предположении, что:

– разработаны и внедрены в промышленность технологии утилизации и восстановления ресурсов;

– создана промышленная отрасль по искусственной очистке загрязнения;

– возможно изменять инвестиции в сельскохозяйственные фонды.

Тогда можно направлять капитал во вновь созданные отрасли и на изменение доли фондов в промышленность региона:

$$\begin{aligned}
\frac{dX}{dt} &= (1 + U_X)X_+ - \frac{X}{T_X}, \\
\frac{dZ}{dt} &= Z_+ - \frac{Z}{T_z} - \frac{K}{C_z}U_z, \\
\frac{dR}{dt} &= -R_- + \frac{K}{C_R}U_R,
\end{aligned} \tag{23}$$

где X – доля капитала в промышленном комплексе; T_X – время выбытия доли промышленных фондов; Z – загрязнение окружающей среды; $T_Z = T_Z(Z)$ – характерное время естественного разложения загрязнения; U_X – управляющее воздействие на инвестиции в промышленность (горно-металлургический комплекс); U_Z – доля капитала K, направленного на борьбу с загрязнениями окружающей среды; U_R – доля капитала K, идущая на восстановление ресурсов; C_R – стоимость восстановления единицы ресурса; C_Z – стоимость очистки единицы загрязнения функции от t: $U_X(t)$, $U_R(t)$ и $U_Z(t)$; $X_+ = X_+(F,Q)$ – прирост доли промышленных фондов, F – уровень питания, Q – материальный уровень жизни; $Z_+ = Z_+(N,K)$ – скорость генерации загрязнения; $R_- = R_-(N,Q)$ – скорость потребления ресурсов.

Поскольку U_R, U_Z по своему смыслу аналогичны X, считалось, что для них справедливы уравнения, отражающие тот факт, что фонды не создаются и не исчезают мгновенно:

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{G_R - U_R}{T_{UR}},$$

$$\frac{dU_z}{dt} = \frac{G_Z - U_Z}{T_{UZ}}, \tag{24}$$

$$Z \le Z_{\max},\ R \ge R_{\min},\ F \ge F_{\min},\ Q \ge Q_{\min},$$

где G_R, G_Z – инвестиции в соответствующие отрасли индустрии по восстановлению ресурсов и очистке загрязнений; T_{UR}, T_{UZ} – время выбытия части фондов в данных отраслях; $Z_{\max}$ – максимальный допустимый уровень загрязнений; $R_{\min}$, $Q_{\min}$, $F_{\min}$ – минимально допустимые значения запасов ресурсов, материального уровня жизни и уровня питания соответственно.

Применение системно-динамической модели

На основе модельных уравнений (13)–(24) и доступной статистической отчетности в приложении к задачам информационной поддержки управления региональной безопасностью АЗ РФ был составлен прогноз показателей безопасности социально-экономического развития Мурманской области до 2020 г.

Для прогноза показателей региональной безопасности использовались экспертные оценки и открытые статистические данные за период 2008–2014 гг., представленные на официальном сайте Федеральной службы государственной статистики по Мурманской области в сети Интернет. Исследование различных сценариев развития региона проводилось на модели с 2008 по 2020 г.

Сценариями развития называют варианты развития субъекта РФ, которые зависят от сочетания внешних факторов, действующих на субъект РФ. Под внешними факторами развития понимаются не зависящие от действия органов государственной власти субъекта РФ и коммерческих организаций условия, оказывающие существенное влияние на развитие субъекта РФ. Внутренние факторы – ресурсы (материальные и нематериальные активы субъекта РФ) и потенциал, на базе которых субъект РФ основывает свою стратегию и реагирует на изменения внешних факторов.

Сценарий должен задавать приоритетные направления развития субъекта РФ, которые определяют первоочередную деятельность органов государственной власти субъекта РФ, включающую финансовое обеспечение реализации сценария и взаимодействие органов исполнительной власти субъекта РФ с федеральными и муниципальными органами управления.

При разработке сценариев применяется практика программно-целевого планирования, обеспечивающая комплексный учет и взаимоувязку внешних и внутренних факторов, влияющих на развитие социально-экономических систем. Применение данного подхода согласно работе [23] позволило согласовать направления развития Мурманской области с государственной политикой РФ в Арктике и направлениями развития арктических регионов, а также определить приоритетные направления действий региональных органов власти.

В рамках реализации Стратегии развития АЗ РФ и обеспечения национальной безопасности до 2020 г. [20] на территории Мурманской области с помощью модели проанализированы три сценария социально-экономического развития Мурманской области – инерционный, энерго-сырьевой и инновационный, учитывающие наиболее вероятное сочетание внешних и внутренних факторов, влияющих на безопасность региона, и определяющих следующие условия [24]:

1) «Инерционный сценарий» – в целом сохраняется традиционная структура экономики и промышленности (горнопромышленный, рыбопромышленный, транспортный комплексы), в отраслях – низкий уровень технологических изменений. Темпы роста ВРП ниже среднероссийских: 1–2 % в год и не более 50 % в прогнозируемом периоде;

2) «Энергосырьевой сценарий» – активно формируется нефтегазовый сектор промышленности и необходимая инфраструктура, однако Мурманская область остается транзитным регионом, перерабатывающие мощности не создаются. Темпы роста ВРП соответствуют среднероссийским, общий рост в прогнозируемом периоде – в 2–2,5 раза;

3) «Инновационный сценарий» – реализуются меры по диверсификации экономики, созданию производственных кластеров, более полному использованию конкурентных преимуществ области и ее инновационного потенциала. Нефтегазовый сектор формирует перерабатывающие предприятия в регионе и инфраструктуру высокого уровня. В традиционных отраслях осуществляются инновационные преобразования. Рост ВРП в 3–3,5 раза и производительности труда не менее чем в 3 раза, что превышает среднероссийские показатели.

Диаграммы причинно-следственных взаимосвязей внутренних и внешних факторов, исследуемых на модели, приведены на рис. 4, 5.

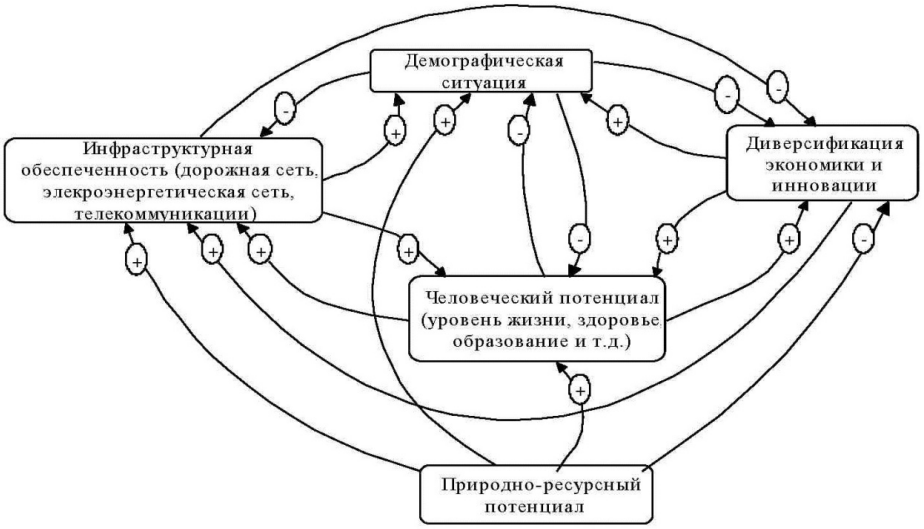

Рис. 4. Взаимосвязь внутренних факторов

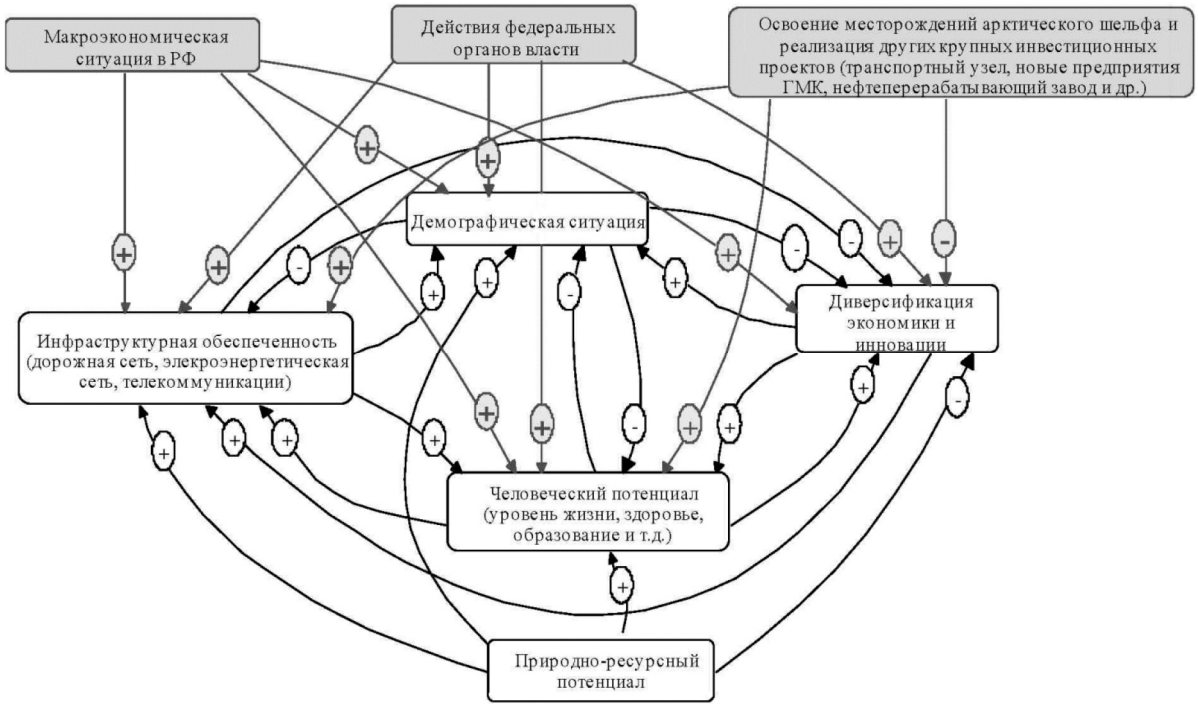

Рис. 5. Влияние внешних факторов

В качестве исходных данных использованы данные Федеральной службы государственной статистики по Мурманской области за 2008 и 2013 гг. (в качестве контрольной точки для тестирования модели). Пятилетний период (2008–2013 гг.) использовался для тестирования модели и оценки ее точности.

Заключение

На основе моделирования для базовых компонентов региональных социально-экономических систем АЗ РФ на примере Мурманской области были выявлены следующие закономерности развития.

Валовой региональный продукт: исследовано два варианта прогноза ВРП региона – инерционный и инновационный. При инновационном развитии ВРП растет значительно быстрее.

Население: падение коэффициента рождаемости ниже значения 2,15 ведет к отсутствию простого замещения поколений; доля лиц старше 65 лет к общей численности населения более 7 % ведет к «старению населения». Прогноз возрастной структуры населения на 3–10 лет вперед обеспечивает возможность определения численности населения пенсионного возраста, что позволяет скорректировать бюджетную стратегию региона.

Производство: уровень падения промышленного производства более 30 % ведет к разрушению промышленного потенциала; доля экспорта продукции обрабатывающей промышленности менее 45 % ведет к колониально-сырьевой структуре экономики; доля импортных продуктов питания более 30 % ведет к стратегической зависимости от импорта.

Финансы: превышение дефицита бюджета на 30 % ведет к нарушению финансовой устойчивости региона; отношение дефицита бюджета региона к общим доходам бюджета региона без учета финансовой помощи из вышестоящего бюджета более 5 % ведет к заметному повышению уровня кредитных рисков; доля федеральной финансовой помощи не должна превышать 20 %. Кроме того, зная динамику и прогнозируя величину доходов и расходов населения региона, можно оценивать покупательную способность, розничный товарооборот, затраты населения на услуги и другие показатели.

Рынок труда: уровень безработицы, превышающий 10 %, ведет к социальной дестабилизации; превышение доли населения, живущего за «чертой бедности», на 10 % ведет к «люмпенизации» населения; соотношение минимальной и средней заработной платы более 1/3 ведет к деквалификации рабочей силы.

Окружающая среда: в модели имитируются процессы загрязнения воздуха и загрязнения воды (рек, озер, которые являются источником питьевой воды). Для исследования динамики взаимного влияния промышленных, экономических и экологических параметров вводятся два понятия: реальное загрязнение окружающей среды; воспринимаемое человеком загрязнение. Второе понятие введено вследствие того, что практически любое загрязнение окружающей среды, в которой находится человек, не отражается на состоянии его здоровья немедленно. В качестве источников загрязнения воздуха приняты: действующий транспорт; промышленные предприятия; предприятия топливно-энергетического комплекса и прочие объекты (например, хранилище отходов обогатительной фабрики – рассматривается процесс пыления поверхности отходов). Основными источниками загрязнения воды являются промышленные предприятия (сброс недостаточно очищенных вод промышленного использования). Каждый из этих источников имеет свои характеристики по интенсивности действия в различное время года и по влиянию на здоровье человека.

Помимо показателей экономической и экологической безопасности, модель дает возможность прогнозировать показатели социальной и кадровой безопасности: численности занятых, безработных, демографическую ситуацию и другие.

Результаты моделирования подтверждают существующие на сегодня тенденции и закономерности развития регионов АЗ РФ и не расходятся с результатами исследований ведущих научных школ, занимающихся проблемами Арктики. При этом созданная модель позволяет количественно оценить динамику показателей безопасности регионов АЗ РФ и на основе прогноза сформировать и проанализировать приемлемые с точки зрения реализуемой стратегии социально-экономического развития АЗ РФ сценарии рискоустойчивого развития арктических регионов. Вместе с тем разработанная модель может найти приложение в решении новых задач, например, прогнозирования кадровых потребностей экономики арктических регионов, анализа миграционных процессов, социальной мобильности и демографической ситуации в АЗ РФ. Так, к примеру, с помощью модели установлен демографический порог, при котором инновационный сценарий развития не будет эффективно работать в Мурманской области при сложившейся ситуации в АЗ РФ и влиянии внешних факторов.

Библиографический список

1. *Шульц, В. Л.* Управление региональной безопасностью на основе сценарного подхода / В. Л. Шульц, В. В. Кульба, А. Б. Шелков, И. В. Чернов. – Москва : ИПУ РАН, 2014. – 163 с.
2. *Маслобоев, А. В.* Информационное измерение региональной безопасности в Арктике / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов. – Апатиты : КНЦ РАН, 2016. – 222 с.
3. *Карпов, Ю. Г.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Г. Карпов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.
4. *Путилов, В. А.* Системная динамика регионального развития / В. А. Путилов, А. В. Горохов. – Мурманск : НИЦ «Пазори», 2002. – 306 с.
5. *Кузьмин, И. А.* Распределенная обработка информации в научных исследованиях / И. А. Кузьмин, В. А. Путилов, В. В. Фильчаков. – Ленинград : Наука, 1991. – 304 с.

6. *Путилов, В. А.* Технология автоматизированной разработки динамических моделей для поддержки принятия решений / В. А. Путилов, А. В. Горохов, А. Г. Олейник // Информационные ресурсы России. – 2004. – № 1. – С. 30–33.
7. *Форрестер, Дж.* Мировая динамика / Дж. Форрестер. – Москва : Наука, 1978. – 165 с.
8. *Медоуз, Д. Х.* Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Х. Медоуз, Й. Рандерс, Д. Л. Медоуз. – Москва : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 342 с.
9. *Сидоренко, В. Н.* Системно-динамическое моделирование в среде Powersim: справочник по интерфейсу и функциям / В. Н. Сидоренко. – Москва : МАКС-ПРЕСС, 2001. – 159 с.
10. *Маслобоев, А. В.* Информационная технология дистанционного формирования и управления моделями системной динамики / А. В. Маслобоев, А. Г. Олейник, М. Г. Шишаев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 748–755.
11. *Forrester, J. W.* System dynamics – a personal view of the first fifty years / J. W. Forrester // System Dynamics Review. – 2007. – Vol. 23, iss. 2-3. – P. 345–358.
12. *Forrester, J. W.* System dynamics – the next fifty years / J. W. Forrester // System Dynamics Review. – 2007. – Vol. 23, iss. 2-3. – P. 359–370.
13. Когнитивные центры как информационные системы для стратегического прогнозирования / И. В. Десятов, Г. Г. Малинецкий, С. К. Маненков, Н. А. Митин, П. Л. Отоцкий, В. Н. Ткачев, В. В. Шишов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2011. – № 1. – С. 65–81.
14. *Маслобоев, А. В.* Состав и структура системно-динамической модели глобальной безопасности арктического региона / А. В. Маслобоев // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2013. – № 4 (34). – С. 43–53.
15. *Махов, С. А.* Долгосрочные тенденции и прогнозы с позиций новой модели мировой динамики / С. А. Махов // Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики. – Москва : ЛКИ, 2010. – С. 262–276.
16. *Антипов, В. И.* Расчет социально-экономических показателей регионов России в период мирового кризиса. Подготовка кадров, методическое, алгоритмическое и программно-технологическое обеспечение / В. И. Антипов, Г. Г. Малинецкий, П. Л. Отоцкий, В. В. Шишов // Препринт Института прикладной математики РАН № 11 за 2009 год. – Москва : ИПМ РАН, 2009. – 48 с.
17. *Махов, С. А.* Долгосрочная макромодель мировой динамики на основе эмпирических данных / С. А. Махов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – Т. 5, № 5. – С. 883–891.
18. *Hawksworth, J.* The World in 2050: How big will the major emerging economics get and how can the OECD compete? / J. Hawksworth // PricewatershouseCoopers LLP. March 2006. – URL: http://www.tepav.org.tr/upload/files/haber/1256628344r1748.The_World_in_2050.pdf
19. *Столерю, Л.* Равновесие и экономический рост (принципы макроэкономического анализа) / Л. Столерю. – Москва : Статистика, 1974. – 472 с.
20. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. – URL: http://government.ru/media/files/2RpSA3sctElhAGn4RN9dHrtzk0A3wZm8.pdf
21. *Махов, С. А.* Пятисекторная долгосрочная макромодель мировой динамики на основе эмпирических данных / С. А. Махов // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2011. – № 72. – 24 с.
22. *Махов, С. А.* Долгосрочная эмпирическая макромодель мировой динамики / С. А. Махов // Современная наука. – 2013. – № 1. – С. 33–40.
23. *Агарков, С. А.* Стратегическая ориентация промышленного сектора экономики региона на достижение оптимальных экономических результатов: принципиальная схема / С. А. Агарков, Е. В. Никора // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2014. – Т. 17, № 4. – С. 631–636.
24. *Селин, В. С.* Роль прогнозирования в формировании стратегии регионального развития / В. С. Селин // Проблемы прогнозирования. – 2009. – № 6. – С. 95–104.

References

1. Shul'ts V. L., Kul'ba V. V., Shelkov A. B., Chernov I. V. *Upravlenie regional'noy bezopasnost'yu na osnove stsenarnogo podkhoda* [Regional security management based on a scenario approach]. Moscow: IPU RAN, 2014, 163 p. [In Russian]
2. Masloboev A. V., Putilov V. A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike* [Information dimension of regional security in the Arctic]. Apatity: KNTs RAN, 2016, 222 p. [In Russian]
3. Karpov Yu. G. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5* [Simulation of systems. Introduction to modeling with AnyLogic 5]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005, 400 p. [In Russian]
4. Putilov V. A., Gorokhov A. V. *Sistemnaya dinamika regional'nogo razvitiya* [Systemic dynamics of regional development]. Murmansk: NITs «Pazori», 2002, 306 p. [In Russian]
5. Kuz'min I. A., Putilov V. A., Fil'chakov V. V. *Raspredelennaya obrabotka informatsii v nauchnykh issledovaniyakh* [Distributed information processing in scientific research]. Leningrad: Nauka, 1991, 304 p. [In Russian]
6. Putilov V. A., Gorokhov A. V., Oleynik A. G. *Informatsionnye resursy Rossii* [Information resources of Russia]. 2004, no. 1, pp. 30–33. [In Russian]

7. Forrester Dzh. *Mirovaya dinamika* [World dynamics]. Moscow: Nauka, 1978, 165 p. [In Russian]
8. Medouz D. Kh., Randers Y., Medouz D. L. *Predely rosta. 30 let spustya* [The limits to growth. 30 years later]. Moscow: IKTs «Akademkniga», 2007, 342 p. [In Russian]
9. Sidorenko V. N. *Sistemno-dinamicheskoe modelirovanie v srede Powersim: spravochnik po interfeysu i funktsiyam* [System-dynamic modeling in the Powersim environment: a guide to the interface and functions]. Moscow: MAKS-PRESS, 2001, 159 p. [In Russian]
10. Masloboev A. V., Oleynik A. G., Shishaev M. G. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical Bulletin of information technologies, mechanics and optics]. 2015, vol. 15, no. 4, pp. 748–755. [In Russian]
11. Forrester J. W. *System Dynamics Review*. 2007, vol. 23, iss. 2-3, pp. 345–358.
12. Forrester J. W. *System Dynamics Review*. 2007, vol. 23, iss. 2-3, pp. 359–370.
13. Desyatov I. V., Malinetskiy G. G., Manenkov S. K., Mitin N. A., Ototskiy P. L., Tkachev V. N., Shishov V. V. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technologies and computer systems]. 2011, no. 1, pp. 65–81. [In Russian]
14. Masloboev A. V. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya* [List of higher educational institutions of the black earth region]. 2013, no. 4 (34), pp. 43–53. [In Russian]
15. Makhov S. A. *Prognoz i modelirovanie krizisov i mirovoy dinamiki* [Forecasting and modeling of crises and global dynamics]. Moscow: LKI, 2010, pp. 262–276. [In Russian]
16. Antipov V. I., Malinetskiy G. G., Ototskiy P. L., Shishov V. V. *Preprint Instituta prikladnoy matematiki RAN № 11 za 2009 god* [Preprint Of the Institute of applied mathematics of the Russian Academy of Sciences No. 11 for 2009]. Moscow: IPM RAN, 2009, 48 p. [In Russian]
17. Makhov S. A. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and modeling]. 2013, vol. 5, no. 5, pp. 883–891. [In Russian]
18. Hawksworth J. *PricewatershouseCoopers LLP*. March 2006. Available at: http://www.tepav.org.tr/upload/files/haber/1256628344r1748.The_World_in_2050.pdf
19. Stoleryu L. *Ravnovesie i ekonomicheskiy rost (printsipy makroekonomicheskogo analiza)* [Equilibrium and economic growth (principles of macroeconomic analysis)]. Moscow: Statistika, 1974, 472 p. [In Russian]
20. *Strategiya razvitiya Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii i obespecheniya natsional'noy bezopasnosti na period do 2020 goda*. Available at: http://government.ru/media/files/2RpSA3sctElhAGn4RN9dHrtzk0A3wZm8.pdf [In Russian]
21. Makhov S. A. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha* [Preprints of IPM im. M. V. Keldysh]. 2011, no. 72, 24 p. [In Russian]
22. Makhov S. A. *Sovremennaya nauka* [Modern science]. 2013, no. 1, pp. 33–40. [In Russian]
23. Agarkov S. A., Nikora E. V. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Murmansk State Technical University]. 2014, vol. 17, no. 4, pp. 631–636. [In Russian]
24. Selin V. S. *Problemy prognozirovaniya* [Problems of forecasting]. 2009, no. 6, pp. 95–104. [In Russian]

Маслобоев Андрей Владимирович
доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН
(184209, Россия, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24А)
Email: masloboev@iimm.ru

Путилов Владимир Александрович
доктор технических наук, профессор,
научный руководитель организации,
заслуженный деятель науки РФ,
Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН
(184209, Россия, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24А)
E-mail: putilov@iimm.ru

Masloboev Andrey Vladimirovich
doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher,
Institute of Informatics and mathematical modelling of technological processes of the Kola Science Centre RAS
(184209, 24A Fersmana street, Apatite, Murmansk region, Russia)

Putilov Vladimir Aleksandrovich
doctor of technical sciences, professor,
scientific supervisor,
honoured science worker of RF,
Institute of Informatics and mathematical modelling of technological processes of the Kola Science Centre RAS
(184209, 24A Fersmana street, Apatite, Murmansk region, Russia)

Образец цитирования:

Маслобоев, А. В. Комплексная системно-динамическая модель для управления региональной безопасностью / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 26–40. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-4-3.