

*А. Ф. Резчиков, чл.-кор. РАН, докт. техн. наук, проф., ФГБУН «ИПТМУ РАН»,
г. Саратов, rezchikov1939@mail.ru*

*В. А. Кушников, докт. техн. наук, проф., ФГБУН «ИПТМУ РАН»,
г. Саратов, kushnikoff@yandex.ru*

*Н. В. Яндыбаева, канд. техн. наук, Балаковский филиал ФГБОУ ВО «РАНХиГС»,
г. Балаково, nat07@inbox.ru*

*В. А. Иващенко, докт. техн. наук, проф., ФГБУН «ИПТМУ РАН»,
г. Саратов, iptmuran@san.ru*

*А. С. Богомолов, канд. физ.-мат. наук, доцент, ФГБУН «ИПТМУ РАН»,
г. Саратов, alexbogomolov@yandex.ru*

*Л. Ю. Филимонюк, канд. техн. наук, ФГБУН «ИПТМУ РАН»,
г. Саратов, filimonyukleonid@mail.ru*

Модель для оценки состояния национальной безопасности России на основе теории системной динамики

В статье представлено описание математической модели, разработанной на основе модели системной динамики. Модель предназначена для прогнозирования основных характеристик национальной безопасности России. Приведен пример практической реализации разработанного математического обеспечения. Проанализировано моделирование хаотических явлений в экономике России в 1994 г.

Ключевые слова: системная динамика, математическая модель, показатели национальной безопасности, дифференциальные уравнения, теория хаоса.

Введение

Основной системы национальной безопасности любой страны является совокупность концептуальных политических нормативно-правовых документов, в которых декларируются национальные ценности государства, его роль и место в мире, способы противостояния внешним и внутренним угрозам. В США таким документом является «Стратегия национальной безопасности», в Италии — «Стратегическая концепция национальной обороны», в Канаде — «Политика национальной безопасности». В Великобритании, Германии, Китае, Японии и многих других странах концептуальной

основой национальной безопасности являются «Белые книги».

В феврале 2015 г. в США вышла новая «Стратегия национальной безопасности», отличительной особенностью которой являются не всегда четкие, эмоциональные формулировки целей и задач государства. США ставят перед собой недостижимые цели, такие как демократизация Ближнего Востока, уничтожение терроризма и пр. «Стратегия национальной безопасности» ФРГ декларирует сотрудничество с другими странами по вопросам международной и национальной безопасности, использование комплексного подхода к обеспечению всех аспектов безопасности (внутренних и внешних, по-

литических, экономических, экологических, социальных и др.). В «Стратегии национальной безопасности» Китая сформулированы текущие задачи китайской армии: формирование и укрепление вооруженных сил, защита национального суверенитета, безопасности и территориальной целостности страны, поддержка национальной экономики и социального развития, защита мира на планете и региональной стабильности.

31 декабря 2015 г. Президентом РФ был подписан Указ № 683 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» [1], согласно которому к основным угрозам безопасности России относятся: низкая конкурентоспособность и сырьевая зависимость экономики, инспирирование «цветных революций», практика свержения легитимных политических режимов и др.

Целевыми индикаторами данной Стратегии являются:

- удовлетворенность граждан степенью защищенности своих конституционных прав и свобод, личных и имущественных интересов, в том числе от преступных посягательств;
- доля современных образцов вооружения, военной и специальной техники в Вооруженных силах РФ, других войсках, воинских формированиях и органах;
- ожидаемая продолжительность жизни;
- валовой внутренний продукт на душу населения;
- децильный коэффициент;
- уровень инфляции;
- уровень безработицы;
- доля расходов в валовом внутреннем продукте на развитие науки, технологий и образования;
- доля расходов в валовом внутреннем продукте на культуру;
- доля территории Российской Федерации, не соответствующая экологическим нормативам.

Проблемы перехода страны к устойчивому развитию проанализированы в тру-

дах В. М. Матросова, В. А. Коптюга [2], Д. М. Гвишиани, А. А. Акаева, Г. Г. Малинецкого, В. А. Егорова, В. А. Садовниченко. Учеными были выявлены и систематизированы существующие угрозы безопасности страны, а также разработаны математические модели и методы, позволяющие построить прогнозные сценарии социально-экономического развития России. В моделях использовались сотни переменных, характеризующих социальные, экономические, экологические и политические аспекты жизни страны. Данные модели отличались большой размерностью, сложными алгоритмами расчета и не всегда позволяли учесть сложные причинно-следственные связи в системе.

В связи с этим актуальна разработка новых математических моделей для осуществления имитационного моделирования и прогнозирования социально-экономических показателей национальной безопасности страны.

Таким образом, постановка задачи имеет следующий вид: необходимо разработать математические модели и методы для проведения имитационного моделирования и прогнозирования социально-экономических показателей национальной безопасности.

Математическая модель

Для решения поставленной задачи был разработан комплекс моделей, состоящий из модели системной динамики [3] и регрессионных моделей. Модели системной динамики широко используются для исследования сложных систем с нелинейными обратными связями [4–9]. В модели системной динамики используются дифференциальные уравнения, в которых динамические процессы представлены в пространстве состояний:

$$X' = f(x, u, t), \quad (1)$$

где $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ — вектор состояний; x_1, \dots, x_m — переменные состояния; $u = (u_1, \dots, u_p)^T$ — вектор входов; t — символ времени.

Дифференциальные уравнения включают также наряду с уравнениями состояний (1) еще и уравнение вида:

$$y = H(x, u), \quad (2)$$

где переменная $y = (y_1, \dots, y_q)^T$ — вектор выходов моделируемых процессов. В процессе разработки дифференциальных моделей производится выбор переменных состояния, а также формируются связи между этими переменными в виде функций правых частей уравнения состояния.

В качестве моделируемых переменных в модели системной динамики приняты основные показатели национальной безопасности: X_1 — удовлетворенность граждан степенью защищенности своих конституционных прав и свобод; X_2 — доля современных образцов вооружения, военной и специальной техники в Вооруженных силах РФ; X_3 — ожидаемая продолжительность жизни; X_4 — валовой внутренний продукт на душу населения; X_5 — децильный коэффициент; X_6 — уровень

инфляции; X_7 — уровень безработицы; X_8 — доля расходов в валовом внутреннем продукте на развитие науки, технологий и образования; X_9 — доля расходов в валовом внутреннем продукте на культуру; X_{10} — доля территории Российской Федерации, не соответствующая экологическим нормативам.

Причинно-следственные связи между моделируемыми переменными X_1 — X_{10} представлены с помощью орграфа (рис. 1).

Рассмотрим моделируемую переменную X_7 — уровень безработицы.

Дифференциальное уравнение, учитывающее положительные и отрицательные темпы, для X_7 будет записано следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dX_7(t)}{dt} &= X_7(t) \left(\left(\frac{I(t) + Sc_{-}(t) + D(t)}{X_7(t)} \right) \cdot f_{15}(X_6) - \left(\frac{W(t) + T(t) + V(t)}{X_7(t)} \right) \cdot f_{27}(X_5) \right) = \\ &= (I(t) + Sc_{-}(t) + D(t)) \cdot f_{15}(X_6) - \\ &- (W(t) + T(t) + V(t)) \cdot f_{27}(X_5), \end{aligned}$$

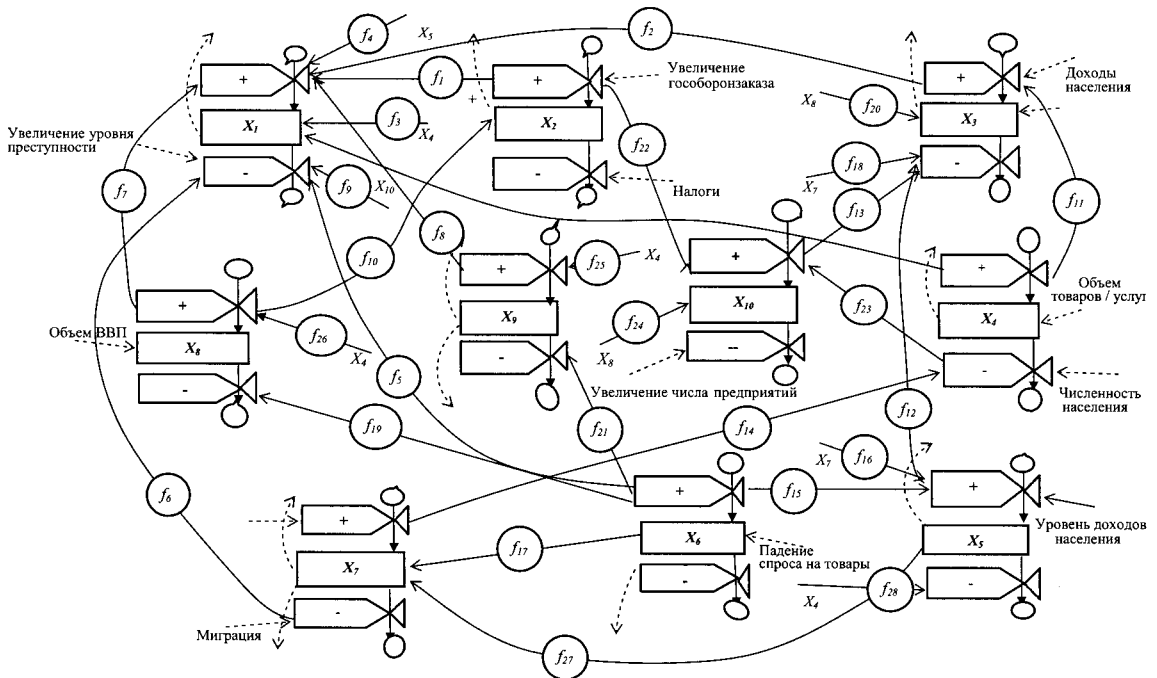


Рис. 1. Орграф причинно-следственных связей между моделируемыми переменными X_1 — X_{10}
 Fig. 1. Oriented graph of causal relationships between the simulated variables X_1 — X_{10}

где $X_7(t)$ — текущий уровень безработицы, $I(t)$ — инфляция, $Sc_-(t)$ — доходы населения $V(t)$ — ВВП, $D(t)$ — демографические факторы (численность экономически активного населения), $W(t)$ — предложение труда, $T(t)$ — налоги.

В уравнении используются также функциональные зависимости: $f_{15}(X_6)$ — функциональная зависимость уровня безработицы от уровня инфляции, $f_{27}(X_5)$ — функциональная зависимость уровня безработицы от децильного коэффициента. Функциональные зависимости можно задать графически либо с помощью полиномов (3).

$$\begin{aligned} f_{15}(X_6) &= -0,42 \cdot (X_6)^3 + 0,86 \cdot (X_6)^2 + \\ &+ 0,59 \cdot (X_6) - 0,058; \\ f_{27}(X_5) &= 0,73 \cdot (X_5)^3 - 1,3 \cdot (X_5)^2 + \\ &+ 1,3 \cdot (X_5) - 0,17. \end{aligned} \quad (3)$$

Разработанная математическая модель (4) представляет собой систему дифференци-

альных уравнений, описывающих состояние анализируемой системы.

В уравнении (4) приняты следующие обозначения: $X_1(t)$ — текущий уровень удовлетворенности граждан степенью защищенности своих конституционных прав и свобод, личных и имущественных интересов, в том числе от преступных посягательств; $X_2(t)$ — текущая доля современных образцов вооружения, военной и специальной техники в Вооруженных силах РФ, других войсках, воинских формированиях и органах; $X_3(t)$ — текущая ожидаемая продолжительность жизни; $X_4(t)$ — текущий уровень валового внутреннего продукта на душу населения; $X_5(t)$ — текущий уровень децильного коэффициента; $X_6(t)$ — текущий уровень инфляции; $X_8(t)$ — текущий уровень доли расходов в ВВП на развитие науки, технологий и образования; $X_9(t)$ — текущий уровень доли расходов в ВВП на культуру; $X_{10}(t)$ — текущий уровень доли территорий РФ, не соот-

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dX_1(t)}{dt} &= (P_l(t) + P_{se}(t)) \cdot f_1(X_2) \cdot f_2(X_3) \cdot f_3(X_4) \cdot f_7(X_8) \cdot f_8(X_9) - \\ &- Sh_{pr}(t) \cdot f_9(X_{10}) \cdot f_4(X_5) \cdot f_5(X_6) \cdot f_6(X_7) \\ \frac{dX_2(t)}{dt} &= (V(t) + SO(t)) \cdot f_{10}(X_8) - I(t) \\ \frac{dX_3(t)}{dt} &= (E(t) + Zd(t) + X_8(t)) \cdot f_{11}(X_4) \cdot f_{20}(X_8) - \\ &- (BN(t) + I(t) + U(t)) \cdot f_{12}(X_5) \cdot f_{13}(X_{10}) \cdot f_{18}(X_7) \\ \frac{dX_4(t)}{dt} &= \left(\frac{V(t)}{P(t)} + D(t) \right) - (I(t) + U(t)) \cdot f_{14}(X_7) \\ \frac{dX_5(t)}{dt} &= (P(t) + Sc_-(t) + U(t)) \cdot f_{16}(X_7) - I(t) \cdot f_{15}(X_6) \\ \frac{dX_6(t)}{dt} &= (De(t) + D(t) + E(t)) - (V(t) + W(t)) \\ \frac{dX_7(t)}{dt} &= (I(t) + Sc_-(t) + D(t)) \cdot f_{15}(X_6) - (W(t) + T(t) + V(t)) \cdot f_{27}(X_5) \\ \frac{dX_8(t)}{dt} &= (V(t) + H(t) + Tch(t) + Sr(t)) \cdot f_{26}(X_4) - (I(t) + D(t) + M(t) + P(t) + Sc_-(t)) \cdot f_{19}(X_6) \\ \frac{dX_9(t)}{dt} &= (V(t) + D(t) + Sc_-(t)) \cdot f_{25}(X_4) - (T(t) + P(t)) \cdot f_{21}(X_6) \\ \frac{dX_{10}(t)}{dt} &= (PZ(t) + VZ(t)) \cdot f_{22}(X_2) - Ze(t) \cdot f_{23}(X_4) \cdot f_{24}(X_8) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

ветствующих экологическим нормативам; $Pl(t)$ — степень реализованности личных прав граждан (права на жизнь, права на свободу и личную неприкосновенность, права на свободу мысли и слова, права на свободу от вмешательства в личную жизнь, права на свободу передвижения, права на родной язык, права на религиозные свободы и свободу совести); $P_{se}(t)$ — степень реализованности социально-экономических прав (права на жилище, права на защиту прав и свобод, права на охрану здоровья, права на труд, отдых, социальное обеспечение, права избирать и быть избранным, права частной собственности и свободы предпринимательства, права на участие в общественной, политической жизни); $Sh_{pr}(t)$ — число зарегистрированных преступлений; $P(t)$ — численность населения; $SO(t)$ — объем гособоронзаказа; $E(t)$ — средняя заработная плата; $Zd(t)$ — доля расходов ВВП на здравоохранение; $BN(t)$ — заболеваемость населения; $U(t)$ — уровень безработицы; $De(t)$ — денежная эмиссия; $H(t)$ — число учебных заведений; $Tch(t)$ — численность профессорско-преподавательского состава с учеными степенями и званиями; $Sr(t)$ — среднегодовой объем финансирования научных исследований; $M(t)$ — миграция; $PZ(t)$ — число промышленных предприятий; $VZ(t)$ — объем выбросов загрязняющих веществ в воду, почву, воздух; $Ze(t)$ — затраты на охрану окружающей среды.

Функциональные зависимости $f_1(X_2) \dots f_{26}(X_4)$ в модели задаются аналогично (3).

Для проверки адекватности разработанной модели системной динамики используются уравнения регрессии. Уравнения регрессии, построенные по статистическим данным [10], имеют вид (5).

Проверка статистической значимости и адекватности уравнений регрессии осуществляется с помощью расчета критериев Фишера и Стьюдента. Этапы проверки статистической значимости уравнений регрессии описаны в [11].

Экспериментальная часть

Статистическая информация, приведенная в расчетах, представляет собой результаты статистической обработки данных Госкомстата, министерств, ведомств, находящихся в открытом доступе в сети Интернет за период 2000–2015 гг. Вычислительные эксперименты с разработанными математическими моделями проводились в программной среде *Matlab*. В качестве начальных условий в расчетах применялись нормированные значения социально-экономических показателей национальной безопасности в 2015 г.:

$$X_{0i} = [1 \ 3,13 \ 1,087 \ 14,18 \ 1,19 \ 0,64 \ 0,5 \ 1,45 \ 1,28 \ 1].$$

Динамика моделируемых переменных $X_1 \dots X_{10}$ была проанализирована на интервале [0;7] лет (рис. 2).

На данном временном интервале можно отметить незначительный (в 1,5 раза) рост

$$\begin{aligned} X_1(t) &= -0,0002 \cdot t^4 + 0,0064 \cdot t^3 - 0,0532 \cdot t^2 + 0,1067 \cdot t + 0,8504; \\ X_2(t) &= 0,0002 \cdot t^4 - 0,0014 \cdot t^3 - 0,0335 \cdot t^2 + 0,3122 \cdot t + 0,7413; \\ X_3(t) &= 0,000004 \cdot t^4 - 0,0002 \cdot t^3 + 0,004 \cdot t^2 - 0,0181 \cdot t + 1,0167; \\ X_4(t) &= 0,0012 \cdot t^4 - 0,0375 \cdot t^3 + 0,4157 \cdot t^2 - 1,2036 \cdot t + 2,0468; \\ X_5(t) &= 0,00006 \cdot t^4 - 0,0021 \cdot t^3 + 0,0228 \cdot t^2 - 0,0619 \cdot t + 1,0438; \\ X_6(t) &= 0,0002 \cdot t^4 - 0,0071 \cdot t^3 + 0,0827 \cdot t^2 - 0,426 \cdot t + 1,4163; \\ X_7(t) &= 0,00008 \cdot t^4 - 0,031 \cdot t^3 + 0,0413 \cdot t^2 - 0,2365 \cdot t + 1,1936; \\ X_8(t) &= -0,00006 \cdot t^4 + 0,0022 \cdot t^3 - 0,0269 \cdot t^2 + 0,1593 \cdot t + 0,8834; \\ X_9(t) &= 0,0002 \cdot t^4 - 0,0057 \cdot t^3 + 0,0581 \cdot t^2 - 0,1208 \cdot t + 1,0525; \\ X_{10}(t) &= 0,00003 \cdot t^5 - 0,0013 \cdot t^4 + 0,0204 \cdot t^3 - 0,1391 \cdot t^2 + 0,3898 \cdot t + 0,7213; \end{aligned} \tag{5}$$

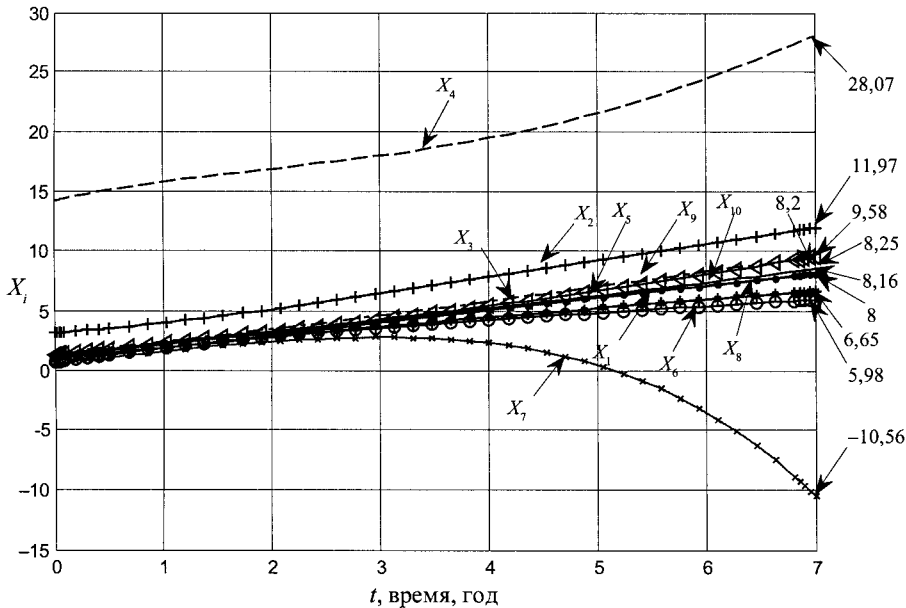


Рис. 2. График изменения моделируемых переменных $X_1—X_{10}$ на интервале [0;7] лет
 Fig. 2. Graph changes of simulated variables $X_1—X_{10}$ on the interval [0, 7] years

значений следующих переменных: X_1 — удовлетворенность граждан степенью защищенности своих конституционных прав и свобод; X_3 — ожидаемая продолжительность жизни, X_5 — децильный коэффициент, X_6 — уровень инфляции, X_8 — доля расходов в валовом внутреннем продукте на развитие науки, технологий и образования, X_{10} — доля территории Российской Федерации, не соответствующая экологическим нормативам. Вместе с этим значительно увеличивается показатель X_4 — валовой внутренний продукт на душу населения — в 2 раза. Также можно отметить быстрый темп снижения значения показателя X_7 — уровня безработицы — до -10,56.

никающие в системе, чувствительной к начальным условиям или внешним воздействиям [12]. Для этого оценим социально-экономическую и политическую ситуацию в России в период 1994–2000 гг. В таблице 1 приведены показатели национальной безопасности России в данный период.

Функциональные зависимости $f_1(X_2) — f_{26}(X_4)$ в модели (4), учитывающие взаимодействия моделируемых переменных, задаются экспертами. При нормальных условиях, которые при сравнении принимаются за отправную точку, функциональные зависимости не должны изменять базисный темп моделируемой переменной, т. е. они равны 1. Если условия оказываются более благоприятными, чем нормальные, то значение функциональной зависимости должно быть больше 1, если менее — то меньше 1. За нормальные условия в данной модели были приняты условия, существовавшие в России в 2000 г. То есть функциональные зависимости системы имеют значение 1 всегда, когда значения уровней системы совпадают с их значениями в 2000 г. [13].

Моделирование хаотических явлений

Математическая модель (4) позволяет выявлять комбинации факторов в моделируемых переменных $X_1 — X_{10}$, которые могут привести к ситуации неустойчивого развития социально-экономических процессов. Проанализируем хаотические явления, воз-

Таблица 1. Показатели национальной безопасности РФ в 1994 и 2000 гг.**Table 1.** Indicators of Russia's national security in 1994 and 2000

Моделируемая переменная X_i	Значение		
	1994 г.	Ситуация в стране	2000 г.
X_1 — удовлетворенность граждан степенью защищенности своих конституционных прав и свобод, личных и имущественных интересов, в том числе от преступных посягательств, %	12	Недовольство политикой правительства из-за последствий военных действий в Афганистане и Чечне	17
X_2 — доля современных образцов вооружения, военной и специальной техники в Вооруженных силах РФ, других войсках, воинских формированиях и органах, %	5	С 1992 года объем производства в оборонной промышленности сократился в 11 раз, составив в 1997 г. только 8,7% от показателей 1991-го. В странах — членах НАТО затраты на закупки ВВТ составили в 1995 г. 47% от уровня 1990 г., в России же этот показатель составил всего 8% ¹	15
X_3 — ожидаемая продолжительность жизни, лет	64,52	Значительное увеличение смертности в 1990-е гг., а также снижение коэффициента суммарной рождаемости ниже уровня простого воспроизводства населения впервые в российской истории, поэтому потери от сверхсмертности в 1990-е гг. многие сравнивают с потерями во время Великой Отечественной войны	65,3
X_4 — ВВП на душу населения, руб.	7 964	Чрезвычайно низкое качество жизни граждан	49 835
X_5 — децильный коэффициент	15	Доля бедных и очень бедных домашних хозяйств между 1992 и 1995 гг. увеличилась с 33,6 до 45,9%	13,9
X_6 — уровень инфляции, %	214,8	По итогам 1992 г. инфляция составила 2 600%. Черный вторник — обвальное падение рубля по отношению к доллару 11 октября 1994 г. За один день на Московской межбанковской валютной бирже курс доллара вырос с 3 081 до 3 926 руб. за доллар	20,1
X_7 — уровень безработицы, %	9,5	Реструктуризация и диверсификация промышленных предприятий-гигантов привели к увеличению структурной безработицы в стране	10,6
X_8 — доля расходов в ВВП на развитие науки, технологий и образования, %	0,94	Сокращение затрат на НИОКР пришлось преимущественно на 1990–1992 гг. После 1992 года происходило дополнительное уменьшение величины реальных расходов на НИОКР, вплоть до 1995 г.	3,95
X_9 — доля расходов в валовом внутреннем продукте на культуру, %	0,2	На фоне общего демографического спада снизились расходы государства на строительство новых кинотеатров, библиотек и других учреждений культуры	0,39
X_{10} — доля территории Российской Федерации, не соответствующая экологическим нормативам, %	16	2/3 населения проживало в условиях опасного загрязнения воздуха, жители 100 городов дышали воздухом, загрязненным больше 5 ПДК, половина питьевой воды не соответствовала гигиеническим нормативам	14

¹ Сайт Центра анализа и стратегий. URL: <http://http://www.cast.ru/publications/?id=53> — Р. Пухов, К. Макленко. «Оборонка» перед технологическими вызовами XXI века. Дата обращения (20.06.2016).

Допустим, что $f_5(X_6)$ — функциональная зависимость удовлетворенности граждан степенью защищенности своих прав и свобод от уровня инфляции и $f_3(X_4)$ — функциональная зависимость удовлетворенности граждан степенью защищенности своих прав и свобод от ВВП на душу населения приблизительно равны 0, так как значения показателей X_4, X_6 значительно (в 7 и 10 раз, соответственно) отличаются от значений в 2000 г. $f_5(X_6) = f_3(X_4) \equiv 0$.

Тогда для 1994 г. имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dX_1(t)}{dt} &= (P_i(t) + P_{se}(t)) \cdot f_1(X_2) \cdot f_2(X_3) \cdot \\ &\cdot f_3(X_4) \cdot f_7(X_8) \cdot f_8(X_9) - Sh_{pr}(t) \cdot f_9(X_{10}) \cdot \\ &\cdot f_4(X_5) \cdot f_5(X_6) \cdot f_6(X_7) = (P_i(t) + P_{se}(t)) \cdot \\ &\cdot f_1(X_2) \cdot f_2(X_3) \cdot 0 \cdot f_7(X_8) \cdot f_8(X_9) - \\ &- Sh_{pr}(t) \cdot f_9(X_{10}) \cdot f_4(X_5) \cdot 0 \cdot f_6(X_7) \equiv 0. \end{aligned}$$

Аналогично для моделируемой переменной X_3 — ожидаемой продолжительности жизни значения функциональных зависимостей $f_{11}(X_4) = f_{13}(X_{10}) \equiv 0$.

$$\begin{aligned} \frac{dX_3(t)}{dt} &= (E(t) + Zd(t) + X_8(t)) \cdot f_{11}(X_4) \cdot \\ &\cdot f_{20}(X_8) - (BN(t) + I(t) + U(t)) \cdot f_{12}(X_5) \cdot \\ &\cdot f_{13}(X_{10}) \cdot f_{18}(X_7) = (E(t) + Zd(t) + \\ &+ X_8(t)) \cdot 0 \cdot f_{20}(X_8) - (BN(t) + I(t) + U(t)) \cdot \\ &\cdot f_{12}(X_5) \cdot 0 \cdot f_{18}(X_7) \equiv 0. \end{aligned}$$

Также моделируемая переменная $X_8 = 0$ при $f_{26}(X_4) = f_{21}(X_6) \equiv 0$ и $X_9 = 0$ при $f_{25}(X_4) = f_{21}(X_6) \equiv 0$.

Таким образом, от модели (4) переходим к модели (6):

$$\begin{cases} \frac{dX_5(t)}{dt} = (P(t) + Sc_-(t) + U(t)) \cdot \\ \cdot f_{16}(X_7) - I(t) \cdot f_{15}(X_6) \\ \frac{dX_6(t)}{dt} = (De(t) + D(t) + E(t)) - (V(t) + W(t)) \\ \frac{dX_7(t)}{dt} = (I(t) + Sc_-(t) + D(t)) \cdot \\ \cdot f_{15}(X_6) - (W(t) + T(t) + V(t)) \cdot f_{27}(X_5) \end{cases} \quad (6)$$

Примем, что $x = X_5$ — децильный коэффициент, $y = X_6$ — уровень инфляции, $z = X_7$ — уровень безработицы.

Систему уравнений (6) при принятых допущениях можно привести к аттрактору Лоренца:

$$\begin{cases} x' = \sigma(y - x) \\ y' = x(r - z) - y. \\ z' = xy - bz \end{cases} \quad (7)$$

Допустим, что функциональные зависимости в (6) принимают значения: $f_{16}(X_7) = 0,3$, $f_{15}(X_6) = 0,5$, $f_{27}(X_5) = 0,06$.

При фиксированных значениях показателей, приведенных в табл. 2, система уравнений (7) примет вид (8).

$$\begin{cases} x' = \sigma \cdot (De + D + E) - (V + W) - \\ - (P + Sc_- + U) \cdot f_{16}(X_{17}) - \\ - I \cdot f_{15}(X_6) = \sigma \cdot (1 + 1,02 + 2) - \\ - (2 + 1,04) - (0,99 + 4 + 0,7) \cdot 0,3 - \\ - 0,7 \cdot 0,5 \\ y' = (P + Sc_- + U) \cdot f_{16}(X_7) - \\ - I \cdot f_{15}(X_6) \cdot (r - (I + Sc_- + D)) \cdot \\ \cdot f_{15}(X_6) - (W + T + V) \cdot f_{27}(X_5) - \\ - (De + D + E) - (V + W) = \\ = (0,99 + 4 + 0,7) \cdot 0,3 - \\ - 0,7 \cdot 0,5 \cdot (r - (0,7 + 4 + 1,02)) \cdot 0,5 - \\ - (3,04 + 22,1) - (1 + 1,02 + 2) - (2 + 1,04) \\ z' = (P + Sc_- + U) \cdot f_{16}(X_7) - I \cdot f_{15}(X_6) \cdot \\ \cdot (De + D + E) - (V + W) - b \cdot (I + Sc_- + D) \cdot \\ \cdot f_{15}(X_6) - (W + T + V) \cdot f_{27}(X_5) = \\ = (0,99 + 4 + 0,7) \cdot 0,3 - 0,7 \cdot 0,5 \cdot \\ \cdot (1 + 1,02 + 2) - (2 + 1,04) - \\ - b \cdot (0,7 + 4 + 1,02) \cdot 0,5 - (1,04 + 22,1 + 2) \cdot \\ \cdot 0,06 \end{cases} \quad (8)$$

Из решения системы получим значения параметров системы: $\sigma = 10$, $r = 28$, $b = 8/3$.

При данных значениях у системы существует странный аттрактор (решение задачи Коши обнаруживает сложное поведение, которое приближается по свойствам к стохастическому). Траектория притягивается к огра-

Таблица 2. Значения показателей национальной безопасности, при которых в системе возникают хаотические явления

Table 2. The values of national security indicators, under which the show in system chaotic phenomena

	<i>D_e</i> , млрд руб.	<i>D</i> , тыс. чел.	<i>E</i> , руб.	<i>V</i> , млрд руб.	<i>W</i> , млрд руб.	<i>P</i> , млн чел.	<i>Sc</i> , руб. / мес.	<i>U</i> , %	<i>I</i> , %	<i>T</i> , млрд руб.
Значение показателя	714,6	74418,9	4446	14611,2	75 700,1	145,3	9 124,4	7,1	14,07	37737,96
Нормированное значение	1	1,02	2	2	1,04	0,99	4	0,7	0,7	22,1

ниченной области в фазовом пространстве. Проекция траекторий аттрактора Лоренца являются нерегулярными орбитами вокруг неустойчивых неподвижных точек потока. Фазовый портрет аттрактора Лоренца при $x(0) = 1, y(0) = 1, z(0) = 1$ приведен на рис. 3.

На рисунке 4 показаны проекции аттрактора Лоренца на оси плоскостей (x, y) , (y, z) , (x, z) .

Хаотические явления, наблюдаемые в экономике страны в 1994–1995 гг., привели к следующим негативным последствиям.

ЮНЕСКО и Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) на основе исследований динамики уровня жизни и «жизнеспособности народов» в зависимости от социально-экономической политики и экологической ситуации в стране в 1994 г. оценили коэффициент жизнеспособности стран мира. Коэффициент жизнеспособности представляет собой оценку по пятибалльной шкале и учитывает возможности сохранения генофонда, физического и интеллектуального развития нации в условиях продолжения

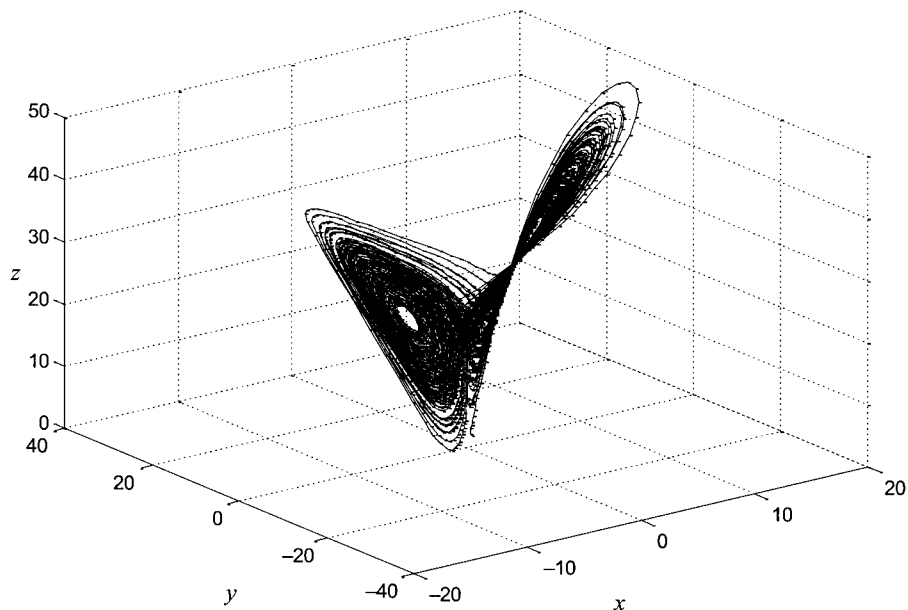


Рис. 3. Фазовый портрет нестабильного состояния экономики РФ в 1994 г., вызванного дифференциацией доходов, безработицей, инфляцией

Fig. 3. The phase portrait of the unstable state of the Russian economy in 1994, due to the differentiation of income, unemployment, by inflation

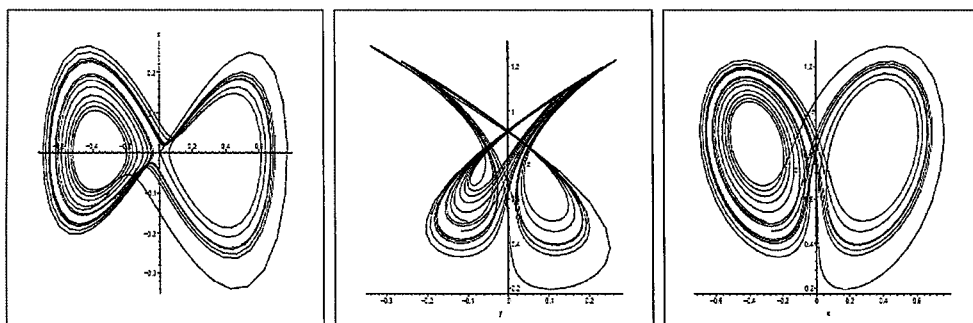


Рис. 4. Проекция фазового портрета нестабильного состояния экономики РФ в 1994 г. на плоскостях (x, y) , (y, z) , (x, z)

Fig. 4. The projections of the phase portrait of the unstable state of the Russian economy in 1994 on the planes (x, y) , (y, z) , (x, z)

экономической политики [14]. В 1994 году Россия с коэффициентом 1,4 вошла в группу стран, имеющих коэффициент жизнеспособности нации в интервале 1,4–1,1 балла, что является смертельным приговором нации. Население этих стран обречено либо на постепенное вымирание, либо на деградацию — «воспроизводимые» поколения будут отличаться физиологической и интеллектуальной неполноценностью. Потребовались значительные затраты времени и усилий для того, чтобы страна на рубеже III тысячелетия смогла нейтрализовать сложившиеся кризисные тенденции в экономике, внешней и внутренней политике и справиться с негативными последствиями «шоковой терапии».

Заключение

В статье разработан комплекс математических моделей, состоящий из модели системной динамики и регрессионных моделей. Модели позволяют осуществлять прогнозирование основных показателей национальной безопасности на различных временных интервалах. Приведен пример практической реализации разработанного математического обеспечения на временном интервале 7 лет. Проведены вычислительные эксперименты с разработанными моделями по моде-

лированию хаотических явлений в экономике России в 1994 г.

Список литературы

1. О стратегии национальной безопасности Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 31 декабря 2015 г. № 683) // Российская газета от 13.01.2016. № 6871.
2. Коптюг В. А., Матросов В. М., Левашов В. К., Демьянко Ю. Г. Подходы к разработке национальной стратегии устойчивого развития России. М.: Академия, 2001.
3. Форрестер Дж. Динамика развития города. М.: Прогресс, 1974. — 275 с.
4. Резчиков А. Ф., Цвиркун А. Д., Кушников В. А., Яндыбаева Н. В., Иващенко В. А. Методы прогнозной оценки социально-экономических показателей национальной безопасности // Проблемы управления. 2015. № 5. С. 37–44.
5. Яндыбаева Н. В., Кушников В. А. Математическая модель для прогнозирования изменений показателя национальной безопасности России // Научное обозрение. 2015. № 10–1. С. 115–121.
6. Яндыбаева Н. В., Кушников В. А. Модель Форрестера для прогнозирования показателей национальной безопасности России // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2015): Материалы Восьмой международной конференции, 29 сент. — 1 окт. 2015 г. В 2 т.: Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова Рос. акад. наук; под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. Т. 1: Пленарные доклады, секции 1–4. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 342–348.
7. Яндыбаева Н. В., Кушников В. А. Математическая модель для прогнозирования показателей экономической безопасности Российской Федерации // Вест-

- ник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. 2014. №3 (июль). С. 93–101.
8. Кушников В. А., Яндыбаева Н. В. Модель Форрестера в управлении качеством образовательного процесса вуза // Прикладная информатика. 2011. №3 (33). С. 65–73.
 9. Яндыбаева Н. В., Кушников В. А. Оценка качества образовательного процесса в вузе на основе модели Форрестера // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 2. №1 (55). С. 176–181.
 10. Федеральная служба государственной статистики. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения 20.02.2016).
 11. Ключев В. В., Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Иващенко В. А., Богомолов А. С., Филимонюк Л. Ю., Яндыбаева Н. В. Математические модели для контроля, диагностики и прогнозирования состояния национальной безопасности России // Контроль. Диагностика. 2016. №3. С. 43–51.
 12. Лоренц Э. Детерминированное непериодическое движение // Странные аттракторы. М., 1981. С. 88–116.
 13. Форрестер Дж. Мировая динамика: пер. с англ. М.: АСТ; СПб.: Terra Fantastica, 2003. — 379 с.
 14. Новая парадигма развития России: (Комплексные исследования проблем устойчивого развития) / Институт машиноведения им. А. А. Благонравова, Центр исследований устойчивости и нелинейной динамики, Институт социально-политических исследований и др. Под ред. В. А. Коптюга, В. М. Матросова, В. К. Левашова. Изд. второе. М.: Academia; Иркутск: РИЦ ГП «Облформпечать», 2000. — XIX, 459 с.: ил.
- assessment of socio-economic indicators of national security]. *Problemy upravleniya* — Control Sciences, 2015, no. 5, pp. 37–44.
5. Yandybaeva N. V., Kushnikov V. A. *Matematicheskaya model' dlya prognozirovaniya izmenenii pokazatelei natsional'noi bezopasnosti Rossii* [The mathematical model for forecasting changes in the national security indicators of Russia]. *Nauchnoe obozrenie*, 2015, no. 10–1, pp. 115–121.
 6. Yandybaeva N. V., Kushnikov V. A. *Model' Forrestera dlya prognozirovaniya pokazatelei natsional'noi bezopasnosti Rossii* [The Forrester model for forecasting the national security indicators of Russia]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2015): Materialy Vos'moi mezhdunarodnoi konferentsii* [Management of the development of large-scale systems (MLSD'2015): Proceedings of the Eighth International Conference] 29 sent. — 1 okt. 2015 g., Moskva: v 2 t. In-t problem upr. im. V. A. Trapeznikova Ros. akad. nauk; pod obshch. red. S. N. Vasil'eva, A. D. Tsvirkuna. T. 1: Plenarnye doklady, sektsii 1–4. Moscow, IPU RAN, 2015, pp. 342–348.
 7. Yandybaeva N. V., Kushnikov V. A. *Matematicheskaya model' dlya prognozirovaniya pokazatelei ekonomicheskoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii* [Mathematical model for forecasting indicators of economic security of the Russian Federation]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2014, no. 3 (iyul'), pp. 93–101.
 8. Kushnikov V. A., Yandybaeva N. V. *Model' Forrestera v upravlenii kachestvom obrazovatel'nogo protsessa vuza* [The Forrester model in the management of the quality of the educational process of the high school]. *Prikladnaya informatika* — Journal of Applied Informatics, 2011, no. 3 (33), pp. 65–73.
 9. Yandybaeva N. V., Kushnikov V. A. *Otsenka kachestva obrazovatel'nogo protsessa v vuze na osnove modeli Forrestera* [Assessment of the quality of the educational process in the higher school based on the Forrester model]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 2, no. 1 (55), pp. 176–181.
 10. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki. URL: <http://www.gks.ru> (data obrashcheniya 20.02.2016).
 11. Klyuev V. V., Rezchikov A. F., Kushnikov V. A., Ivashchenko V. A., Bogomolov A. S., Filimonuk L. Yu., Yandybaeva N. V. *Matematicheskie modeli dlya kontrolya, diagnostiki i prognozirovaniya sostoyaniya natsional'noi bezopasnosti Rossii* [Mathematical models for control, diagnostics and forecasting of the national security state of Russia]. *Kontrol'. Diagnostika* — Testing. Diagnostic, 2016, no. 3, pp. 43–51.
 12. Lorents E. *Determinirovannoe neperioodicheskoe dvizhenie* [Deterministic non-periodic motion]. *Strannye atraktory*. Moscow, 1981, pp. 88–116.

References

1. *O strategii natsional'noi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii* [On the National Security Strategy of the Russian Federation] (utv. Ukazom Prezidenta RF ot 31 dekabrya 2015 g. №683). *Rossiiskaya gazeta*, no. 6871 ot 13.01.2016.
2. Koptuyug V. A., Matrosov V. M., Levashov V. K., Dem'yanko Yu. G. *Podkhody k razrabotke natsional'noi strategii ustoichivogo razvitiya Rossii* [Approaches to the development of a national sustainable development strategy of Russia]. Moscow, Akademiya, 2001.
3. Forrester Jay W. *Urban dynamics*. Foreword by John F. Collins. System dynamics series. Pegasus Communications, Inc. 1969. 299 p.
4. Rezchikov A. F., Tsvirkun A. D., Kushnikov V. A., Yandybaeva N. V., Ivashchenko V. A. *Metody prognoznoi otsenki sotsial'no-ekonomicheskikh pokazatelei natsional'noi bezopasnosti* [Methods of predictive as-

13. Forrester Jay W. World dynamics. Cambridge, Massachusetts, Wright-Alien Press, Inc. 1971. 166 p.
14. *Novaya paradigma razvitiya Rossii: (Kompleksnye issledovaniya problem ustoichivogo razvitiya)* [A new paradigm for the development of Russia: (Comprehensive research on the problems of sustainable develop-

ment)]. Institut mashinovedeniya im. A. A. Blagonravova, Tsentr issledovaniya ustoichivosti i nelineinoi dinamiki, Institut sotsial'no-politicheskikh issledovaniy i dr.; Pod red. V. A. Koptyuga, V. M. Matrosova, V. K. Levashova. Izdanie vtoroe. Moscow, Academia, Irkutsk: RITs GP Oblinformpechat', 2000. XIX. 459 p.

A. Rezchikov, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia, rezchikov1939@mail.ru.

V. Kushnokov, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia, kushnikoff@yandex.ru.

N. Yandybaeva, Balakovsky branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Balakovo, Russia, nat07@inbox.ru.

V. Ivaschenko, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia, iptmuran@san.ru.

A. Bogomolov, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia, alexbogomolov@yandex.ru.

L. Filimonyuk, Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia, filimonyukleonid@mail.ru.

Model to assess the state of Russia's national security, based on system dynamics theory

Actual today is the development of mathematical models for simulation experiments to ensure the country's transition to sustainable development. The main indicators of national security, according to Presidential Decree № 683 «National Security Strategy of the Russian Federation» are: satisfaction of citizen of degree of protection of their constitutional rights and freedoms, personal and property interests, including from criminal encroachments; the share of modern weapons, military and special equipment in the Russian Armed Forces; the life expectancy; gross domestic product per capita; inflation; the share of expenditure in the gross domestic product for culture, as well as the development of science, technology and education; the part of the territory of the Russian Federation, that do not meet environmental standards. Developed a complex of mathematical models for modeling and the prognostication indicators of Russia's national security. Mathematical model developed based on system dynamics models, allows formalizing the complex casual relationships between system variables. System dynamics model consists of the following elements: the system levels (the simulated variables), which represent the accumulation of (accumulation) in feedback circuits; streams conveying the content of one level to another; making procedures that govern the rate of flow between the levels; information channels connecting procedures decisions levels. To describe the model developed using the apparatus of ordinary differential equations. As systemic levels presented the indicators of national security. To illustrate the casual relationships between system-level mathematical model developed using the graph model. Regression models are used to verify the adequacy of system dynamics models. An algorithm is proposed for determining of indicators of national security for solves the system of nonlinear differential equations. Shows the practical implementation of the mathematical support developed and compared predictive values of indicators of national security. Performed modeling of chaotic phenomena in the Russian economy in 1994.

Keywords: system dynamics, mathematical model, national security indicators, differential equations, the theory of chaos.

About authors: A. Rezchikov — *Dr of Technique, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences*, V. Kushnokov — *Dr of Technique, Professor*, N. Yandybaeva — *PhD in Technique*, V. Ivaschenko — *Dr of Technique, Professor*, A. Bogomolov — *PhD of Physics & Mathematics, Associate Professor*, L. Filimonyuk — *PhD in Technique*

For citation: Rezchikov A., Kushnokov V., Yandybaeva N., Ivaschenko V., Bogomolov A., Filimonyuk L.

Model to assess the state of Russia's national security, based on system dynamics theory.

Prikladnaya informatika — Journal of Applied Informatics, 2017, vol. 12, no. 2 (68), pp. 106–117 (in Russian).