

Имитационная модель региона в применении к анализу экономики Красноярского края

© 2019 г. Г.Л. Бекларян

ЦЭМИ РАН, Москва

E-mail: glbeklaryan@gmail.com

Поступила в редакцию 19.11.2018 г.

В статье представлен подход к рациональному управлению регионом на примере Красноярского края с использованием методов системной динамики. Разработана имитационная модель региона и продемонстрирована возможность оптимизации ключевых характеристик подобной системы за счет рационального управления такими множественными параметрами, как темпы строительства нового жилья, роста стоимости услуг ЖКХ и строительства объектов социальной инфраструктуры (садов, школ, больниц) и др. Предложенная модель позволяет формировать прогнозную динамику важнейших макроэкономических характеристик региона, определяемых с учетом внутренних прямых и обратных связей между различными элементами подобной системы и имеющихся ограничений. Компьютерная реализация данной модели выполнена в системе имитационного моделирования Powersim, поддерживающей методы системной динамики, а также возможности поиска субоптимальных решений с использованием генетических оптимизационных алгоритмов. Сформулирована важная оптимизационная задача региона по максимизации интегрального показателя — валового регионального продукта (ВРП) при множественных ограничениях. Для решения данной оптимизационной задачи был выбран генетический алгоритм (ГА), особенностью которого является агрегирование по целевому функционалу с имитационной моделью региона (реализованной в Powersim). Проведены численные исследования прогнозов ВРП Красноярского края при различных сценарных условиях, в частности для базового сценария, при котором сохраняются текущие значения управляющих параметров системы, и для наилучшего сценария, при котором значения соответствующих управляющих параметров вычисляются в результате решения задачи сформулированной оптимизационной задачи с использованием созданного оптимизационного модуля (генетического алгоритма). С помощью имитационной модели на реальных данных продемонстрированы возможности улучшения экономической ситуации в Красноярском крае, в основном за счет увеличения инвестиций в человеческий капитал, влияющих на динамику научно-технического прогресса и ВРП соответственно.

Ключевые слова: имитационное моделирование, региональная экономика, системная динамика, Красноярский край.

Классификация JEL: B22, C63, R11, R58.

DOI: 10.31857/S042473880005769-4

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуализируется задача рационального управления регионами РФ на основе системного подхода, предполагающего комплексный анализ динамики всех таких ключевых характеристик *системы “регион”*, как состояние экономики, численность населения и трудовых ресурсов, качество жизни населения, экология региона, состояние здравоохранения и др.

Сложность данной задачи состоит в необходимости учета множественных факторов, имеющих внутренние обратные связи и лаговые зависимости, обуславливающие необходимость комплексного (сбалансированного) развития *системы регион*. При этом для рационального управления регионом можно использовать подход, основанный на концепции *умный регион* (Smarter Region), представленной в работах (Акопов, Beklaryan, 2014; Komninos, 2008). Особенностью данного подхода является использование методов системной динамики (Акопов, 2012; Сидоренко, 1998), позволяющих рассматривать регион как совокупность элементов, характеризующих важнейшие состояния подобной системы с учетом имеющихся прямых и обратных связей и множественных зависимостей.

Отметим, что методы системной динамики были впервые предложены в работах Дж. Форрестера (Forrester, 1959, 1969) и развиты в серии хорошо известных работ, посвященных проблеме предела роста (Meadows et al., 2004; Meadows 1972), в которых с помощью методов системной динамики обосновывается необходимость перехода к рациональной (бережливой) модели использования природных ресурсов как важнейшему фактору устойчивого развития в региональном, страновом и мировом масштабах.

Проблемам моделирования региональной экономики посвящены работы многих российских ученых, среди которых хотелось бы выделить (Макаров и др., 2016; Айвазян и др., 2016; Бахтизин и др., 2017). Отметим, в особенности, первую работу, в которой предлагается модель развития региона с эндогенным фактором научно-технического прогресса (НТП), что позволяет описать характеристики сектора образования и науки, исследовать влияние инвестиций в знания и инновации на экономику региона.

Вместе с тем большинство работ по региональной экономике сфокусированы в основном на изучении возможностей управления отдельными параметрами подобной сложной системы (например, инвестициями в основные фонды и трудовые ресурсы, затратами на НИР и др.). При этом создание имитационных моделей, предназначенных для сценарного управления множественными характеристиками региона с учетом влияния обратных связей, по-прежнему является весьма актуальной задачей.

Важным фактором устойчивого развития региона является состояние его экологических систем, в том числе качества воздуха, водных ресурсов и почвы. Для этого необходим баланс между темпами роста выпуска товаров и услуг (в особенности добывающих отраслей экономики) и уровнем выбросов вредных веществ в атмосферу. Соответствующие исследования по данной тематике представлены в работах (Акопов et al., 2017; Nordhaus, 2008).

В настоящее время методы имитационного моделирования применяются в различных областях, например для формирования стратегии развития банковских групп (Акопов, 2012), моделирования внешнеэкономической деятельности РФ (Бекларян, 2018), управления инвестиционной деятельностью вертикально-интегрированных нефтяных компаний (Акопов, 2010, 2011), прогнозирования динамики сложных эколого-экономических систем (Акопов и др., 2017, 2019), моделирования поведения толпы при чрезвычайных ситуациях (Акопов, Бекларян, 2015). При этом используются современные инструменты имитационного моделирования, например Powersim и AnyLogic, поддерживающие методы системной динамики, агентного моделирования, дискретно-событийного моделирования и имеющие встроенные модули решения оптимизационных задач с помощью генетических алгоритмов.

Подобный инструментарий позволяет прогнозировать будущее состояние социально-экономической системы региона при различных сценарных условиях и ограничениях.

Отметим, что Красноярский край был выбран в качестве объекта исследования, поскольку он является крупнейшим (вторым по площади) субъектом РФ и лидером среди регионов страны в производстве промышленного продукта на одного жителя (на регион приходится приблизительно 3,2% всего объема промышленной продукции, произведенной на территории России). По данным Росстата, ВРП Красноярского края за 2016 г. составил примерно 1,77 трлн руб.¹ По данным Министерства экономики и регионального развития Красноярского края, ВРП в 2017 г. составил 1,97 трлн руб. При этом к 2021 г. министерство прогнозирует рост ВРП до 2,58 трлн руб., согласно базовому сценарию², предполагающему устойчивый рост цен на нефть и цветные металлы с сохранением текущих темпов добычи полезных ископаемых, а также инвестиций в основной капитал.

Цель данной работы состоит в разработке имитационной модели региона с использованием методов системной динамики и проведении численных исследований на примере Красноярского края с целью прогнозирования будущего состояния региона при различных сценарных условиях, а также решения следующих важнейших задач:

¹ См. http://krasstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/krasstat/ru/statistics/krasnStat/grp/.

² См. http://econ.krskstate.ru/ser_kray/prognoz/pserkr/0/id/32547.

- ситуационное моделирование и системный анализ производственных, финансовых и инвестиционных характеристик региона;
- сценарное прогнозирование важнейших макроэкономических показателей региона;
- адаптивное (интеллектуальное) управление регионом;
- системно-динамическое моделирование стратегии развития региона.

2. МЕТОДЫ: ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕГИОНА

Структура предлагаемой имитационной модели региона представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура имитационной модели региона

Отметим, что у региона, как правило, имеется несколько целевых функционалов, важнейшим из которых является ВРП. Основными движущими силами роста ВРП являются ресурсные характеристики ключевых отраслей экономики (промышленности, сельского хозяйства, строительства, транспорта и связи): основные фонды и трудовые ресурсы. Динамика основных фондов определяется инвестиционными возможностями региона, оцениваемыми, в частности, темпами роста ВРП. Динамика трудовых ресурсов зависит прежде всего от демографической ситуации в регионе и состояния миграционных процессов (притока и оттока населения). В свою очередь, характеристики фертильности, смертности, эмиграции и иммиграции, влияющие на демографию региона, зависят от качества жизни населения, в частности обеспеченности населения жильем, детскими садами, больницами и школами, уровнем расходов на ЖКХ, темпами роста реального размера пенсий и др.

При этом у региональных властей имеется следующий набор управляющих параметров:

- темп роста инвестиций в основные фонды (ОФ) по отраслям в регионе (с учетом инфляции цен промышленных товаров);
- структура занятых в экономике;
- доля экономически активного населения;
- темп строительства нового жилья в год;
- темп роста стоимости услуг ЖКХ;

- доля жилья, предоставляемого на условиях социального найма;
- средние процентные ставки по ипотеке в регионе для физических лиц;
- темп роста средней пенсии в регионе (с учетом инфляции потребительских цен);
- темп открытия(закрытия) детских садов в регионе;
- темп открытия(закрытия) лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ) в регионе;
- темп открытия (закрытия) новых школ в регионе;
- темп открытия (закрытия) вузов (учреждений в сфере высшего образования).

Отметим, что возможности управления многими влияющими факторами жестко ограничены. Региональные власти слабо влияют на структуру занятых в экономике и долю экономически активного населения. Однако некоторые параметры, например темпы роста стоимости услуг ЖКХ, темпы открытия (закрытия) объектов социальной инфраструктуры и др., могут быть в значительной степени отрегулированы государством на региональном уровне с учетом интересов населения.

Разработанная нами имитационная модель региона основана на использовании ранее разработанных методов моделирования динамики основных фондов, трудовых ресурсов и др. В частности, для моделирования объема выпуска используется хорошо известная функция Кобба–Дугласа с эластичностями замещения (Cobb, Douglas, 1928; Клейнер, Пиотконовский, 2000). При этом фактор научно-технического прогресса является эндогенной характеристикой, т.е. зависящей от состояния научно-образовательной отрасли экономики, характеризуемой численностью школ и высших учебных заведений, а также затратами на научные исследования и разработки (Arrow, 1962; Romer, 1990).

Прогнозирование динамики численности населения в регионе осуществляется с учетом влияния фертильности, естественной убыли населения, а также миграции, которые, в свою очередь, зависят от внешних факторов, определяющих привлекательность данного региона для проживания населения и воспроизводства популяции. Подобный подход ранее описан в работах (Stewart, 1950; Yар, 1977; Макаров и др., 2019), а также в рамках хорошо известного метода передвижки возрастов (Whelpton, 1928).

В данных работах объясняется взаимосвязь между основными характеристиками среды проживания и размером популяции, в частности влияния темпов экономического развития, уровня социального обеспечения, экологического состояния региона и др. на динамику численности населения. Регионы с большей численностью населения и развитой социальной инфраструктурой, как правило, характеризуются большим числом рабочих мест, лучшими экономическими показателями, они обеспечивают высокий естественный прирост населения. Регионы с недостаточно развитым медицинским обеспечением (дефицитом лечебно-профилактических учреждений), относительно низким размером пенсий, имеющие неблагоприятную экологическую ситуацию и др., как правило, характеризуются меньшей продолжительностью жизни населения.

Перейдем к формальному описанию разработанной нами имитационной модели региона.

Введем следующие обозначения: $\tilde{T} = \{t_0, \dots, t_T\}$ — набор моментов модельного времени по годам; T — горизонт стратегического планирования, например три года; $\tilde{I} = \{i_0, \dots, i_I\}$ — набор индексов основных отраслей экономики (промышленность, сельское хозяйство, строительство, транспорт и связь, прочие отрасли); $p(t)$ — численность населения в регионе в момент времени t (тыс. человек); $\{b(t), d(t)\}$ — темпы рождаемости и смертности в регионе в момент времени t (тыс. чел./год); $\{Im(t), Em(t)\}$ — темпы иммиграции и эмиграции в регионе в момент времени t (тыс. чел./год); $\{s_1(t), \dots, s_5(t)\}$ — обеспеченность населения жильем (кв. м / человек), детскими садами (1 / тыс. человек), школами, лечебно-профилактическими учреждениями (стационарами и поликлиниками) и пенсиями (относительно прожиточного минимума); $w(t)$ — средний размер (месячного) пенсионного обеспечения в регионе; $\bar{w}(t)$ — прожиточный минимум в регионе; $H(t)$ — число выпускников вузов (тыс. человек); $V_i(t)$ — объем выпуска товаров и услуг в стоимостном выражении по отраслям экономики (млн руб.); $\tilde{V}(t)$ — совокупный объем выпуска товаров и услуг в стои-

мостном выражении, $\tilde{V}(t) = \sum_{i=1}^I V_i(t)$; $\{L_i(t), K_i(t)\}$ — объем трудовых ресурсов и основных фондов в стоимостном выражении по i отраслям экономики ($i \in \tilde{I}$); $\{l_i^+(t), l_i^-(t)\}$ — темпы ввода и выбытия трудовых ресурсов (тыс. чел./год); $\{k_i^+(t), k_i^-(t)\}$ — темпы ввода и выбытия основных фондов (тыс. чел./год); $\{\alpha_i(t), \beta_i(t)\}$ — эластичности выпуска по трудовым ресурсам и основным фондам соответственно в производственной функции типа Кобба–Дугласа ($\alpha_i(t) + \beta_i(t) = 1$); $A(t)$ — коэффициент-фактор научно-технического прогресса (НТП); τ_i — средняя продолжительность трудовой деятельности (лет); ω_i — коэффициент выбытия основных фондов (ОФ); $p(t)$ — численность населения в регионе (тыс. человек); λ — доля экономически активного населения в регионе (*управляющий параметр*) (тыс. человек); q_i — структура занятости в экономике (*управляющий параметр*) $\sum_{i=1}^I q_i = 1$; η_i — темпы роста инвестиций в ОФ (*управляющий параметр*); $U(t)$ — внутренние затраты в регионе на научные исследования и разработки; $\{\delta_1, \dots, \delta_4\}$ — темпы открытия (закрытия) детских садов, школ, вузов и лечебно-профилактических учреждений (поликлиник и больниц) (ед. /год) (*управляющие параметры*); $\{m_1, m_2, m_3\}$ — средние процентные ставки по ипотеке в регионе (%/год), строительство нового жилья (млн кв. м/год) и доля жилья, предоставляемого очередникам в социальный найм (%) (*управляющие параметры*); $f(m_1)$ — объем жилья, приобретаемого по ипотеке в зависимости от уровня процентных ставок (млн кв. м/год); $M(t)$ — жилищный фонд региона (млн кв. м); $\{N_1(t), \dots, N_4(t)\}$ — число детских садов, школ, вузов и лечебно-профилактических учреждений (поликлиник и стационаров) в регионе (ед.); κ — среднее число выпускников на один вуз и образовательную программу в регионе (тыс. человек); $\{c_1, c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}\}, \{c_2, c_{21}, c_{22}, c_{23}\}, \{a_0, c_3, c_{31}, c_{32}, c_{33}\}$ — коэффициенты регрессии (экзогенные), используемые для расчета прогнозной динамики темпов рождаемости, смертности и фактора НТП в регионе соответственно (вычисляются на основе известных исторических данных с использованием метода наименьших квадратов); r_1, r_2 — темпы иммиграции и эмиграции соответственно (тыс. чел./год); $E(t)$ — объем вредных выбросов, производимых предприятиями всех отраслей экономики; $\sigma(t)$ — коэффициент, отражающий соотношение объема вредных выбросов к выпуску; $\mu(t) \in [0, 1]$ — коэффициент, отражающий технологические возможности региона в сокращении выбросов.

Динамика численности населения в регионе:

$$p(t) = p(t-1) + b(t)p(t-1) - d(t)p(t-1) + Im(t) - Em(t), \quad (1)$$

где $t \in \tilde{T}$,

$$b(t) = c_1 \exp\left(\ln\left(c_{11}s_1(t) + c_{12}s_2(t) + c_{13}s_3(t) + c_{14}\tilde{V}(t) / \tilde{V}(t-1)\right)\right), \quad (2)$$

$$d(t) = c_2 \exp\left(\ln\left(c_{21}s_4(t) + c_{22}s_5(t) + c_{23}E(t)\right)^{-1}\right), \quad (3)$$

$$Im(t) = r_1 p(t-1), \quad (4)$$

$$Em(t) = r_2 p(t-1), \quad (5)$$

$$s_1(t) = \frac{M(t-1) + f(m_1)m_2(1-m_3) + m_2m_3}{p(t)}, \quad (6)$$

$$s_2(t) = \frac{N_1(t-1) + \delta_1 N_1(t-1)}{p(t)}, \quad (7)$$

$$s_3(t) = \frac{N_2(t-1) + \delta_2 N_2(t-1)}{p(t)}, \quad (8)$$

$$s_4(t) = \frac{N_4(t-1) + \delta_4 N_4(t-1)}{p(t)}, \quad (9)$$

$$s_5(t) = \frac{w(t)}{\underline{w}(t)}. \quad (10)$$

Динамика трудовых ресурсов в регионе по отраслям экономики:

$$L_i(t) = L_i(t-1) + l_i^+(t) - l_i^-(t), \quad (11)$$

где $i \in \tilde{I}$, $t \in \tilde{T}$,

$$l_i^+(t) = q_i \lambda (p(t) - p(t-1)), \quad (12)$$

$$l_i^-(t) = \frac{L_i(t-1)}{\tau_i}. \quad (13)$$

Динамика основных фондов в регионе по отраслям экономики:

$$K_i(t) = K_i(t-1) + k_i^+(t) - k_i^-(t), \quad (14)$$

где

$$k_i^+(t) = \eta_i K_i(t-1), \quad (15)$$

$$k_i^-(t) = \omega_i K_i(t-1). \quad (16)$$

Динамика объема выпуска продуктов и услуг по отраслям экономики:

$$V_i(t) = A(t) K_i^{\alpha_i(t)}(t) L_i^{\beta_i(t)}(t), \quad (17)$$

где

$$A(t) = a_0 + c_3 \exp(\ln(c_{31} s_3(t) + c_{32} H(t) + c_{33} U(t))), \quad (18)$$

$$H(t) = \kappa (N_3(t-1) + N_3(t-1) \delta_3), \quad (19)$$

$$\alpha_i(t) + \beta_i(t) = 1. \quad (20)$$

Динамика совокупного объема выпуска —

$$\tilde{V}(t) = \sum_{i=1}^I V_i(t), \quad (21)$$

динамика выбросов вредных веществ в регионе —

$$E(t) = \sigma(t) (1 - \mu(t)) \tilde{V}(t), \quad (22)$$

динамика промежуточного потребления в регионе по отраслям экономики —

$$G_i(t) = G_i(t-1) \frac{V_i(t)}{V_i(t-1)}, \quad (23)$$

динамика валового регионального продукта —

$$GRP(t) = \sum_{i=1}^I (V_i(t) - G_i(t)). \quad (24)$$

Управляющими параметрами модели является набор $\{\delta_1, \delta_2, \delta_3, m_1, m_2, m_3, \lambda, \eta_i, q_i\}$, $i \in \tilde{I}$. При этом для каждого из рассматриваемых параметров заданы нижние $\{\underline{\delta}_1, \underline{\delta}_2, \underline{\delta}_3, \underline{m}_1, \underline{m}_2, \underline{m}_3, \underline{\lambda}, \underline{\eta}_i, \underline{q}_i\}$ и верхние граничные $\{\bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2, \bar{\delta}_3, \bar{m}_1, \bar{m}_2, \bar{m}_3, \bar{\lambda}, \bar{\eta}_i, \bar{q}_i\}$ значения, определяющие области допустимых решений.

Отметим, что для моделирования динамики трудовых ресурсов (соотношения (11)–(13)) и основных фондов (соотношения (14)–(16)) используется подход, основанный на учете естественного выбытия и необходимого замещения соответствующих ресурсов с учетом влияния временного фактора (средней продолжительности трудовой деятельности) и инвестиционных возможностей

региона (Бекларян и др., 2012). Для моделирования динамики вредных выбросов в регионе с учетом технологических возможностей по их сокращению (формула (22)) используется подход, ранее предложенной в работе (Акоров et al., 2017). Для моделирования валового регионального продукта (формула (24)) используется хорошо известный производственный метод (Иванов, 2002).

Теперь можно сформулировать важнейшую задачу региона в плане максимизации валового регионального продукта.

Задача А. Требуется максимизировать валовой региональный продукт по набору управляющих параметров $\{\delta_1, \delta_2, \delta_3, m_1, m_2, m_3, \lambda, \eta_i, q_i\}$:

$$\max_{\{\delta_1, \delta_2, \delta_3, m_1, m_2, m_3, \lambda, \eta_i, q_i\}} GRP(t) \quad (25)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} \underline{\delta}_1 \leq \delta_1 \leq \bar{\delta}_1, \quad \underline{\delta}_2 \leq \delta_2 \leq \bar{\delta}_2, \quad \underline{\delta}_3 \leq \delta_3 \leq \bar{\delta}_3, \\ \underline{m}_1 \leq m_1 \leq \bar{m}_1, \quad \underline{m}_2 \leq m_2 \leq \bar{m}_2, \quad \underline{m}_3 \leq m_3 \leq \bar{m}_3, \\ \underline{\lambda} \leq \lambda \leq \bar{\lambda}, \quad \underline{\eta}_i \leq \eta_i \leq \bar{\eta}_i, \quad \underline{q} \leq q \leq \bar{q}, \\ i \in \tilde{I}, t \in \tilde{T}. \end{aligned}$$

Далее, с использованием системы имитационного моделирования Powersim Studio, поддерживающей методы системной динамики, была реализована имитационная модель (1)–(25). Фрагмент данной модели представлен на рис. 2.

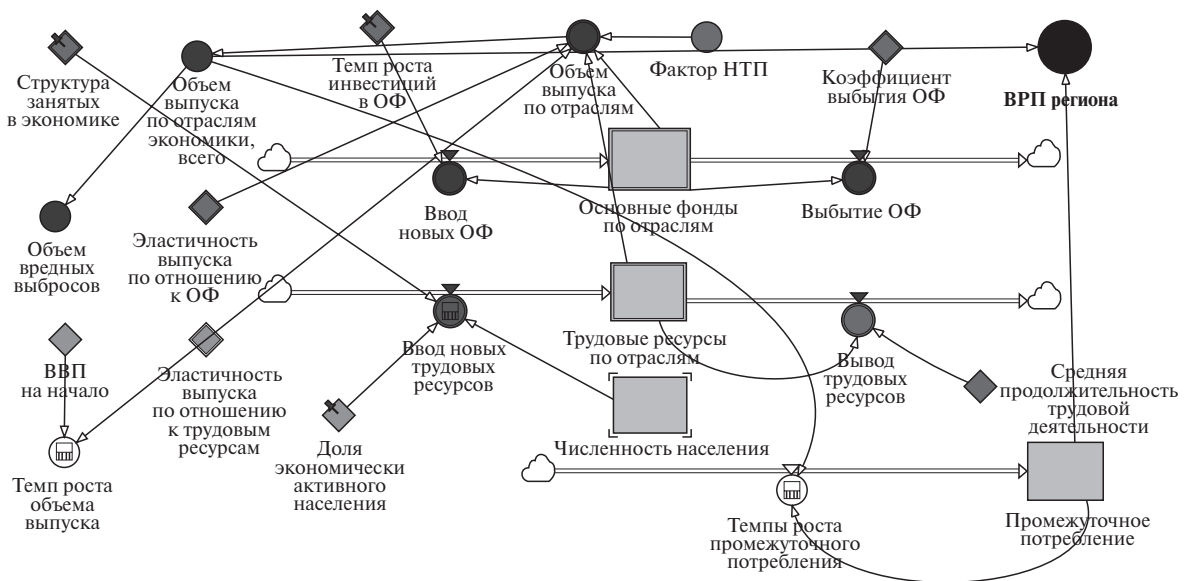


Рис. 2. Фрагмент имитационной модели Красноярского края, реализованной в системе Powersim

Сложность решения задачи А обусловлена, в основном, наличием большого числа переменных — решений с непрерывным пространством поиска. Целевой функционал (25) характеризуется высокой чувствительностью к значениям многих управляющих параметров, в особенности к темпам роста инвестиций в основные фонды отраслей экономики, что обуславливает повышенные требования к точности соответствующих решений. В случае целесообразной отраслевой дезагрегации разработанной региональной имитационной модели и выделения системообразующих агентов-предприятий при проведении будущих исследований размерность решаемой задачи будет экспоненциально расти.

Поэтому для решения оптимизационной задачи (25) был выбран генетический оптимизационный алгоритм (ГА), особенностью которого является агрегируемость по целевому функционалу

с имитационной моделью региона (реализованной в Powersim). При этом применение известных ньютоновских и квазиньютоновских методов оптимизации в данном случае менее оправдано, так как целевая функция (25) является результатом имитационного моделирования, она и не может быть описана с помощью аналитической модели с требуемым уровнем детализации влияющих факторов.

Особенностью ГА является использование эвристических операторов кроссовера и мутации, обеспечивающих формирование новых потенциальных решений на каждой итерации данного алгоритма. Оператор кроссовера предназначен для скрещивания (рекомбинации) наилучших родительских решений, отобранных ранее из имеющейся популяции на основе оценки их приспособленности (фитнес-функции). Оператор мутации позволяет преодолеть проблему преждевременной сходимости ГА, связанной с возможным застреванием ГА в одном из локальных экстремумов.

На рис. 3 представлен фрагмент оптимизационного модуля, модифицированного для решения задачи (25). В частности, данный модуль позволяет определить требуемый набор управляющих параметров (Decisions) со своими ограничениями (минимальные и максимальные значения) и задать целевую переменную (Objective), в качестве которой выступает ВРП региона.

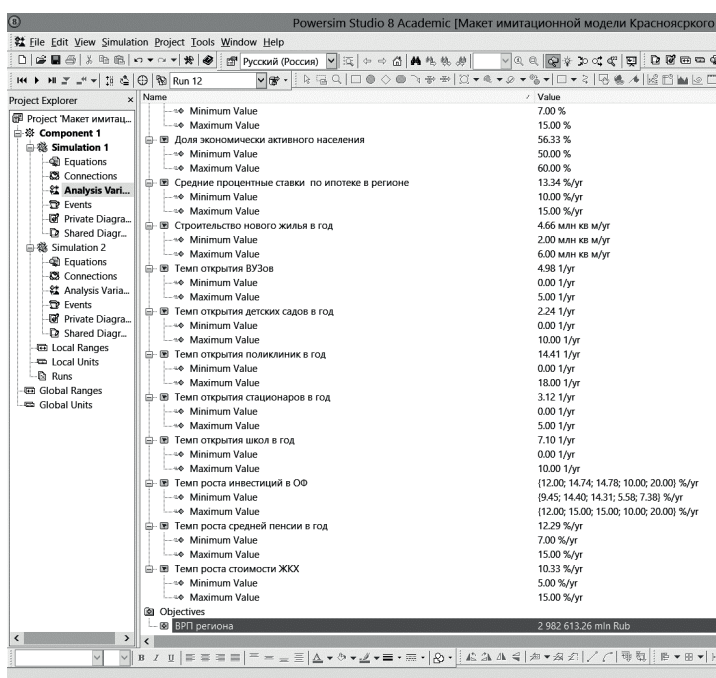


Рис. 3. Фрагмент оптимизационного модуля для модели Красноярского края в системе Powersim

Подробное описание программной реализации ГА с использованием системы имитационного моделирования Powersim представлено в работе (Акопов, 2011).

На рис. 4 представлен фрагмент панели управления имитационной моделью Красноярского края, реализованной в Powersim. Отметим, что особенностью предлагаемого подхода является поддержка моделирования сценариев типа “Что будет, если...?”. В результате обеспечивается инструмент поддержки принятия решений по рациональному управлению основными влияющими факторами (например, темпом строительства нового жилья в год, темпом роста стоимости услуг ЖКХ, долей жилья, предоставляемого на условиях социального найма, и др.). При этом на графиках, визуализирующих ключевые характеристики региона, отображаются два прогнозных сценария, соответствующих различным вариантам расчета до (Reference) и после (Current) изменений значений управляющих параметров (“ползунков”).

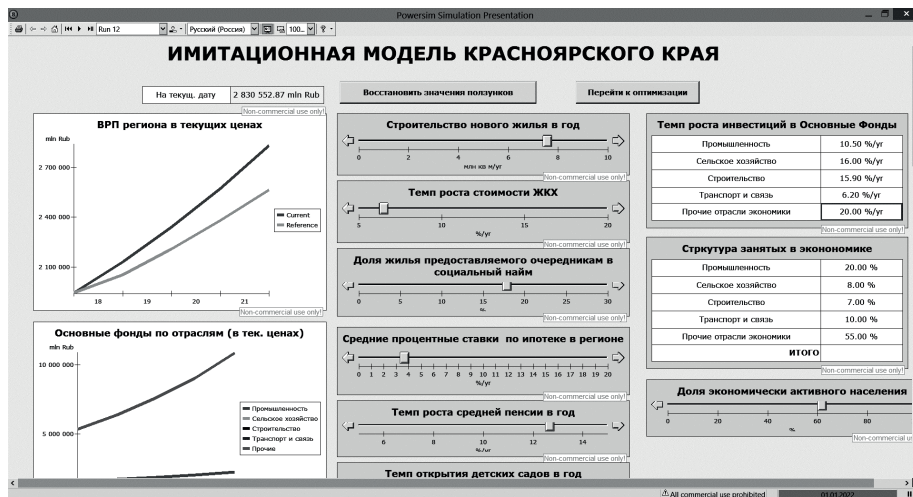


Рис. 4. Фрагмент панели управления имитационной модели Красноярского края

Следует отметить, что для верификации разработанной имитационной модели использовался метод наименьших квадратов (МНК). В качестве оцениваемых показателей были выбраны наиболее важные макроэкономические характеристики Красноярского края, по которым имелись соответствующие статистические данные, в частности:

- численность населения;
- основные фонды в стоимостном выражении по основным отраслям экономики (промышленность, сельское хозяйство, строительство, транспорт и связь, прочие отрасли экономики);
- численность трудовых ресурсов по отраслям экономики;
- объем выпуска товаров и услуг по основным отраслям экономики;
- размер жилищного фонда региона;
- число школ и ВУЗов региона;
- число ЛПУ (поликлиник и стационаров);
- совокупный объем вредных выбросов всеми предприятиями региона;
- ВРП региона.

Для верификации модели по каждому показателю прогнозные значения сопоставлялись с соответствующими фактическими.

Для оценки ошибки прогноза по каждой оцениваемой характеристике использовалось следующее соотношение:

$$\chi_j = \frac{1}{T} \sqrt{\sum_{t=1}^T \left(\frac{\tilde{O}_j(t) - O_j(t)}{O_j(t)} \right)^2}, \quad j \in \tilde{J}, t \in \tilde{T}, \quad (26)$$

где $\tilde{J} = \{j_1, j_2, \dots, j_J\}$ — набор оцениваемых макроэкономических характеристик региона, вычисляемых в результате имитационного моделирования; $\tilde{O}(t)$ — прогнозные значения характеристик j региона, оцениваемых на историческом временном периоде (10 лет); $O(t)$ — известные фактические значения характеристик j региона. Тогда совокупная ошибка прогнозирования равна

$$\Omega = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \chi_j. \quad (27)$$

В качестве исходных (исторических) данных были использованы официальные статистические данные Росстата, преимущественно публикуемые в регулярном сборнике «Регионы России».

*Социально-экономические показатели*³ (за период с 2002 по 2016 г.). В результате проведенных множественных численных экспериментов интегральная ошибка прогнозирования важнейших макроэкономических показателей Красноярского края составила $\Omega \leq 10\%$, что свидетельствует об адекватности данной модели. При этом различия в экспериментах состояли в выборе различных интервалов прогнозирования и разных начальных моментов модельного времени для обеспечения валидности получаемых оценок.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В таблице представлены значения основных управляющих параметров модели, зафиксированных на модельный период 2019—2021 гг. в соответствии с известными значениями, а также полученные в результате серии оптимизационных экспериментов, выполненных с использованием имитационной модели и созданного оптимизационного модуля. Значения управляющих параметров, дифференцируемых по отраслям экономики, приводятся в фигурных скобках {промышленность, сельское хозяйство, строительство, транспорт и связь, прочие отрасли экономики}. Значения в последнем столбце соответствуют результатам оптимизации.

Таблица. Значения управляющих параметров модели для Красноярского края на 2019—2021 гг.

Управляющий параметр модели	Фактическое значение	Минимально допустимое значение	Максимально допустимое значение	Наилучшее (модельное) значение
Доля жилья, предоставляемого на условиях социального найма, %	10	7	15	13,18
Доля экономически активного населения, %	55	50	60	56,33
Средние процентные ставки по ипотечным кредитам в регионе, %/год	13	10	15	13,34
Строительство нового жилья в год, млн кв. м / год	3	2	6	4,66
Темп открытия (закрытия) вузов в год, ед. / год	−1	0	5	5
Темп роста инвестиций в ОФ с учетом инфляции промышленных цен, %/год	{10,5; 16,0; 15,9; 6,2; 8,2}	{9,45; 14,4; 14,31; 5,58; 7,38}	{12; 15; 15; 10; 20}	{12; 14,7; 14,8; 10; 20}
Темп роста средней пенсии в год с учетом инфляции потребительских цен, %/год	9,5	7	15	12,29
Темп роста стоимости услуг ЖКХ, %/год	8,6	5	15	10,33
Темп открытия (закрытия) детских садов, ед. / год	−4	0	10	2
Темп открытия (закрытия) поликлиник, ед. / год	2	0	18	15
Темп открытия (закрытия) стационаров, ед. / год	0	0	5	3
Темп открытия (закрытия) школ, ед. / год	−5	0	10	7

На рис. 5 показана динамика ВРП Красноярского края на период 2019—2021 гг., полученная с помощью разработанной имитационной модели для двух сценариев:

- базовый, при котором сохраняются текущие значения управляющих параметров (см. таблицу);
- наилучший, при котором значения управляющих параметров вычисляются в результате решения задачи (25) с использованием созданного оптимизационного модуля (см. рис. 3).

Результаты имитационного моделирования сравниваются с прогнозом, выполненным Министерством экономики и регионального развития Красноярского края для базового сценария⁴.

³ См. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1138623506156.

⁴ См. http://econ.krskstate.ru/ser_kray/prognoz/pserkr/0/id/32547.

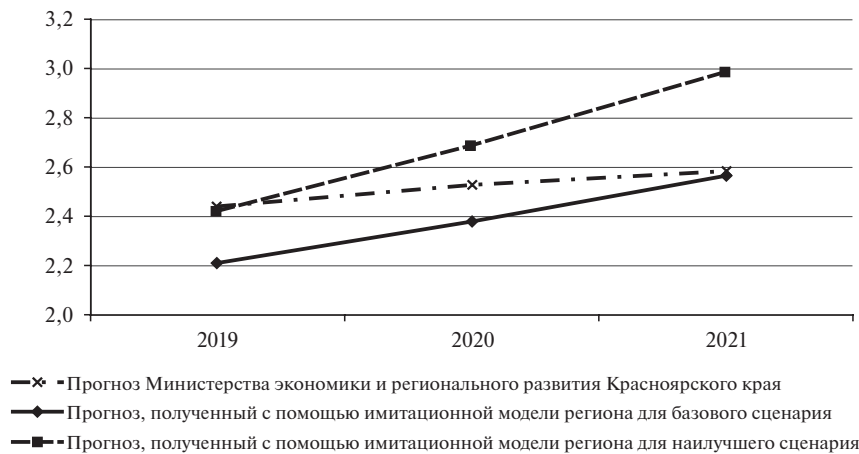


Рис. 5. Прогнозная динамика ВРП Красноярского края на период 2019—2021 гг., млн руб.

График на рис. 5 показывает, что прогноз, полученный с помощью разработанной имитационной модели для базового сценария, при котором сохраняются текущие значения управляющих параметров, незначительно отличается от прогноза динамики ВРП, выполненного Министерством экономики и регионального развития Красноярского края.

При этом *наилучший сценарий*, при котором значения управляющих параметров вычисляются в результате решения сформулированной оптимизационной задачи (22), позволяет улучшить экономическую ситуацию в регионе к 2021 г. в основном за счет увеличения инвестиций в человеческий капитал, открытия большего числа организаций дошкольного и школьного образования, увеличения числа высших учебных заведений и общего количества выпускников, что существенным образом влияет на значение технологического фактора в регионе ($A(t)$) и прогнозируемый объем выпуска товаров и услуг ($\tilde{V}(t)$) соответственно. Другим важнейшим фактором экономического роста является рекомендуемое увеличение инвестиций в основной капитал (см. таблицу). Потенциальный рост темпов строительства объектов социальной инфраструктуры (садов, школ, поликлиник и др.), увеличение размера реальных пенсий, ограничение темпов роста стоимости услуг ЖКХ и др. позволит снизить уровень смертности, повысить обеспеченность населения жильем, увеличить рождаемость, что в долгосрочной перспективе обеспечит улучшение состояния социально-экономической системы региона.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была предложена укрупненная имитационная модель региона, разработанная с использованием методов системной динамики. На примере Красноярского края она продемонстрировала возможность оптимизации ключевых характеристик подобной сложной системы, в частности показателя ВРП, за счет рационального управления такими множественными характеристиками, как темпы строительства нового жилья, темпы роста стоимости услуг ЖКХ, темпы строительства объектов социальной инфраструктуры (садов, школ, больниц) и др.

Разработанная имитационная модель (см. рис. 1—4) позволяет формировать прогнозную динамику важнейших макроэкономических характеристик региона, определяемых с учетом внутренних прямых и обратных связей между различными элементами подобной системы и имеющихся ограничений.

Данный подход основан на решении сформулированной оптимизационной задачи, целевым функционалом которой является показатель ВРП, а управляющими параметрами являются такие важные факторы, как темп роста инвестиций в ОФ по отраслям в регионе (с учетом инфляции промышленных цен), структура занятых в экономике, доля экономически активного населения, темпы строительства нового жилья в год, темпы роста стоимости услуг ЖКХ и др. (см. таблицу).

В результате проведенных численных экспериментов показано (см. рис. 5), что наилучший сценарий, при котором значения управляющих параметров вычисляются в результате решения сформулированной оптимизационной задачи (26), позволяет улучшить экономическую ситуацию в регионе, в основном за счет увеличения инвестиций в человеческий капитал и основные фонды ключевых отраслей экономики.

Дальнейшие исследования предполагается провести по следующим направлениям:

- уточнение имитационной модели региона посредством перехода к товарной дифференциации выпуска и эндогенизации спроса с использованием методологии SAM-матриц (матриц финансовых потоков) и CGE-моделей (вычисляемых моделей общего равновесия) на региональном уровне;
- дезагрегация имитационной модели посредством выделения большего числа экономических агентов на микроуровне (отдельных предприятий, потребителей, финансовых организаций и др.) со своими индивидуальными правилами поведения, влияющими на характеристики региона;
- расширение модели с целью формирования нескольких оптимизационных критериев для региона (ВРП, численность населения, удовлетворенность качеством жизни, уровень неравенства и др.), постановка и решение соответствующих оптимизационных задач с визуализацией Парето-фронта.

В результате этих исследований будет разработана крупномасштабная система поддержки принятия решений в области рационального управления регионами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айвазян С.А., Афанасьев М.Ю., Кудров А.В. (2016). Модели производственного потенциала и оценки технологической эффективности регионов РФ с учетом структуры производства // *Экономика и математические методы*. № 1. С. 28—44.
- Акопов А.С. (2010). К вопросу проектирования интеллектуальных систем управления сложными организационными структурами. Часть 1. Математическое обеспечение системы управления инвестиционной деятельностью вертикально-интегрированной нефтяной компании // *Проблемы управления*. № 6. С. 12—18.
- Акопов А.С. (2011). К вопросу проектирования интеллектуальных систем управления сложными организационными структурами. Часть 2. Программная реализация системы управления инвестиционной деятельностью вертикально-интегрированной нефтяной компании // *Проблемы управления*. № 1. С. 47—54.
- Акопов А.С. (2012). Системно-динамическое моделирование стратегии банковской группы // *Бизнес-информатика*. № 2. С. 10—19.
- Акопов А.С., Бекларян Л.А. (2015). Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // *Автоматика и телемеханика*. № 10. С. 131—143.
- Акопов А.С., Бекларян Г.Л., Бекларян Л.А. (2017). Агентное моделирование эколого-экономической системы города (на примере г. Ереван, Республика Армения) // *Искусственные общества*. Т. 12. № 3—4. С. 1.
- Бахтизин А.Р., Бухвальд Е.М., Кольчугина А.В. (2017). Экономическая дифференциация регионов России: новые оценки и закономерности // *ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика*. № 1. С. 41—56.
- Бекларян Г.Л. (2018). Укрупненная имитационная модель внешнеэкономической деятельности РФ // *Экономическая наука современной России*. № 4. С. 50—65.
- Бекларян Л.А., Борисова С.В., Хачатрян Н.К. (2012). Однопродуктовая динамическая модель замещения производственных фондов. Магистральные свойства // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. Т. 52. № 5. С. 801—817.
- Иванов Ю.Н. (ред.) (2002). Экономическая статистика. М.: ИНФРА-М.
- Клейнер Г.Б., Пионтковский Д.И. (2000). Многофакторные производственные функции с постоянными эластичностями предельной замены факторов // *Экономика и математические методы*. Т. 36. № 1. С. 90—114.
- Макаров В.Л., Айвазян С.А., Афанасьев М.Ю., Бахтизин А.Р., Нанавян А.М. (2016). Моделирование развития экономики региона и эффективность пространства инноваций // *Форсайт*. Т. 10. № 3. С. 76—90.

- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В.** (2019). Укрупненная агентно-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран Европейского союза // *Экономика и математические методы*. Т. 55. № 1. С. 3—15.
- Сидоренко В.Н.** (1998). Системная динамика. М.: Экономический факультет МГУ; ТЕИС.
- Акопов А.С., Beklaryan G.L.** (2014). Modelling the Dynamics of the “Smarter Region”. In: “Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computational Intelligence for Financial Engineering & Economics”. L.: IEEE. P. 203—209.
- Акопов А.С., Beklaryan L.A., Saghatelyan A.K.** (2017). Agent-Based Modelling for Ecological Economics: A Case Study of the Republic of Armenia // *Ecological Modelling*. Vol. 346. P. 99—118.
- Акопов А.С., Beklaryan L.A., Saghatelyan A.K.** (2019). Agent-Based Modelling of Interactions between Air Pollutants and Greenery Using a Case Study of Yerevan, Armenia // *Environmental Modelling and Software*. Vol. 116. P. 7—25.
- Arrow K.Z.** (1962). The Economic Implications of Learning by Doing // *Review of Economic studies*. Vol. 29. No. 3. P. 155—173.
- Cobb C.W., Douglas P.H.** (1928). A Theory of Production // *American Economic Review*. Vol. 18. P. 139—165.
- Forrester J.W.** (1959). Industrial Dynamics — a Major Breakthrough for Decision Makers // *Harvard Business Review*. Vol. 36. No. 4. P. 37—66.
- Forrester J.W.** (1969). Urban Dynamics. Cambridge: MIT Press.
- Komninos N.** (2008). Intelligent Cities and Globalisation of Innovation Networks. London, New York: Routledge. P. 308.
- Meadows D.H.** (1972). Limits to Growth: A Report for the Club of Rome’s Project on the Predicament of Mankind. New York: Universe Books.
- Meadows D.H., Randers J. Meadows D.L.** (2004). Limits to Growth — the 30 Year Update. White River Jct. (VT): Chelsea Green Publ. Co.
- Nordhaus W.D.** (2008). A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies. Warming Policies. New Haven & London: Yale University Press.
- Romer P.M.** (1990). Endogenous Technological Change // *Journal of Political Economy*. Vol. 98. No. 5. P. 71—102.
- Stewart Q.J.** (1950). The Development of Social Physics // *American Journal of Physics*. Vol. 18. P. 239—253.
- Whelpton P.K.** (1928). Population of the United States, 1925 to 1970 // *The American Journal of Sociology*. Vol. 34. No. 2. P. 253—270.
- Yap Y.L.** (1977). The Attraction of Cities: A Review of the Migration Literature // *Journal of Development Economics*. Vol. 4 (3). P. 239—264.

REFERENCES (with English translation or transliteration)

- Aivazian S.A., Afanasiev M.Y., Kudrov A.V.** (2016). Models of Productive Capacity and Technological Efficiency Evaluations of Regions of the Russian Federation Concerning the Output Structure. *Economics and Mathematics Methods*, 1, 28—44 (in Russian).
- Акопов А.С.** (2010). On the Issue of Developing of Intelligent Control Systems of Complex Organizational Structures (part I): Mathematical Support for Control System of the Vertically Integrated Oil Company Investment Activities. *Problemy upravleniya*, 6, 12—18 (in Russian).
- Акопов А.С.** (2011). On the Issue of Developing of Intelligent Control Systems of Complex Organizational Structures (part II): Software Support for Control System of the Vertically Integrated Oil Company Investment Activities. *Problemy upravleniya*, 1, 47—54 (in Russian).
- Акопов А.С.** (2012). System Dynamics Modeling of Banking Group Strategy. *Business-Informatics*, 2, 10—19 (in Russian).
- Акопов А.С., Beklaryan L.A.** (2015). An Agent Model of Crowd Behavior in Emergencies. *Automatic and Remote Control*, 10, 1817—1827.
- Акопов А.С., Beklaryan G.L.** (2014). Modelling the Dynamics of the “Smarter Region”. In: “Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computational Intelligence for Financial Engineering & Economics”. L.: IEEE, 203—209.
- Акопов А.С., Beklaryan G.L., Beklaryan L.A.** (2017). Agent-Based Modelling for Ecological-Economics System of a City (on Example of Yerevan, Republic of Armenia). *Artificial Societies*, 12 (3—4), 1—10 (in Russian).

- Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelyan A.K.** (2017). Agent-Based Modelling for Ecological Economics: A Case Study of the Republic of Armenia. *Ecological Modelling*, 346, 99—118.
- Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelyan A.K.** (2019). Agent-Based Modelling of Interactions between Air Pollutants and Greenery Using a Case Study of Yerevan, Armenia. *Environmental Modelling and Software*, 116, 7—25.
- Arrow K.Z.** (1962). The Economic Implications of Learning by Doing. *Review of Economic studies*, 29, 3, 155—173.
- Bakhtizin A.R., Bukhwalid E.M., Kolchugina A.V.** (2017). Economic Differentiation of Regions of Russia: New Estimates and Patterns. *ETAP: Economic Theory, Analysis, and Practice*, 1, 41—56 (in Russian).
- Beklaryan G.L.** (2018). Aggregated Simulation Model of Foreign Economic Activity of the Russian Federation. *Economics of Contemporary Russia*, 4, 50—65 (in Russian).
- Beklaryan L.A., Borisova S.V., Khachatryan N.K.** (2012). One-Product Dynamic Model of Replacement of Production Assets. Trunk Properties. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 52 (5), 801—817 (in Russian).
- Cobb C.W., Douglas P.H.** (1928). A Theory of Production. *American Economic Review*, 18, 139—165.
- Forrester J.W.** (1959). Industrial Dynamics — a Major Breakthrough for Decision Makers. *Harvard Business Review*, 36 (4), 37—66.
- Forrester J.W.** (1969). Urban Dynamics. Cambridge: MIT Press.
- Ivanov Y.N.** (ed.) (2002). Economic Statistics. [Ehkonomicheskaya statistika]. Moscow: INFRA-M (in Russian).
- Kleiner G.B., Piontkovsky D.I.** (2000). Multi-Factor Production Functions with Constant Marginalfactor Substitution Elasticity. *Economics and Mathematics Methods*, 36 (1), 90—114 (in Russian).
- Komninos N.** (2008). Intelligent Cities and Globalisation of Innovation Networks. London, New York: Routledge, 308.
- Makarov V., Ayvazyan S., Afanasyev M., Bakhtizin A., Nanavyan A.M.** (2016). Modeling the Development of Regional Economy and an Innovation Space Efficiency Foresight and STI Governance. *Foresight*, 10 (3), 76—90 (in Russian).
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Rovenskaya E.A., Strelkovskii N.V.** (2019). Aggregated Agent-Based Simulation Model of Migration Flows of the European Union Countries. *Economics and Mathematics Methods*, 55 (1), 3—15 (in Russian).
- Meadows D.H.** (1972). Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. New York: Universe Books.
- Meadows D.H., Randers J. Meadows D.L.** (2004). Limits to Growth — the 30 Year Update. Update. White River Jct. (VT): Chelsea Green Publ. Co.
- Nordhaus W.D.** (2008). A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies. New Haven & London: Yale University Press.
- Romer P.M.** (1990). Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*, 98, 5, 71—102.
- Sidorenko V.N.** (1998). System Dynamics. [Sistemnaya dinamika.] Moscow: Faculty of Economics, MSU, TEIS, 200 (in Russian).
- Stewart Q.J.** (1950). The Development of Social Physics. *American Journal of Physics*, 18, 239—253.
- Whelpton P.K.** (1928). Population of the United States, 1925 to 1970. *The American Journal of Sociology*, 34, 2, 253—270.
- Yap Y.L.** (1977). The Attraction of Cities: A Review of the Migration Literature. *Journal of Development Economics*, 4 (3), 239—264.

Simulation Model of a Region in Application to the Economy Analysis of Krasnoyarsk Region

© 2019 G.L. Beklaryan

CEMI RAS, Moscow, Russia
E-mail: glbeklaryan@gmail.com

Received 19.11.2018

The article presents an approach to the rational management of the region on the example of the Krasnoyarsk region using the methods of system dynamics. A simulation model of the region is developed, and the possibility of optimizing the key characteristics of such a system through the rational management of

multiple parameters, such as the rate of construction of new housing, the rate of growth of the housing services' costs, the rate of construction of social infrastructure (gardens, schools, hospitals), etc. The suggested model allows forming the forecast dynamics of the most important macroeconomic characteristics of the region, taking into account the internal direct and backward linkages between the various elements of such a system and the existing restrictions. The computer implementation of this model is performed in the simulation system Powersim, which supports the methods of system dynamics, as well as the possibility of finding suboptimal solutions using genetic optimization algorithms. An important optimization problem of the region to maximize the integral index — the Gross Regional Product under multiple constraints is formulated. To solve this optimization problem, a genetic optimization algorithm (GA) was chosen, the feature of which is the aggregation of the target functional with a simulation model of the region (implemented in Powersim). Numerical studies have been carried out to predict the GRP of the Krasnoyarsk Region under various scenario conditions, in particular, for the basic scenario, in which the current values of the control parameters of the system are stored and for the best scenario, in which the values of the corresponding control parameters are calculated as a result of solving the problem of the formulated optimization problem using the created optimization module (genetic algorithm). With the help of a simulation model on real data we demonstrated the possibility of improving the economic situation in the Krasnoyarsk Region, mainly due to increased investment in human capital, affecting the dynamics of scientific and technological progress and GRP, respectively.

Keywords: simulation modeling, regional economy, system dynamics, Krasnoyarsk Region.

JEL Classification: B22, C63, R11, R58.

DOI: 10.31857/S042473880005769-4