

DOI: 10.17323/2587-814X.2024.1.36.51

# Агентное моделирование и оптимизация характеристик научно-производственных кластеров

Г.Л. Бекларян 

E-mail: glbeklaryan@gmail.com

Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук  
Адрес: 117418, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 47

## Аннотация

В работе представлена разработанная агент-ориентированная имитационная модель развития научно-производственных кластеров России, реализованная на примере высокотехнологичных предприятий, расположенных в четырех наукоградах (г. Троицка, г. Обнинска, г. Пушкино и г. Протвино). Предложен новый подход к моделированию и оптимизации валового городского продукта (GMP), учитывающий влияние «гравитационного эффекта» на перераспределение трудовых ресурсов между развивающимися наукогородами и соответствующими предприятиями, объединенными в единые научно-производственные кластеры. Важным элементом такого подхода является формирование различных сценариев стратегического развития оцениваемых научно-производственных кластеров и поддержка возможности выбора наиболее предпочтительного сценария с использованием эволюционного оптимизационного алгоритма. Разработана и реализована в AnyLogic двухуровневая имитационная модель, описывающая возможные траектории развития научно-производственных кластеров с соответствующим изменением значений важнейших характеристик: численности экономически активного населения, количества научно-производственных предприятий, объема продукции выпускаемой в высокотехнологичных отраслях экономики, GMP и др. Спроектированный программный комплекс предназначен, в первую очередь, для управления научно-производственными кластерами, реализующими стратегию инновационного развития. Такой комплекс использует методы системной динамики и агентного имитационного моделирования, поддерживаемые в системе AnyLogic, генетические оптимизационные алгоритмы и ГИС-карты наукоградов и др. для реализации требуемой функциональности. Апробация программного комплекса выполнена с использованием реальных данных, опубликованных в утвержденных стратегиях развития соответствующих наукоградов. В результате проведенных численных экспериментов предложены некоторые рекомендации по развитию изучаемых научно-производственных кластеров с учетом их взаимовлияния и имеющейся ресурсной базы.

**Ключевые слова:** научно-производственный кластер, высокотехнологичное предприятие, наукоград, производственные характеристики, имитационное моделирование предприятий, валовый городской продукт, агентное моделирование, системная динамика, гравитационный эффект, производственная функция, AnyLogic

**Цитирование:** Бекларян Г.Л. Агентное моделирование и оптимизация характеристик научно-производственных кластеров // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18. № 1. С. 36–51. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.1.36.51

## Введение

**В** настоящее время весьма актуальной проблемой повышения эффективности системы государственного управления, является развитие научно-производственных кластеров с использованием имеющегося кадрового потенциала, в том числе, сформированного на базе научно-исследовательских институтов (НИИ) и научно-производственных объединений (НПО), имеющих опыт применения собственных разработок в реальном секторе экономики.

Определение наилучших сценариев развития для высокотехнологичных предприятий, расположенных в наукоградах, разработка и внедрение систем поддержки принятия решений для управления научно-производственными кластерами является важнейшим направлением бизнес-информатики, нацеленным на повышение эффективности управления процессами инновационного развития.

В качестве примера, рассмотрим высокотехнологичные предприятия, расположенные в наукоградах, которые можно объединить в рамках единой концептуальной модели инновационного развития, в рамках которой достижимо получение значительного синергетического эффекта, обусловленного, во-первых, возможностями кадровой кооперации, а также использованием общей высокотехнологичной ресурсной базы (например, суперкомпьютеров, центров обработки данных, промышленных систем 3D-печати интегральных микросхем и т.д.). В частности, высокотехнологичные предприятия, расположенные в таких городах как Троицк, Обнинск, Пущино, Протвино вблизи Московской агломерации и являющиеся по сути соседними, могут быть объединены в единые научно-производственные кластеры, в частности, для производства микроэлектронной элементной базы, продукции точного приборостроения и др. При этом важно обеспечить сбалансированное развитие высокотехнологичных предприятий всех малых городов, объединенных в

соответствующие научно-производственные кластеры, чтобы избежать одностороннего перетока высококвалифицированных кадров и обеспечить гармоничное стратегическое развитие всех агентов-предприятий (НИИ, НПО и др.), как существующих, так и формирующихся в соответствующих наукоградах.

Поэтому необходима разработка системы поддержки принятия решений (программного комплекса) для управления высокотехнологичными предприятиями, расположенными в наукоградах и реализующими стратегию инновационного развития. Подобный комплекс использует методы системной динамики и агентного имитационного моделирования, поддерживаемые в системе AnyLogic, генетические оптимизационные алгоритмы и ГИС-карты научно-производственных кластеров и др. для реализации требуемой функциональности.

Первой фундаментальной работой по исследованию динамики развития города и его предприятий является книга [1], в которой Дж. Форрестер сформулировал основные принципы построения имитационных моделей, описывающих различные сценарии эволюции городской среды с учетом сложной системы имеющихся обратных связей, лаговых зависимостей, внутренних городских взаимодействий и др.

Среди современных работ в данной области следует выделить [2–4], в которых методы системной динамики используются для изучения возможностей достижения устойчивого экономического развития крупных городов. В частности, в [2] для г. Пекин с использованием системно-динамического подхода смоделированы четыре сценария возможного развития. Показано, что динамика устойчивого развития города по-разному реализуется в течение трех периодов (от роста экономики города в начале к ее замедлению и последующему росту).

Среди недостатков использования методов системной динамики следует отметить трудности

моделирования внутренних взаимодействий, процессов перераспределения трудовых ресурсов, сложности с анализом пространственного развития города и др. Для преодоления подобных трудностей целесообразно использовать методы агентного имитационного моделирования, позволяющие смоделировать взаимодействия на микроскопическом уровне с учетом индивидуальных систем принятия решений каждого экономического агента [5, 6].

Среди важных работ в данной области следует выделить [7–10]. В частности, в [7] представлена укрупненная агент-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран Европейского Союза и описано влияние «гравитационного эффекта» на межстрановое перераспределение людских потоков. Подобный эффект возникает из-за факторов, влияющих на миграционное поведение людей, в частности, при наличии существенной разницы в соотношении заработной платы, размера рынка труда и валового внутреннего продукта (ВВП) на душу населения между данной страной (регионом) и соседними странами (регионами). Например, относительно низкий уровень заработной платы в сочетании с малым количеством имеющихся рабочих мест, как правило, приводит к оттоку населения в более благоприятные регионы. Также «гравитационный эффект» влияет и на внутреннюю миграцию населения между городами, когда население (и соответствующие трудовые ресурсы) перемещается из менее развитых агломераций в экономически более развитые. В [8] представлена агентная модель популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей. В подобной модели коренные жители нацелены на поиск высокотехнологичных рабочих мест, а мигранты – низкотехнологичных, что также актуально и для предприятий наукоградов, активно привлекающих внешние трудовые ресурсы. Агентное моделирование можно комбинировать с другими методами, например, системной динамикой, дискретно-событийном моделированием и др. для создания цифровых двойников сложных социально-экономических систем [9, 10]. Разрабатываемые имитационные модели могут быть агрегированы по целевым функционалам и ограничениям с эволюционными оптимизационными алгоритмами, в частности, генетическими алгоритмами [11, 12] для оптимизации характеристик подобных крупномасштабных систем. Агентные модели

территориального развития региональных и городских агломераций могут быть нацелены на решение важных экологических проблем, таких как снижение концентрации вредных выбросов в социально-значимых городских районах (например, вблизи детских садов и школ) за счет озеленения [13], сокращения выбросов со стороны промышленных предприятий за счет их экологической модернизации [14], экологической трансформации городской среды [15]. Для моделирования движения людских потоков и трудовых ресурсов в городской среде целесообразно использование феноменологического подхода, ранее предложенного в [16], который позволяет учесть различные сценарии взаимодействия различных агентов друг с другом, смоделировать поведение толпы и т.д. Также следует отметить работы [17–21], посвященные как методологическим вопросам [17], так и конкретным тематическим исследованиям, выполненным для изучения возможностей развития городской архитектуры [19], улучшения трафика [20], повышения отдачи в отдельных отраслях городской экономики [21].

Таким образом, комбинированное использование различных методов имитационного моделирования, эвристических оптимизационных алгоритмов и др., в частности, поддерживаемых в системе AnyLogic, позволяет спроектировать систему поддержки принятия решений для устойчивого экономического развития научно-производственных кластеров и соответствующих наукоградов.

Цель данной статьи состоит в разработке экономико-математического и компьютерного инструментария для исследования динамики развития отдельных научно-производственных кластеров РФ при различных сценарных условиях, в рамках которых обеспечивается сбалансированное развитие всех взаимодействующих экономических агентов-предприятий (НИИ, НПО и др.).

### **1. Имитационная модель развития научно-производственных кластеров**

В данном разделе представлена разработанная имитационная модель развития научно-производственных кластеров с реализацией на примере высокотехнологичных предприятий, расположенных в наукоградах Троицка, Обнинска, Пущино и Протвино. Предлагаемая агент-ориентированная модель состоит из нескольких взаимосвязанных уровней (*рис. 1*).

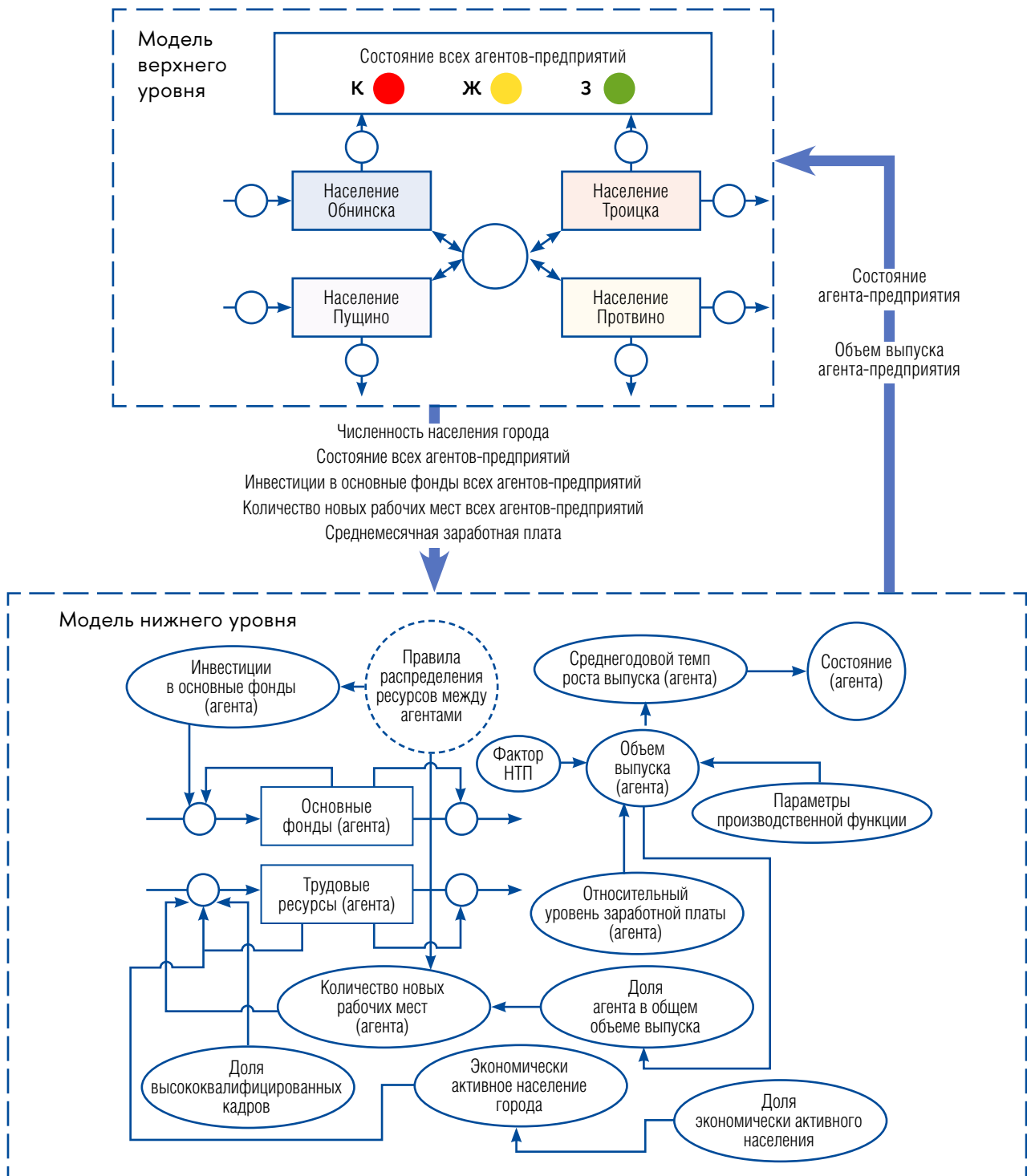


Рис. 1. Укрупненная архитектура имитационной модели научно-производственных кластеров.

Модель верхнего уровня – среда, в которой функционируют агенты-предприятия, относящиеся к различным городам, между которыми реализуется потоковое взаимодействие, в частности, перераспределение (внутренняя миграция) населения с

соответствующим изменением трудовых ресурсов, которые могут быть задействованы в высокотехнологическом секторе экономики (в НИИ, НПО и др.) в случае формирования новых рабочих мест (рис. 1). Подобное потоковое взаимодействие осуществля-

ется из-за влияния «гравитационного» эффекта [7], обусловленного различиями в уровне заработной платы, размера рынка труда и ВВП на душу населения в соответствующих наукоградах.

*Модель нижнего уровня* обеспечивает реализацию логики поведения агентов-предприятий, характеристики которых описываются с использованием методов системной динамики (рис. 1). Такие внутренние модели представляют собой системы конечно-разностные уравнений со своими ресурсными и целевыми характеристиками [11, 22]. При этом, для определения значений отдельных параметров требуется интеграция с верхним уровнем имитационной модели. В частности, основные управляющие параметры модели, значения которых должны быть одинаковыми для всех агентов, задаются на уровне среды. При этом, отдельные характеристики, вычисляемые на уровне агентов, используются в модели верхнего уровня, например, для вычисления GMP формируемого всеми предприятиями.

Для каждого агента-предприятия заданы три возможных состояния:

- ◆ первое, соответствующее низким темпам экономического роста и не превышающим заданное нижнее пороговое значение, выделяется «красным»;
- ◆ второе, соответствующее средним темпам экономического роста, значения которых находятся в интервале между нижним и верхним пороговыми значениями, выделяется «желтым»;
- ◆ третье, соответствующее высоким темпам экономического роста, значения которых превышают верхнее пороговое значение, выделяется «зеленым».

На темпы экономического роста агентов-предприятий (динамику GMP) влияют различные факторы, среди которых наиболее важными являются инвестиции в основной капитал, количество создаваемых рабочих мест, среднемесячная заработная плата и др. Также важны уже имеющиеся у предприятий производственные ресурсы (основные фонды, персонал), уровень научно-технического прогресса (НТП), способность привлечения высококвалифицированных кадров и др. В рамках разработанной модели, предлагается централизованное выделение ресурсов (инвестиций, новых рабочих мест и др.) с их последующим распределением по предприятиям каждого наукограда с учетом большей поддержки проблемных организаций, характеризующихся низкими темпами экономического роста. Подобный подход актуален, прежде всего, для государственных

предприятий, например, институтов РАН, НИИ, а также коммерческих организаций с существенным государственным участием.

Таким образом, важнейшей задачей рассматриваемой системы является минимизация общего количества проблемных («красных») предприятий при минимально необходимых инвестиционных и операционных затратах.

### 1.1. Модель перераспределения трудовых ресурсов

Модель верхнего уровня, представленная на рис. 1, обеспечивает реализацию логики перераспределения населения и трудовых ресурсов с учетом влияния «гравитационного эффекта». Впервые подобный эффект был описан в работах [23, 24] посвященных анализу поведения людей под воздействием социальных сил. В частности, на принятие решения о миграции в другой город оказывают множественные факторы: разница в заработной плате, размер рынка труда, ВВП на душу населения, климатические характеристики, уровень социальной обеспеченности и т.д. В большей степени «гравитационное» влияние подобной дифференциации проявляется на уровне стран, существенно отличающихся по уровню и качеству жизни. Однако, схожие факторы, способствующие миграции, действуют и в отношении городов, в том числе наукоградов, особенности которых позволяют их жителям перемещаться, оставаясь занятыми в высокотехнологичных отраслях экономики.

Пусть

- ◆  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{|T|}\}$  – набор моментов модельного времени (по годам),  $|T|$  – горизонт стратегического планирования (10 лет);
- ◆  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{|I|}\}$  – набор индексов наукоградов,  $|I|$  – общее количество наукоградов;
- ◆  $\{\nu_i, \eta_i\}$ ,  $i \in I$  – коэффициенты рождаемости и смертности в  $i$ -ом наукограде;
- ◆  $\{GMP_i(t_k), P_i(t_k)\}$ ,  $i \in I$  – валовый городской продукт и численность населения  $i$ -го наукограда в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ );
- ◆  $\{W_i(t_k), L_i(t_k)\}$ ,  $i \in I$  – уровень заработной платы и количество трудовых ресурсов  $i$ -го наукограда, занятых в высокотехнологичных отраслях экономики в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ );
- ◆  $\{\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3\} \in [0, 1]$  – весовые коэффициенты, определяющие уровень влияния отдельных факторов на миграционные потоки,  $\tilde{w}_1 + \tilde{w}_2 + \tilde{w}_3 = 1$ ;

♦  $\varkappa_i \in [0, 1]$  – коэффициент, определяющий уровень влияния «гравитационного эффекта» на эмиграцию в  $i$ -ом наукограде.

Темп эмиграции из  $i$ -го наукограда ( $i \in I$ ) в соседний  $\xi$ -й наукоград ( $\xi \in I, \xi \neq i$ ) в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ ) равен

$$E_{i\xi}(t_k) = \begin{cases} \varkappa_i \left( \frac{1}{g_{i\xi}(t_k)} - 1 \right) P_i(t_{k-1}), & \text{если } g_{i\xi}(t_k) < 1, \\ 0, & \text{если } g_{i\xi}(t_k) \geq 1, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\ln(g_{i\xi}(t_k)) = \tilde{w}_1 \ln\left(\frac{W_i(t_{k-1})}{W_\xi(t_{k-1})}\right) + \tilde{w}_2 \ln\left(\frac{L_i(t_{k-1})}{L_\xi(t_{k-1})}\right) + \tilde{w}_3 \ln\left(\frac{\frac{GMP_i(t_{k-1})}{P_i(t_{k-1})}}{\frac{GMP_\xi(t_{k-1})}{P_\xi(t_{k-1})}}\right). \quad (2)$$

Формулы (1)–(2) описывают влияние «гравитационного эффекта» на миграционные потоки. Выражение (2) отражает влияние таких ключевых факторов, как заработная плата  $W_i(t_{k-1})$ , количество занятых трудовых ресурсов  $L_i(t_{k-1})$  и ВВП на душу населения

$$\frac{GMP_i(t_{k-1})}{P_i(t_{k-1})}$$

на миграционное поведение людей (т.е. темпы миграции) в  $i$ -ом наукограде ( $i \in I$ ). Выбор таких факторов обусловлен, прежде всего, наблюдаемой разницей в их значениях применительно к рассматриваемым наукографам (т.е. г. Троицк, г. Обнинск и др.). Влияние других потенциально важных характеристик, например, различий в климате, транспортной доступности, экологии и др., не существенно из географической близости и пространственной однородности изучаемых агломераций. Использование относительных и масштабированных (логарифмированных) значений влияющих факторов позволяет выполнить их агрегирование с использованием (2) для последующего вычисления темпов миграции в соседние наукограды.

Из (1)–(2) следует, что, если данный наукоград менее привлекателен по сравнению с соседним, в котором более высокая заработная плата, большее количество рабочих мест и больше ВВП на душу населения, то формируется положительный эмиграционный поток в данный наукоград. Возмож-

на и обратная ситуация, когда данный наукоград является более привлекательным для жителей соседних городов. В этом случае будет обеспечено формирование положительных иммиграционных потоков.

Численность населения  $i$ -го наукограда ( $i \in I$ ) с учетом эмиграции в соседние  $\xi$ -ые наукограды ( $\xi \in I, \xi \neq i$ ), иммиграции из соседних  $\xi$ -ые наукоградов ( $\xi \in I, \xi \neq i$ ), а также рождаемости и смертности в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ ) равна

$$P_i(t_k) = P_i(t_{k-1}) - \sum_{\xi=1}^{|I|} E_{i\xi}(t_k) + \sum_{\xi=1}^{|I|} E_{\xi i}(t_k) + v_i P_i(t_{k-1}) - \eta_i P_i(t_{k-1}). \quad (3)$$

Вместе с перераспределением численности населения между соседними наукографами, соответствующим образом реализуется перераспределение высококвалифицированной рабочей силы.

Количество трудовых ресурсов, которые могут быть задействованы на высокотехнологичных предприятиях  $i$ -го наукограда ( $i \in I$ ) в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ ) равно

$$L_i^*(t_k) = \mu_i \omega_i P_i(t_k), \quad (4)$$

где

$\mu_i \in [0, 1]$  – доля экономически активного населения в  $i$ -ом наукограде ( $i \in I$ );

$\omega_i \in [0, 1]$  – доля высококвалифицированных трудовых ресурсов от экономического активного населения в  $i$ -ом наукограде ( $i \in I$ ).

## 1.2. Модель поведения агентов-предприятий

Модель нижнего уровня, представленная на рис. 1 используется для вычисления динамики среднегодовых темпов роста выпуска агентов-предприятий с соответствующей оценкой состояний таких агентов. Наиболее важной характеристикой подобных предприятий является производственная функция, описывающая влияние основных фондов, трудовых ресурсов, уровня научно-технического развития и других факторов на динамику объема выпуска. Подробное описание принципов построения производственных функций в том числе типа Кобба-Дугласа, используемых в данной работе, представлено в [25, 26]. Также имеются примеры построения мультипликативных производственных функций, учитывающих влияние заработной платы на объем выпуска, как фактора,

существенно влияющего на производительность трудовых ресурсов (например, [27]). Особенностью производственной функции, предлагаемой в данной статье, является принятие во внимание относительного (по отношению ко всем соседним наукоградом) уровня заработной платы. Чем выше этот уровень, тем более квалифицированные трудовые ресурсы могут быть задействованы на предприятиях данного города.

Пусть,

- ◆  $J_i = \{j_{i1}, j_{i2}, \dots, j_{i|J_i|}\}$ ,  $i \in I$  – набор индексов агенто-предприятий расположенных в  $i$ -ом наукограде,  $|J_i|$  – общее количество предприятий;
- ◆  $s_{j_i}(t_k) \in \{1, 2, 3\}$  – состояния  $j_i$ -го агента-предприятия  $i$ -го наукограда в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ ):  $s_{j_i}(t_k) = 1$  – первое состояние, соответствующее низким темпам экономического роста («красное»),  $s_{j_i}(t_k) = 2$  – второе состояние, соответствующее средним темпам экономического роста («желтое»),  $s_{j_i}(t_k) = 3$  – третье состояние, соответствующее высоким темпам экономического роста («зеленое»);
- ◆  $\{\tilde{K}_{j_i}(t_k), \tilde{L}_{j_i}(t_k)\}$ ,  $i \in I, j_i \in J_i$  – основные фонды и трудовые ресурсы  $j_i$ -го агента-предприятия  $i$ -го наукограда в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ );
- ◆  $\{\delta\tilde{K}_{j_i}(t_k), \delta\tilde{L}_{j_i}(t_k)\}$ ,  $i \in I, j_i \in J_i$  – темпы ввода новых основных фондов и трудовых ресурсов  $j_i$ -го агента-предприятия  $i$ -го наукограда в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ );
- ◆  $\{Q_i(t_k), Y_i(t_k)\}$ ,  $i \in I$  – инвестиции в основные фонды и количество новых рабочих мест, выделяемых  $i$ -ому наукограду в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ );
- ◆  $\{\alpha_{j_i}, \beta_{j_i}\}$  ( $0, 1$ ),  $i \in I, j_i \in J_i$  – коэффициенты эластичности выпуска по отношению к основным фондам и трудовым ресурсам  $j_i$ -го агента-предприятия  $i$ -го наукограда,  $\alpha_{j_i} + \beta_{j_i} = 1$ ;
- ◆  $A_{j_i}$ ,  $i \in I, j_i \in J_i$  – фактор (коэффициент), отражающий влияние научно-технического прогресса (НТП) на динамику объема выпуска;
- ◆  $\{\mu, \iota\}$  – известные коэффициенты выбытия основных фондов и трудовых ресурсов, соответственно.

Тогда, объем выпуска  $j_i$ -го агента-предприятия ( $j_i \in J_i$ )  $i$ -го наукограда ( $i \in I$ ) может быть задан с использованием производственной функции типа Кобба-Дугласа в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ ):

$$\tilde{V}_{j_i}(t_k) = A_{j_i} S_{j_i} \left( \tilde{K}_{j_i}(t_k) \right)^{\alpha_{j_i}} \left( \tilde{L}_{j_i}(t_k) \right)^{\beta_{j_i}}, \quad (5)$$

где

$$S_{j_i} = \frac{W_i}{\frac{1}{|I|} \sum_{i=1}^{|I|} W_i}, \quad (6)$$

$$\tilde{K}_{j_i}(t_k) = \tilde{K}_{j_i}(t_{k-1}) + \delta\tilde{K}_{j_i}(t_k) - \mu\tilde{K}_{j_i}(t_{k-1}), \quad (7)$$

$$\tilde{L}_{j_i}(t_k) = \tilde{L}_{j_i}(t_{k-1}) + \delta\tilde{L}_{j_i}(t_k) - \iota\tilde{L}_{j_i}(t_{k-1}), \quad (8)$$

$$\delta\tilde{K}_{j_i}(t_k) = \begin{cases} Q_i(t_k) \frac{\tilde{V}_{j_i}(t_{k-1})}{\sum_{j_i=1}^{|J_i|} \tilde{V}_{j_i}(t_{k-1})} \left( 1 + \gamma \frac{\sum_{j_i=1}^{|J_i|} r_{j_i}(t_{k-1})}{|J_i|} \right), & \text{если } s_{j_i}(t_{k-1}) = 1, \\ Q_i(t_k) \frac{\tilde{V}_{j_i}(t_{k-1})}{\sum_{j_i=1}^{|J_i|} \tilde{V}_{j_i}(t_{k-1})} \left( 1 - \gamma \frac{\sum_{j_i=1}^{|J_i|} r_{j_i}(t_{k-1})}{|J_i|} \right), & \text{если } s_{j_i}(t_{k-1}) = 3, \end{cases} \quad (9)$$

$$\delta\tilde{L}_{j_i}(t_k) = \begin{cases} Y_i(t_k) \frac{\tilde{V}_{j_i}(t_{k-1})}{\sum_{j_i=1}^{|J_i|} \tilde{V}_{j_i}(t_{k-1})} \left( 1 + \gamma \frac{\sum_{j_i=1}^{|J_i|} r_{j_i}(t_k)}{|J_i|} \right), & \text{если } s_{j_i}(t_{k-1}) = 1, \\ Y_i(t_k) \frac{\tilde{V}_{j_i}(t_{k-1})}{\sum_{j_i=1}^{|J_i|} \tilde{V}_{j_i}(t_{k-1})} \left( 1 - \gamma \frac{\sum_{j_i=1}^{|J_i|} r_{j_i}(t_k)}{|J_i|} \right), & \text{если } s_{j_i}(t_{k-1}) = 3, \end{cases} \quad (10)$$

$$r_{j_i}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } s_{j_i}(t_k) = 1, \\ 0, & \text{если } s_{j_i}(t_k) \neq 1. \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 2 показана карта состояний (state-flow chart)  $j_i$ -го агента-предприятия ( $j_i \in J_i$ )  $i$ -го наукограда ( $i \in I$ ), реализующая правила перехода к новым состояниям  $s_{j_i}(t_k) \in \{1, 2, 3\}$ .

Переходы к новым состояниям (обозначены знаком  $\textcircled{?}$  на рис. 2) осуществляются с использованием следующего правила:

$$s_{j_i}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{1}{t_k} \sum_{\tilde{t}_{k-1}}^{t_k} \frac{\tilde{V}_{j_i}(\tilde{t}_k)}{\tilde{V}_{j_i}(\tilde{t}_{k-1})} < \varphi_1, \\ 2, & \text{если } \varphi_1 \leq \frac{1}{t_k} \sum_{\tilde{t}_{k-1}}^{t_k} \frac{\tilde{V}_{j_i}(\tilde{t}_k)}{\tilde{V}_{j_i}(\tilde{t}_{k-1})} < \varphi_2, \\ 3, & \text{если } \frac{1}{t_k} \sum_{\tilde{t}_{k-1}}^{t_k} \frac{\tilde{V}_{j_i}(\tilde{t}_k)}{\tilde{V}_{j_i}(\tilde{t}_{k-1})} \geq \varphi_2. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь  $\{\varphi_1, \varphi_2\}$  – заданные пороговые значения, определяющие условия соответствия агентов-предприятий состояниям низкого, среднего и высокого темпов экономического роста.

Предлагаемая модель учитывает влияние относительного уровня заработной платы (6) на объем выпуска (5). Использование соотношений (9)–(11) позволяет обеспечить приоритетную поддержку агентов-предприятий, находящихся в первом состоянии низких темпов экономического роста. Здесь  $\gamma \in [0, 1]$  – коэффициент, определяющий общий уровень подобной поддержки. Таким образом, инвестиции в основные фонды и новые рабочие места, выделяемые для каждого наукограда, распределяются между «проблемными» агентами-предприятиями пропорционально их вкладу в совокупный выпуск.

### 1.3. Постановка оптимизационной задачи

Итак, рассматривается система, в которой требуется обеспечить минимизацию общего количества предприятий, характеризующихся низкими темпами экономического роста для всех выбранных наукоградов. Для устойчивого развития научных кластеров желательно обеспечить переход боль-

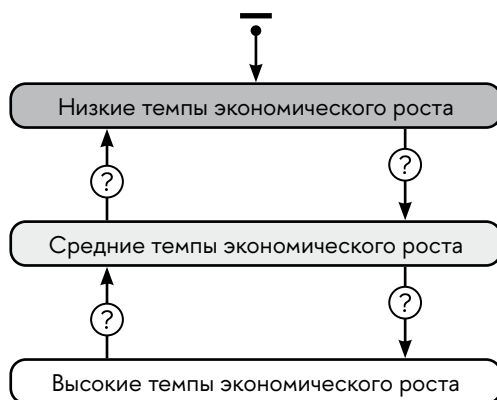


Рис. 2. Карта состояний (state-flow chart) агента-предприятия.

шей части проблемных предприятий к состояниям среднего и высокого темпов экономического роста и сохранение таких благоприятных состояний на максимально длительном временном интервале. Однако, в текущих условиях дефицита инвестиционного капитала, а также ограниченных возможностей по созданию новых высокотехнологичных рабочих мест, важно найти такие состояния и режимы функционирования системы, при которых минимизация числа проблемных организаций достигается с минимальными затратами хотя бы к некоторому заданному моменту модельного времени. В результате будет обеспечено качественное улучшение характеристик соответствующих предприятий, практически гарантирующее сохранение достигнутых ими состояний на достаточно длительном временном интервале в силу инерционности значений производственных факторов. При отсутствии статистической информации об имеющихся бюджетных и инвестиционных ограничениях, обосновано сведение подобной оптимизационной задачи к однокритериальной со следующим целевым функционалом, оцениваемым в конечный момент модельного времени  $t_{|T|}$ , ( $t_{|T|} \in T$ ):

$$N(t_{|T|}) = n_1 \sum_{i=1}^{|I|} \sum_{j=1}^{|J_i|} r_{j_i}(Q_i(t_k), Y_i(t_k), W_i(t_k)) + n_2 \sum_{i=1}^{|I|} Q_i(t_k) + n_3 \sum_{i=1}^{|I|} (Y_i(t_k)W_i(t_k)), \quad (13)$$

где

$$r_{j_i}(Q_i(t_k), Y_i(t_k), W_i(t_k)) = \begin{cases} 1, & \text{если } s_{j_i}(t_k) = 1, \\ 0, & \text{если } s_{j_i}(t_k) \neq 1. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь,

- ♦  $\{Q_i(t_k), Y_i(t_k), W_i(t_k)\}$ ,  $i \in I$  – инвестиции в основные фонды, количество новых рабочих мест и заработная плата в  $i$ -ом наукограде в момент  $t_k$ , ( $t_k \in T$ ) – управляющие параметры модели;
- ♦  $\{n_1, n_2, n_3\}$  – коэффициенты нормализации факторов, используемые для приведения значений элементов целевого функционала к одному масштабу.

Выбор значений управляющих параметров модели осуществляется в каждый момент времени  $t_k$ , ( $t_k \in T$ ) и приводит к изменению производственных характеристик агентов-предприятий, т.е. основных фондов, трудовых ресурсов и объемов выпуска в соответствии с (5)–(11). В результате, обеспечивается воздействие на среднегодовые темпы эко-



номического роста и состояния соответствующих предприятий, см. (12)–(14).

Тогда можно сформулировать оптимизационную задачу в следующем виде.

**Задача А.** Требуется минимизировать значение общего количества предприятий, характеризуемых низкими темпами экономического роста в конечный момент модельного времени  $t_{|T|}$ , ( $t_{|T|} \in T$ ), а также инвестиционные и операционные расходы, связанные с реализацией данной стратегии:

$$\min_{\{Q_i(t_k), Y_i(t_k), W_i(t_k)\}_{k=1}^{|T|}} N(t_{|T|}) \quad (15)$$

при ограничениях

$$\underline{Q} \leq Q_i(t_k) \leq \bar{Q}, \quad \underline{Y} \leq Y_i(t_k) \leq \bar{Y}, \quad \underline{W} \leq W_i(t_k) \leq \bar{W}, \\ i \in I, k = 1, 2, \dots, |T|.$$

Здесь  $\{Q, Y, W\}$ ,  $\{\bar{Q}, \bar{Y}, \bar{W}\}$  – известные нижние и верхние значения управляющих параметров имитационной модели.

**Задача А** может быть решена с использованием генетического оптимизационного алгоритма, агрегированного по целевому функционалу с предложенной имитационной моделью. Реализация подобных алгоритмов основана на методах эволюционного поиска наилучших потенциальных реше-

ний и подробно описана в [12, 28]. Для упрощения рассматриваемой задачи, значения управляющих параметров в подобной системе могут быть заданы для каждого  $i$ -го наукограда ( $i \in I$ ) как константы в начальный момент модельного времени.

## 2. Программная реализация модели

Программная реализация разработанной имитационной модели (1)–(15) выполнена в системе AnyLogic. Особенностью предлагаемого подхода является использование ГИС-карт для визуализации состояний агентов-предприятий, размещаемых в заданных пространственных координатах, а также интеграция модели с ранее разработанным генетическим оптимизационным алгоритмом [28], что, в частности, обеспечивает решение **Задачи А**.

Разработанный программный комплекс обеспечивает возможность навигации по всем изучаемым наукоградом, варьирования значениями управляющих параметров модели, визуализации состояний агентов-предприятий на карте.

На *рис. 3* показана реализация модели перераспределения населения и трудовых ресурсов между рассматриваемыми наукоградом (модели верхнего уровня) в AnyLogic.

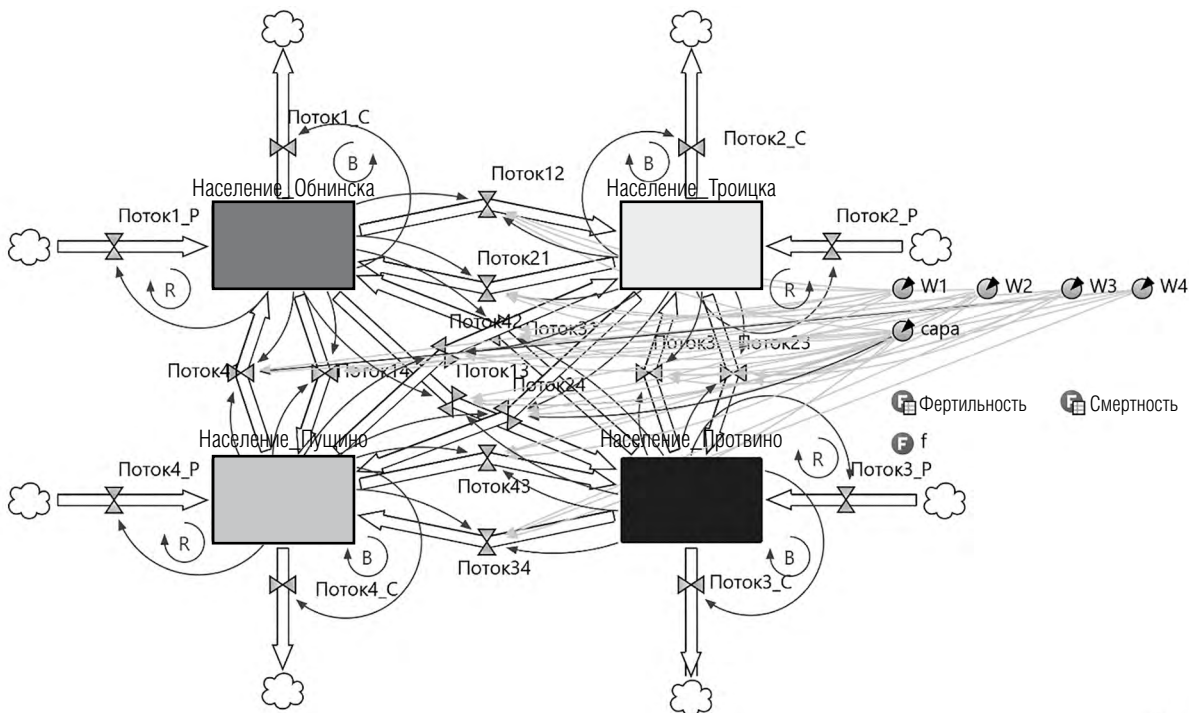


Рис. 3. Модель перераспределения трудовых ресурсов между в AnyLogic.

Из рис. 3 видно, что для построения данной модели используются методы системной динамики (см. например, [11, 22]). Численность населения Обнинска, Троицка, Протвино и Пушкино моделируется с использованием четырех системных уровней («резервуаров»), взаимодействующих посредством потоков с темпами, значения которых зависят от разницы в уровне заработной платы, размера рынка труда и др. Таким образом, моделируется влияние «гравитационного эффекта» на темпы внутренней миграции. Также учитываются коэффициенты фертильности и смертности со своими известными значениями. Имеющиеся в модели усиливающие и балансирующие обратные связи отмечены буквами **R** и **B**, соответственно (рис. 3).

На рис. 4 показана реализация модели поведения агентов-предприятий (модели нижнего уровня) в AnyLogic.

Из рис. 4 видно, что для построения данной модели используются как методы системной динамики, так и агентного моделирования (см. например, [5, 6, 13, 14, 16]). В частности, для моделирования возможных изменений состояний агентов, в соответствии с заданными правилами, используется карта состояний (элемент **statechart** на рис. 4). При

этом, для определения значений среднегодового темпа роста выпуска, значение которого сравнивается с заданными пороговыми значениями для реализации переходов между состояниями каждого агента, вычисляется с использованием модели системной динамики (левая часть рис. 4). Подобная модель использует функцию типа Кобба-Дугласа (см. (5)–(11)) для вычисления объема выпуска с учетом значений управляющих параметров. Результаты имитационного моделирования, в частности, состояние каждого агента-предприятия, объем выпуска, трудовые ресурсы и др. автоматически выгружаются в модель верхнего уровня и используется для симуляции «гравитационного эффекта», определяющего процесс перераспределения населения и трудовых ресурсов (рис. 3).

### 3. Результаты оптимизационных экспериментов

Для улучшения состояний всего ансамбля агентов-предприятий, в частности, минимизации количества организаций с низкими темпами экономического роста (менее 2% в год), были проведены оптимизационные эксперименты, нацеленные на поиск рекомендуемых значений управляющих па-

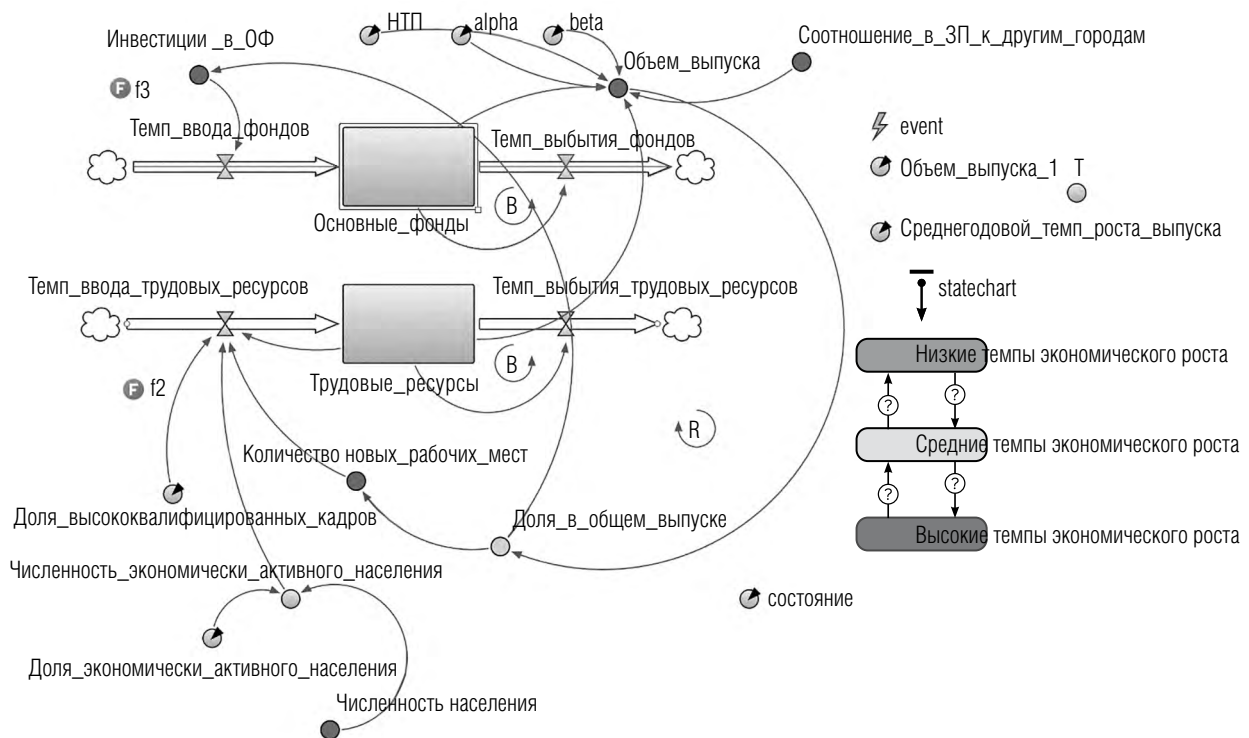


Рис. 4. Модель поведение агентов-предприятий в AnyLogic.

Таблица 1.

## Пример исходных данных по агентам-предприятия для г. Обнинск (за 2016 г.)

№	Предприятие	Долгота	Широта	Трудовые ресурсы, чел.	Инвестиции в основные фонды, тыс. руб.	Основные фонды, тыс. руб.	Объем выпуска, тыс. руб.
1	АО «ГНЦ РФ-ФЗИ»	55.089851	36.591257	2612	14782	594124	3199431
2	АО «ОНПП «Технология»	55.105885	36.636379	2641	488089	6527163	5856985
3	АО «ГНЦ РФ НИФХИ»	55.063435	36.623261	528	103226	1300044	803209
4	МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» МЗ РФ	55.111844	36.617534	1559	136132	2230550	2052357
5	НПО «Тайфун»	55.104454	36.609027	580	1551	80820	293792
6	ВНИИРАЭ	55.106651	36.638687	270	3058	110706	242231
7	Публичное акционерное общество «Приборный завод «Сигнал»	55.11013	36.59102	308	48217	996640	1061128
8	Общество с ограниченной ответственностью «Хемофарм»	55.13496	36.6424	209	169412	2247154	1374894
9	Акционерное общество «Прогресс-экология»	55.12122	36.58286	236	14758	696989	1709746
10	Общество с ограниченной ответственностью «Ниармедик Фарма»	55.11442	36.61703	125	2810003	29994145	3506284

раметров модели. В качестве исходных данных были использованы укрупненные статические данные наукоградов указанные в [29], а также стратегии социально-экономического развития наукоградов, опубликованные на сайтах городских администраций. Пример исходных данных по агентам-предприятиям для г. Обнинск представлен в *таблице 1*.

На *рис. 5* представлена визуализация состояний агентов-предприятий, полученная в результате оптимизации значений управляющих параметров имитационной модели («сценарий на основе рекомендуемых параметров») в сравнении с ранее утвержденными инвестиционными и кадровыми стратегиями («базовый сценарий (до оптимизации)»).

Состояния агентов-предприятий, представленные на *рис. 5*, соответствуют десятилетнему горизонту стратегического планирования. Сценарий изменений подобных состояний на основе рекомендуемых параметров (*рис. 5*) был сформирован с помощью генетического оптимизационного алгоритма, агрегированного по целевому функционалу с разработанной имитационной моделью, реализованной в AnyLogic. В *таблице 2* представлены значения управляющих параметров модели, советуемые рассматриваемым сценариям.

Из *таблицы 2* следует, что для улучшения состояний агентов-предприятий в изучаемых наукоградах необходимо существенно увеличить инвестиции в основные фонды (преимущественно в

г. Обнинск	Базовый сценарий (до оптимизации)	Сценарий на основе рекомендуемых параметров
ООО «Хемофарм»	К	Ж
АО «Прогресс-экология»	З	З
ООО «Ниармедик Фарма»	К	Ж
МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» МЗ РФ	Ж	Ж
ПАО «Приборный завод «Сигнал»	Ж	З
АО «ОНПП «Технология»	Ж	Ж
НПО «Тайфун»	З	З
АО «ГНЦ РФ-ФЗИ»	З	З
ВНИИРАЭ	З	З
АО «ГНЦ РФ НИФХИ»	К	Ж

К                      Ж                      З

Первое состояние (низкие темпы роста)      Второе состояние (средние темпы роста)      Третье состояние (высокие темпы роста)

Рис. 5. Состояния агентов-предприятий до и после оптимизации.

Таблица 2.

## Значения управляющих параметров модели

Управляющие параметры	Наукоград	Базовый сценарий (до оптимизации)	Сценарий на основе рекомендуемых параметров
Инвестиции в основные фонды (млн руб./год)	г. Обнинск	3320	4341
	г. Троицк	453	3108
	г. Протвино	246	2252
	г. Пущино	374	2100
Количество новых рабочих мест (ед./год)	г. Обнинск	1000	3020
	г. Троицк	500	2550
	г. Протвино	300	1551
	г. Пущино	200	1121
Среднемесячная заработная плата (руб./мес.)	г. Обнинск	62 000	72 000
	г. Троицк	66 000	66 000
	г. Протвино	60 000	60 000
	г. Пущино	45 000	55 000

Троицке, Протвино и Пущино), а также кратно увеличить количество создаваемых рабочих мест. При этом, рекомендуется увеличить уровень заработной платы в Обнинске и Пущино, чтобы предотвратить отток кадров в соседние города (в частности, в г. Троицк). В результате, будет обеспечено принципиальное улучшение состояний агентов-предприятий (см. рис. 5), большинство из которых перейдет к третьему состоянию высоких темпов экономического роста.

### Заключение

В данной работе представлена новая агент-ориентированная имитационная модель развития отдельных научно-производственных кластеров России с реализацией в системе AnyLogic. Разработанная модель состоит из двух уровней (рис. 1). Модель верхнего уровня реализует среду, в которой функционируют агенты-предприятия, относящиеся к различным наукоградом, между которыми реализуется потоковое взаимодействие с соответствующим перераспределением численности населения и трудовых ресурсов. Модель нижнего уровня обеспечивает реализацию логики поведения агентов-предприятий, характеристики которых описываются с использованием методов системной динамики. Сформулирована важная оптимизационная задача по минимизации общего

количества предприятий, характеризуемых низкими темпами экономического роста с учетом инвестиционных и операционных расходов. Предложенная двухуровневая имитационная модель реализована в виде программного комплекса (на примере научно-производственных кластеров Обнинска, Троицка, Протвино и Пущино), предназначенного, в первую очередь для органов муниципального и регионального управления, реализующих стратегию инновационного развития. Использование такой системы, позволило сформировать рекомендуемые значения управляющих параметров (таких как, инвестиции в основные фонды, количество новых рабочих мест и др.), обеспечивающие существенное улучшение состояний агентов-предприятий, расположенных в изучаемых наукоградах на десятилетнем горизонте стратегического планирования (рис. 5 и табл. 2). Разработанный экономико-математический и компьютерный инструментарий предназначен, в первую очередь для управления научно-производственными кластерами реализующих стратегию инновационного развития.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение проблем, связанных с преодолением дефицита высококвалифицированной рабочей силы, а также созданием детализированных агент-ориентированных моделей развития научно-производственных кластеров. ■

## Литература

1. Forrester J. W. *Urban Dynamics*. M.I.T. Press, Cambridge, 1969.
2. Li G., Kou C., Wang Y., Yang H. System dynamics modelling for improving urban resilience in Beijing, China // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 161. Art. No. 104954. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104954>
3. Diemer A., Nedelciu C.E. System dynamics for sustainable urban planning // *Sustainable Cities and Communities*. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals (eds. W. Leal Filho, A. Marisa Azul, L. Brandli, P. Gökçin Özuyar, T. Wall). Springer, Cham. 2020. P. 760–773. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95717-3\\_115](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95717-3_115)
4. Armenia S., Barnabè F., Pompei A., Scolozzi R. System dynamics modelling for urban sustainability // *Urban Sustainability*. Springer Texts in Business and Economics (eds. J. Papathanasiou, G. Tsaples, A. Blouchoutzi). Springer, Cham. 2021. P. 131–173. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-67016-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-67016-0_4)
5. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Эпштейн Д. Агент-ориентированное моделирование для сложного мира. Часть 1 // *Экономика и математические методы*. 2022. Т. 58. № 1. С. 5–26. <https://doi.org/10.31857/S042473880018970-6>
6. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Эпштейн Д. Агент-ориентированное моделирование для сложного мира. Часть 2 // *Экономика и математические методы*. 2022. Т. 58. № 2. С. 7–21. <https://doi.org/10.31857/S042473880020009-8>
7. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В. Укрупненная агент-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран Европейского Союза // *Экономика и математические методы*. 2019. Т. 55. № 1. С. 3–15. <https://doi.org/10.31857/S042473880004044-7>
8. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н. Агентное моделирование популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей // *Экономика и математические методы*. 2020. Т. 56. № 2. С. 5–19. <https://doi.org/10.31857/S042473880009217-7>
9. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик // *Бизнес-информатика*. 2021. Т. 15. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20>
10. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Разработка программной платформы для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования сложных социальных систем // *Программная инженерия*. 2019. Т. 10. № 4. С. 167–177. <https://doi.org/10.17587/prin.10.167-177>
11. Akopov A.S. Designing of integrated system-dynamics models for an oil company // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2012. Vol. 45. No. 4. P. 220–230. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2012.051122>
12. Akopov A.S. Parallel genetic algorithm with fading selection // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2014. Vol. 49. Nos. 3–4. P. 325–331. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.062368>
13. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian A.K. Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia // *Environmental Modelling & Software*. 2019. Vol. 116. P. 7–25. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.003>
14. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian A.K. Agent-based modelling for ecological economics: a case study of the republic of Armenia // *Ecological Modelling*. 2017. Vol. 346. P. 99–118. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.11.012>
15. Кислицын Е.В., Гоголин В.В. Имитационное моделирование экологической ситуации в мегаполисе // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2021. № 1(37). С. 92–106. <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2021-1-8>
16. Акопов А.С., Бекларян Л.А. Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // *Автоматика и телемеханика*. 2015. № 10. С. 131–143. <https://doi.org/10.1134/S0005117915100094>
17. Crooks A., Heppenstall A., Malleon N., Manley E. Agent-based modeling and the city: A gallery of applications // *Urban Informatics*. The Urban Book Series (eds. W. Shi, M.F. Goodchild, M. Batty, M.P. Kwan, A. Zhang). Springer, Singapore. 2021. P. 885–910. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6\\_46](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_46)
18. Chen L. Agent-based modeling in urban and architectural research: A brief literature review // *Frontiers of Architectural Research*. 2012. Vol. 1. No. 2 P. 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2012.03.003>
19. Tian G., Qiao Z. Modeling urban expansion policy scenarios using an agent-based approach for Guangzhou Metropolitan Region of China // *Ecology and Society*. 2014. Vol. 19. No. 3. Art. No. 52. <https://doi.org/10.5751/ES-06909-190352>
20. Yun, T.-S., Kim D., Moon, I.-C., Bae J.W. Agent-based model for urban administration: A case study of bridge construction and its traffic dispersion effect // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2022. Vol. 25. No. 4. Art. No. 5. <https://doi.org/10.18564/jasss.4923>
21. Ghandar A., Theodoropoulos, G., Zhong M., Zhen B., Chen S., Gong Y., Ahmed A. An agent-based modelling framework for urban agriculture // *2019 Winter Simulation Conference (WSC)*, National Harbor, MD, USA. 2019. P. 1767–1778. <https://doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004854>

22. Акопов А.С. Системно-динамическое моделирование стратегии банковской группы // Бизнес-информатика. 2012. № 2(20). С. 10–19.
23. Stewart Q.J. The development of social physics // American Journal of Physics. 1950. Vol. 18. P. 239–253. <https://doi.org/10.1119/1.1932559>
24. Yap Y.L. The attraction of cities: A review of the migration literature // Journal of Development Economics. 1977. Vol. 4. No. 3. P. 239–264. [https://doi.org/10.1016/0304-3878\(77\)90030-x](https://doi.org/10.1016/0304-3878(77)90030-x)
25. Клейнер Г.Б. Производственные функции. Теория, методы, применение. М.: Финансы и статистика, 1986.
26. Суворов Н.В., Ахунов Р.Р., Губарев Р.В., Дзюба Е.И., Файзуллин Ф.С. Применение производственной функции Кобба – Дугласа для анализа промышленного комплекса региона // Экономика региона. 2020. Т. 16. № 1. С. 187–200. <https://doi.org/10.17059/2020-1-14>
27. Hellerstein J.K., Neumark D. Production function and wage equation estimation with heterogeneous labor: Evidence from a new matched employer-employee data set // Hard-to-Measure Goods and Services: Essays in Honor of Zvi Griliches (eds. Ernst R. Berndt and Charles R. Hulten). Chicago: University of Chicago Press. 2007. P. 31-72. [Электронный ресурс]: <https://www.nber.org/system/files/chapters/c0873/c0873.pdf> (дата обращения 21.02.2024).
28. Beklaryan G.L., Акопов А.С., Khachatryan N.K. Optimisation of system dynamics models using a real-coded genetic algorithm with fuzzy control // Cybernetics and Information Technologies. 2019. Vol. 19. No. 2. P. 87–103. <https://doi.org/10.2478/cait-2019-0017>
29. Справка о результатах анализа соответствия показателей научно-производственных комплексов наукоградов Российской Федерации требованиям, установленным пунктом 8 статьи 2.1 Федерального закона № 70-ФЗ «О статусе наукограда Российской Федерации», и достижения результатов, предусмотренных планами мероприятий по реализации стратегий социально-экономического развития наукоградов Российской Федерации в 2022 году [Электронный ресурс]: <https://minobrnauki.gov.ru/upload/iblock/77c/cemgzf9g61hhktvme7dfmm9feddbfzv.pdf> (дата обращения 21.02.2024).

### Об авторе

#### **Бекларян Гаянэ Леоновна**

кандидат экономических наук;

старший научный сотрудник, отделение теоретической экономики и математических исследований, лаборатория компьютерного моделирования социально-экономических процессов, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, Россия, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

E-mail: [glbeklaryan@gmail.com](mailto:glbeklaryan@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1286-0345

# Agent-based modeling and optimization of the characteristics for research-and-production clusters

## **Gayane L. Beklaryan**

E-mail: [glbeklaryan@gmail.com](mailto:glbeklaryan@gmail.com)

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences  
Address: 47, Nakhimovsky Ave., Moscow 117418, Russia

## Abstract

This paper presents a developed agent-based simulation model for the development of research-and-production clusters in Russia implemented with the use of high-tech enterprises located in four science cities (Troitsk, Obninsk, Pushchino and Protvino) as the case study. A new approach to modeling and optimization of gross metropolitan product (GMP) is proposed, taking into account the influence of the “gravity effect” on the redistribution of labor resources between developing science cities and appropriate enterprises united in single research and research-and-production clusters. An important element of this approach is the formation of various scenarios for the strategic development of the research-and-production clusters being assessed and support for the possibility of choosing the most preferable scenario using an evolutionary optimization algorithm. An enlarged simulation model has been developed and implemented in AnyLogic describing the possible development trajectories of science cities with a corresponding change in the values of the most important characteristics: the number of economically active population, the number of research-and-production enterprises, the volume of products produced in high-tech sectors of the economy, GMP, etc. The designed framework is intended primarily for the management of research-and-production clusters implementing the strategy of innovative development. Such a framework uses methods of system dynamics and agent-based simulation modeling supported in the AnyLogic system, genetic optimization algorithms and GIS mapping for science cities, etc. to implement the required functionality. The approbation of the framework was completed with the use of real data published in the approved strategies of the relevant science cities development. As a result of the numerical experiments carried out, some recommendations were proposed for the development of the research-and-production clusters under study considering their mutual influence and the existing base of resources.

**Keywords:** research-and-production cluster, high-tech enterprise, science city, production characteristics, simulation modeling for enterprises, gross metropolitan product, agent-based modeling, system dynamics, gravity effect, production function, AnyLogic

**Citation:** Beklaryan G.L. (2024) Agent-based modeling and optimization of the characteristics for research-and-production clusters. *Business Informatics*, vol. 18, no. 1, pp. 36–51. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.1.36.51

## References

1. Forrester J. W. (1969) *Urban dynamics*. M.I.T. Press, Cambridge.
2. Li G., Kou C., Wang Y., Yang H. (2020) System dynamics modelling for improving urban resilience in Beijing, China. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 161, 104954. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104954>
3. Diemer A., Nedelciu C.E. (2020) System dynamics for sustainable urban planning. *Sustainable Cities and Communities. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals* (eds. W. Leal Filho, A. Marisa Azul, L. Brandli, P. Gökçin Özuyar, T. Wall). Springer, Cham, pp. 760–773. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95717-3\\_115](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95717-3_115)
4. Armenia S., Barnabè F., Pompei A., Scolozzi R. (2021) System dynamics modelling for urban sustainability. *Urban Sustainability. Springer Texts in Business and Economics* (eds. J. Papathanasiou, G. Tsaples, A. Blouchoutzi). Springer, Cham, pp. 131–173. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-67016-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-67016-0_4)
5. Makarov V., Bakhtizin A., Epstein J. (2022) Agent-based modeling for a complex world. Part 1. *Economics and the Mathematical Methods*, vol. 58, no. 1, pp. 5–26 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S042473880018970-6>
6. Makarov V., Bakhtizin A., Epstein J., (2022) Agent-based modeling for a complex world. Part 2. *Economics and the Mathematical Methods*, vol. 58, no. 2, pp. 7–21 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S042473880020009-8>
7. Makarov V., Bakhtizin A., Beklaryan G., Akopov A., Rovenskaya E., Strelkovskiy N. (2019) Aggregated agent-based simulation model of migration flows of the European Union countries. *Economics and the Mathematical Methods*, vol. 55, no. 1, pp. 3–15 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S042473880004044-7>
8. Makarov V., Bakhtizin A., Beklaryan G., Akopov A. (2020) Agent-based modelling of population dynamics of two interacting social communities: migrants and natives. *Economics and the Mathematical Methods*, vol. 56, no. 2, pp. 5–19 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S042473880009217-7>
9. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2021) Digital plant: methods of discrete-event modeling and optimization of production characteristics. *Business Informatics*, vol. 15, no. 2, pp. 7–20. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20>

10. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2019) Development of software framework for large-scale agent-based modeling of complex social systems. *Programmaya Ingeneria (Software Engineering)*, vol. 10, no. 4, pp. 167–177 (in Russian). <https://doi.org/10.17587/prin.10.167-177>
11. Akopov A.S. (2012) Designing of integrated system-dynamics models for an oil company. *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 45, no. 4, pp. 220–230. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2012.051122>
12. Akopov A.S. (2014) Parallel genetic algorithm with fading selection. *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 49, no. 3–4, pp. 325–331. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.062368>
13. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian A.K. (2019) Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia. *Environmental Modelling & Software*, vol. 116, pp. 7–25. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.003>
14. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian A.K. (2017) Agent-based modelling for ecological economics: A case study of the republic of Armenia. *Ecological Modelling*, vol. 346, pp. 99–118. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.11.012>
15. Kisilitsyn E.V., Gogulin V.V. (2021) Simulation of the environmental situation in a megalopolis. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve (Models, systems, networks in economics, technology, nature and society)*, vol. 1, no. 37, pp. 92–106 (in Russian). <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2021-1-8>
16. Akopov A.S., Beklaryan L.A. (2015) An agent model of crowd behavior in emergencies. *Automation and Remote Control*, vol. 76, no. 10, pp. 1817–1827. <https://doi.org/10.1134/S0005117915100094>
17. Crooks A., Heppenstall A., Malleon N., Manley E. (2021) Agent-based modeling and the city: A gallery of applications. *Urban Informatics. The Urban Book Series* (eds. W. Shi, M.F. Goodchild, M. Batty, M.P. Kwan, A. Zhang). Springer, Singapore, pp. 885–910. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6\\_46](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_46)
18. Chen L. (2012) Agent-based modeling in urban and architectural research: A brief literature review. *Frontiers of Architectural Research*, vol. 1, no. 2, pp. 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2012.03.003>
19. Tian G., Qiao Z. (2014) Modeling urban expansion policy scenarios using an agent-based approach for Guangzhou Metropolitan Region of China. *Ecology and Society*, vol. 19, no. 3, art. 52. <https://doi.org/10.5751/ES-06909-190352>
20. Yun T.-S., Kim D., Moon I.-C., Bae J.W. (2022) Agent-based model for urban administration: A case study of bridge construction and its traffic dispersion effect. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 25, no. 4, art. 5. <https://doi.org/10.18564/jasss.4923>
21. Ghandar A., Theodoropoulos G., Zhong M., Zhen B., Chen S., Gong Y., Ahmed A. (2019) An agent-based modelling framework for urban agriculture. 2019 *Winter Simulation Conference (WSC)*, National Harbor, MD, USA, pp. 1767–1778. <https://doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004854>
22. Akopov A.S. (2012) System dynamics modeling of banking group strategy. *Business Informatics*, vol. 2, no. 20, pp. 10–19 (in Russian).
23. Stewart Q.J. (1950) The development of social physics. *American Journal of Physics*, vol. 18, pp. 239–253. <https://doi.org/10.1119/1.1932559>
24. Yap Y.L. (1977) The attraction of cities: A review of the migration literature. *Journal of Development Economics*, vol. 4, no. 3, pp. 239–264. [https://doi.org/10.1016/0304-3878\(77\)90030-x](https://doi.org/10.1016/0304-3878(77)90030-x)
25. Kleiner G.B. (1986) *Production functions. Theory, methods, application*. Moscow: Finance and Statistics (in Russian).
26. Suvorov N.V., Akhunov R.R., Gubarev R.V., Dzyuba E.I., Fayzullin F.S. (2020) Applying the Cobb-Douglas production function for analysing the region's industry. *Economy of Regions*, vol. 16, no. 1, pp. 187–200 (in Russian). <https://doi.org/10.17059/2020-1-14>
27. Hellerstein J.K., Neumark D. (2007) Production function and wage equation estimation with heterogeneous labor: Evidence from a new matched employer-employee data set. *Hard-to-Measure Goods and Services: Essays in Honor of Zvi Griliches*, (eds. Ernst R. Berndt and Charles R. Hulten). Chicago: University of Chicago Press, pp. 31–72. <https://www.nber.org/system/files/chapters/c0873/c0873.pdf>
28. Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K. (2019) Optimisation of system dynamics models using a real-coded genetic algorithm with fuzzy control. *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 19, no. 2, pp. 87–103. <https://doi.org/10.2478/cait-2019-0017>
29. *Guide on the results of the analysis of the compliance of the indicators of scientific and industrial complexes of science cities of the Russian Federation with the requirements established by paragraph 8 of Article 2.1 of Federal Law No. 70-FZ "On the status of the science city of the Russian Federation", and the achievement of the results provided for by the action plans for the implementation of the strategies of socio-economic development of science cities of the Russian Federation in 2022* (in Russian). Available at: <https://minobrnauki.gov.ru/upload/iblock/77c/cemgzf9g61hhktvme7dfmm9feddbfzv.pdf> (accessed 21 February 2023).

### About the author

#### Gayane L. Beklaryan

Cand. Sci. (Econ.);

Senior Researcher, Department of Theoretical Economics and Mathematics Research, Laboratory of Computer Modeling of Social and Economic Processes, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Ave., Moscow 117418, Russia;

E-mail: [glbeklaryan@gmail.com](mailto:glbeklaryan@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1286-0345