

[DOI: 10.17323/2587-814X.2021.1.59.77](https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.1.59.77)

Имитационное моделирование развития отдельных отраслей тяжелой промышленности*

Е.В. Кислицын 

E-mail: kev@usue.ru

В.В. Городничев

E-mail: helltoaster@yandex.ru

Уральский государственный экономический университет
Адрес: 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62

Аннотация

В настоящее время повышается актуальность задачи обеспечения устойчивого развития отраслей тяжелой промышленности. Однако для этого одних лишь теоретических и аналитических исследований недостаточно, и экономическая наука нуждается в разработке принципиально новых подходов к исследованию развития промышленных отраслей. Статья посвящена разработке и апробации имитационной модели развития отдельных отраслей экономики. В качестве объекта исследования выступает металлургическая отрасль, а также такие смежные отрасли, как добыча руд, машиностроение и производство готовых металлических изделий. Теоретическую основу исследования составляет системный подход, объединивший в себе теорию отраслевых рынков, экономического роста, экономики промышленности, системной динамики и математической экономики. В качестве основных методов исследования применены системный анализ, статистический анализ (для выявления тенденций изменения основных экономических показателей), эконометрическое моделирование (для построения производственных функций), а также математическое моделирование макроэкономических систем. В результате предложена имитационная модель, разработанная в нотации системной динамики с использованием программного продукта AnyLogic, позволяющая оценить развитие отдельных отраслей промышленности с учетом различных изменений. Данная модель построена на базе трехсекторной модели национальной экономики, где в качестве структурных элементов выделены отдельные отрасли, связанные динамическими петлями обратной связи. В работе подробно отражена структура имитационной модели, базирующейся на динамических уравнениях первого порядка, балансовых уравнениях и нелинейных производственных функциях. Имитационная модель позволила спрогнозировать ряд сценариев развития отраслей металлургии с учетом изменения трудовых ресурсов и инвестирования в основные производственные фонды. Результаты работы могут использоваться для формирования предложений по промышленной политике, а также мониторинга состояния и эффективности деятельности отдельных отраслей промышленности.

* Статья опубликована при поддержке Программы НИУ ВШЭ «Университетское партнерство»

Ключевые слова: имитационное моделирование; системная динамика; промышленность; металлургия; трехсекторная модель экономики; производственная функция; математическая модель.

Цитирование: Кислицын Е.В., Городничев В.В. Имитационное моделирование развития отдельных отраслей тяжелой промышленности // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 1. С. 59–77. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.1.59.77

Введение

Устойчивое развитие отраслей тяжелой промышленности остается важнейшим приоритетом национальной экономики. Механизмы обеспечения такого развития ложатся в основу промышленной политики РФ, отдельных национальных проектов и программ [1]. Поэтому является актуальной задача поиска новых способов, методов и инструментов обеспечения и поддержки устойчивого развития отраслей тяжелой промышленности. В современных российских и зарубежных исследованиях в качестве таковых используются как классические экономические [2, 3], так и новые междисциплинарные подходы [4, 5]. Однако разработать такие инструменты без использования современного математического инструментария и вычислительных систем практически невозможно.

Аналитические исследования в данной области, в большинстве своем, сводятся к анализу текущей ситуации в отдельных отраслях [6, 7], регионах [8–10] и экономике в целом [11], а также к построению эконометрических моделей и интерпретации полученных зависимостей для дальнейшей корректировки промышленной политики. Однако такие модели практически не учитывают, во-первых, нелинейное поведение экономических систем и, во-вторых, наличие причинно-следственных зависимостей между отдельными показателями этих систем. Использование математического и имитационного моделирования в исследованиях отраслей промышленности встречается в современных исследованиях все чаще, однако не всегда предлагаемые авторами модели теоретически обоснованы и эмпирически апробированы.

В данной работе предпринята попытка использовать для исследования развития отраслевых экономических систем идеи математической экономики и, в частности, моделирования макроэкономических динамических систем, в сочетании с имитационным моделированием. Такой синтез возможен благодаря использованию причинно-следственных и потоковых нотаций имитационного моделирования. Особенностью предлагаемого подхода является использование методов системной динамики,

впервые предложенных в работах Дж. Форрестера [12, 13] и Д. Медоуз [14, 15], и впоследствии развитых в работах В.Н. Сидоренко [16], А.С. Аконова [17–19] и других исследователей. В основе динамических моделей макроэкономических систем, как правило, лежат дифференциальные уравнения первого порядка, которые можно представить в нотации системной динамики, используя потоковую стратификацию.

Цель данного исследования – разработать имитационную модель развития отдельных отраслей промышленности на примере металлургии и смежных с ней отраслей (добыча металлических руд, машиностроение, производство готовых металлических изделий), используя идеи трехсекторной модели экономики и системной динамики. В соответствии с целью исследования, были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) провести анализ имеющихся исследований в области имитационного моделирования экономических систем;
- 2) модифицировать трехсекторную математическую модель экономики применительно к отдельным отраслям;
- 3) разработать структуру имитационной модели развития отдельных отраслей промышленности, определить основные накопители, потоки, переменные и параметры модели;
- 4) провести апробацию разработанной имитационной модели, смоделировать шесть различных сценариев развития металлургической и смежных с ней отраслей.

1. Теоретические основы исследования математических и имитационных моделей отраслей промышленности

Для изучения долговременных тенденций, факторов роста и оценки последствий тех или иных вариантов макроэкономических решений применяются нелинейные малосекторные модели. В таких моделях структура экономики отражается в виде секторов, каждый из которых производит некото-

рый агрегированный продукт. Основой здесь является односекторная модель Солоу [20], в которой экономическая система рассматривается как некий неструктурированный аппарат, производящий единственный универсальный продукт. Данная модель отражает процесс воспроизводства и позволяет анализировать соотношение между потреблением и накоплением.

Развитием односекторной модели Солоу стали двухсекторная [21] и трехсекторная модели [22]. Вид таких моделей позволяет не только провести анализ роста экономики в целом, но и сфокусировать внимание на отдельных ее секторах. Однако развитие данных идей в основном заключается в исследованиях макроэкономических систем. Вместе с тем, не менее важной является проблема развития отдельных отраслей, в первую очередь, промышленности. Идеи, изложенные в трехсекторной модели [22, 23], по мнению автора, можно использовать для исследования экономического роста не секторов экономики в целом, а отдельных ее отраслей, наиболее тесно связанных друг с другом. Единственным допущением, которое необходимо соблюдать при модификации данной модели, является необходимость представить отрасли из трех секторов экономики – материального, фондосоздающего и потребительского.

Математический инструментарий, представленный в трехсекторной модели экономики, представляет собой совокупность дифференциальных уравнений, балансовых уравнений и нелинейных производственных функций. Аналитическое решение трехсекторной модели экономики для сбалансированного экономического роста подробно описано в работах [23, 24]. В рамках данного исследования предлагается использовать принципиально иной подход – имитационное моделирование.

Имитационное моделирование – это экспериментальный метод исследования реальной или проектируемой системы на основе ее имитационной модели, который сочетает в себе особенности экспериментального подхода со специфическими условиями применения вычислительной техники [25]. Согласно принятой классификации, существует три подхода к созданию имитационных моделей: дискретно-событийное моделирование, системная динамика и агентное моделирование [26].

Дискретно-событийное моделирование в основном используется для анализа бизнес-процессов и производственных систем на предприятиях, где

логика может быть описана в виде последовательности конкретных действий. К примеру, в работе [27] имитационное моделирование применяется для оценки рисков промышленных предприятий. Данная имитационная модель представляет собой процессную (дискретно-событийную) модель производственного процесса, на которой проводились статистические испытания и исследовалась вариация значения показателя рентабельности в зависимости от различных входных факторов.

При описании мезо- и макроэкономических систем целесообразно применять другие два подхода – системную динамику и агентное моделирование. При этом агентное моделирование применяется в том случае, когда в системе в явном виде выделяются отдельные субъекты, обладающие дискретностью, социальностью, активностью, автономностью и гибким поведением [28]. В частности, в работе А.В. Воронцовского [29] представлена стохастическая модель экономического роста с четырьмя типами агентов: производство (фирма), потребитель, внешние рынки и государство. В данном исследовании рассматривается однопродуктовая модель с внутренними и внешними производителями, в которой используется классическая производственная функция Кобба–Дугласа, а в качестве основных управляющих элементов рассматриваются условия производства, задача потребителя и соотношения для государства. Работа Д.Н. Шульц и И.Н. Якуповой [30] посвящена решению классической задачи агентного моделирования – оценке того, как поведение каждого из агентов влияет на развитие системы в целом. В частности, в этой работе исследуется влияние микроструктур на свойство экономики в целом.

Модели системной динамики позволяют выявить причинно-следственные связи в экономической системе. Они, как правило, состоят из накопителей (уровней), представляющих собой аккумуляцию в цепях обратной связи, потоков, регулирующих скорость изменения накопителей, вспомогательных переменных и циклов (петель обратной связи).

Модели системной динамики основаны на дифференциальных уравнениях, что обосновывает их использование при попытке вдохнуть новую жизнь в классические динамические (непрерывные) экономические модели. Н.В. Яндыбаева и В.А. Кушников [31] разработали комплексную системно-динамическую модель для прогнозирования показателей экономической безопасности РФ. Эта модель содержит 11 системных уровней, в том

числе уровень роста потребительских цен, уровень безработицы и т.д., а также четыре функциональных зависимости и несколько десятков вспомогательных переменных.

Е.И. Пискун [32] использовала системную динамику для построения модели взаимовлияния переменных оценки результативности стратегии инновационного развития производственно-экономических систем, с использованием для анализа нескольких сценариев развития системы. В модели рассчитываются такие показатели, как средний цепной темп роста, а также средний темп роста уровней инновационной интенсивности, эффективности инвестиционной деятельности, инновационного потенциала и развития производственно-экономических систем.

Особое внимание уделяется исследованиям взаимодействия экономического роста и ресурсопотребления, что также можно выразить с помощью дифференциальных математических моделей. Так, в работе [33] разработана модель в нотации системной динамики, в которой экономический рост и ресурсы рассматриваются с системной точки зрения, с целью выявления зависимости роста экономики от задерживаемых эффектов обратной связи от истощения ресурсов [34]. Модель состоит из двух подсистем – возобновляемых природных ресурсов и экономик, где в качестве накопителей используются уровень ресурсов и ВВП.

Г.Л. Бекларян [35] разработала имитационную модель экономического развития Дальневосточного федерального округа, в которой использованы методы системной динамики и агентного подхода. Основная идея модели заключается в исследовании влияния на экономику федерального округа ряда факторов, таких как темпы роста инвестиций в основные фонды, средней заработной платы, дотаций из федерального бюджета и цен на природные ресурсы. Макроэкономические показатели в модели описаны в нотации системной динамики, а регионы федерального округа представлены в виде отдельных агентов, находящихся в одном из трех состояний.

Моделирование процессов экономической динамики по отраслям представлено в работе [36], где в качестве основных модулей модели выделены государственное управление, производство, потребление, трудоустройство, демография, образование и финансовая система. В качестве основных методов в этой работе используются агентное моделирова-

ние, системная динамика, межотраслевые балансовые модели, элементы искусственного интеллекта и когнитивные технологии. В основе модели лежит определение потребности в различных ресурсах (товар, кадры и т.д.), валовое накопление основного капитала и инвестиционный спрос. В данной имитационной модели в качестве агентов представлены домохозяйства и юридические лица различных форм [37], поведение которых моделируется с помощью специальных алгоритмов, описанных в нотации диаграмм UML. Системная динамика используется для моделирования бюджетов государства, юридических лиц и домохозяйств, а также для воспроизведения динамики населения [38].

Еще одна попытка использования системной динамики в анализе отраслей представлена в работе [39], где разработана имитационная модель системы цепочек поставок региона. Модель состоит из четырех основных взаимосвязанных блоков: население, сельское хозяйство, обрабатывающая промышленность и транспорт. Модель позволила выявить цикличность и взаимозависимость эффективности основных отраслей и их влияние друг на друга [40].

Таким образом, большое число экономических исследований использует инструментарий имитационного моделирования и, в частности, системной динамики при анализе макроэкономических систем. Тем не менее, в таких моделях рассматривается либо национальная экономика в целом, либо ее отдельные укрупненные сектора. В рамках данного исследования предпринята попытка применить инструментарий системной динамики для исследования модели устойчивого развития отдельной группы отраслей, базирующейся на трехсекторной модели экономики.

2. Математическая и алгоритмическая основа построения имитационной модели развития отраслей промышленности

В рамках данного исследования в качестве объекта выделены отрасли металлургии, производства готовых металлических изделий, добычи руды и машиностроения. Выбор объекта исследования сделан не случайно, т.к. именно металлургия является одной из передовых областей промышленности Уральского макрорегиона. В соответствии с тезисом о распределении отраслей по трем секторам, в качестве таковых выделены (в соответствии с классификацией по ОКВЭД 2.0):

- ◆ материальный сектор: 07 – Добыча металлических руд; 24 – Производство металлургическое;
- ◆ фондосоздающий сектор: 28 – Производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки (в том числе: 28.4 – Производство станков, машин и оборудования для обработки металлов, и прочих твердых металлов; 28.91 – Производство машин и оборудования для металлургии);
- ◆ потребительский сектор: 25 – Производство готовых металлических изделий (кроме машин и оборудования).

Другие отрасли в данной модели напрямую не рассматриваются, однако учитываются в качестве некой «другой» отрасли. Материальный сектор здесь представлен производством предметов труда (железные руды, руды цветных металлов, чугуны, сталь, ферросплавы, стальные трубы, драгоценные и цветные металлы, литье), в качестве фондосоздающего сектора рассматриваются средства труда (машины и оборудование), а потребительского – предметы потребления (готовые металлические изделия). Здесь следует отметить, что потребителями могут являться как другие отрасли экономики, так и домохозяйства. В рамках настоящей модели рассматривается только сектор металлургии и наиболее тесные с ним отрасли.

Технологический уклад в данной модели считается постоянным, а выпуск в отраслях задается неоклассическими производственными функциями:

$$X_i = A_i \cdot K_i^{\alpha_i} \cdot L_i^{\beta_i}, \quad (1)$$

где X_i – объем выпуска в i -й отрасли;

A_i – коэффициент нейтрального технического процесса в i -й отрасли;

K_i – основные производственные фонды (далее – ОПФ) i -й отрасли;

L_i – число занятых в i -й отрасли;

α – коэффициент эластичности по фондам;

β – коэффициент эластичности по труду;

i – номер отрасли ($i = 7, 24, 25, 28$).

В модели выделяется общее число занятых, которое изменяется с постоянным темпом прироста:

$$\frac{dL}{dt} = \vartheta L, \quad (2)$$

где L_i – число занятых в i -й отрасли;

ϑ – темп прироста числа занятых.

Распределение работающих в промышленности представлено в виде балансового соотношения:

$$L = L_7 + L_{24} + L_{25} + L_{28} + L_{oth}, \quad (3)$$

L_i – число занятых в i -й отрасли;

L_{oth} – число занятых в других отраслях.

В модели принимаются предположения об отсутствии лага капиталовложений и постоянстве коэффициентов износа основных производственных фондов. Отсюда, изменение ОПФ i -й отрасли состоит из износа и прироста за счет валовых капиталовложений:

$$\frac{dK_i}{dt} = -\mu_i K_i + I_i, \quad (4)$$

где K_i – ОПФ i -й отрасли;

μ – коэффициент износа ОПФ в i -й отрасли;

I_i – объем валовых инвестиций в i -ю отрасль.

Капитальные вложения в ОПФ всех отраслей промышленности представляют собой покупку машин, оборудования, зданий, сооружений и т.д. Таким образом, выпуск отраслей 28 и 41 в совокупности составляет общий объем инвестиций, которые могут быть вложены в разные отрасли:

$$X_{28} + X_{41} = I_7 + I_{24} + I_{25} + I_{28} + I_{oth}, \quad (5)$$

где X_i – объем выпуска в i -й отрасли;

I_i – объем валовых инвестиций в i -ю отрасль;

I_{oth} – объем валовых инвестиций в другие отрасли.

На данном этапе исследования отрасль 41 «Строительство зданий» не включена в модель, поэтому рассматривается как постоянная.

Еще одно балансовое соотношение показывает распределение продукции отраслей материального сектора (в частности, металлургии):

$$X_{24} = a_0 X_{24} + a_{25} X_{25} + a_{28} X_{28} + a_{oth} X_{oth}, \quad (6)$$

где X_i – объем выпуска в i -й отрасли;

a_i – коэффициенты прямых материальных затрат.

Таким образом, математическая модель состоит из пяти динамических элементов первого порядка, трех статических распределительных элементов и четырех нелинейных статических элементов. Эндогенными переменными являются ОПФ и выпуски отраслей. Экзогенными переменными являются темп прироста числа занятых, коэффициенты износа ОПФ отраслей, коэффициенты прямых мате-

реальных затрат, начальное значение числа занятых, начальное распределение занятых по отраслям, начальные значения ОПФ отраслей и параметры производственных функций. Соответственно, управление в модели осуществляется путем распределения трудовых и инвестиционных ресурсов.

Основываясь на уравнениях (1)–(6) и основных постулатах системной динамики, автором спроектирована и разработана в программной среде AnyLogic имитационная модель развития металлургической и смежных с ней отраслей промышленности. Такая модель составлена в соответствии со следующими принципами:

1. Динамические элементы представлены в виде диаграмм потоков и накопителей, каждый динамический элемент представляет собой накопитель, а потоком задается скорость изменения этих накопителей.
2. Нелинейные статические элементы задаются в виде функциональных переменных, значения которых рассчитываются исходя из значений других переменных, параметров и накопителей.
3. Статические распределительные элементы задаются в виде параметров, значения которых регулируются пользователем модели.

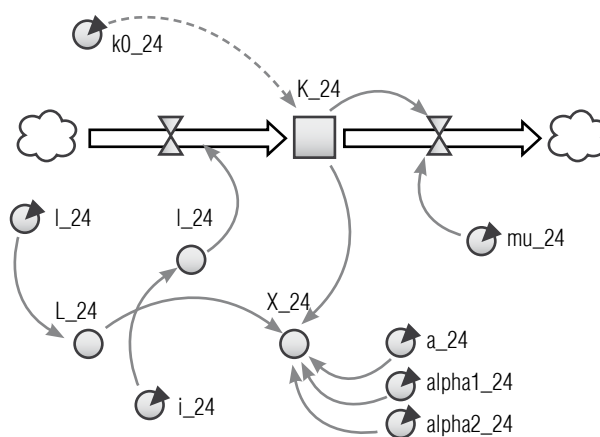


Рис. 1. Потоквая диаграмма металлургической отрасли

Таким образом, в разработанной имитационной модели присутствует пять потоковых диаграмм, четыре из которых имеют практически идентичный вид (рисунок 1).

В целом имитационная модель представляет собой комплекс потоковых и причинно-следственных диаграмм, где каждый элемент рассчитывается динамически, в непрерывном времени. Общий вид имитационной модели представлен на рисунке 2.

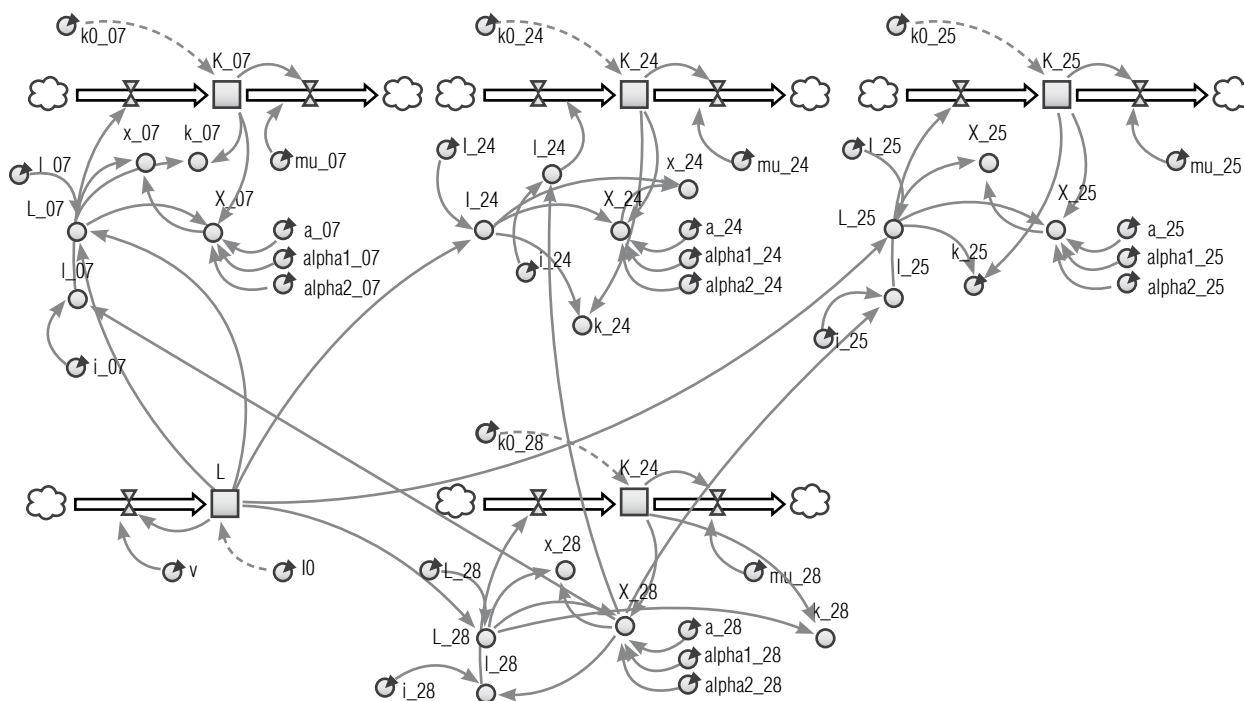


Рис. 2. Общий вид имитационной модели

В качестве накопителей в модели представлены объем основных производственных фондов (капитала) каждой из исследуемых отраслей и число занятых в промышленности, которые рассчитываются по заданным дифференциальным уравнениям (2) и (4) с помощью специальных элементов – потоков. Потоки задают скорость изменения накопителей за единицу времени динамическим путем, т.е. непрерывно. С помощью динамических переменных описываются выпуск продукции отрасли, а также число занятых и объем инвестиций (таблица 1).

Параметрами в имитационной модели обозначаются значения, которые задаются и изменяются пользователем, а не функционально. Это данные, полученные статистическим и эмпирическим путем, рассчитанные математически и эконометрически и занесенные в модель. Параметры могут быть как статическими, так и изменяющимися с течением времени (данное свойство пригодится при моделировании различных сценариев экономического роста). Статическими параметрами являются, в основном, начальные значения накопителей и коэффициенты производственных функций (таблица 2).

Таблица 1.

Эндогенные переменные имитационной модели

Наименование переменной	Тип переменной	Интерпретация переменной
K_i	Накопитель	Объем капитала i -й отрасли
L	Накопитель	Число занятых в промышленности
$flowInvest_i$	Поток	Прирост инвестиций в основной капитал i -й отрасли
$flowVyb_i$	Поток	Выбывший основной капитал i -й отрасли
$flow_PrirLabor$	Поток	Прирост занятых в промышленности
X_i	Динамическая переменная (функция)	Валовый выпуск i -й отрасли
L_i	Динамическая переменная	Число занятых в i -й отрасли
I_i	Динамическая переменная	Объем инвестиций в i -ю отрасль
x_i	Динамическая переменная	Производительность труда i -й отрасли
k_i	Динамическая переменная	Фондовооруженность i -й отрасли

Таблица 2.

Экзогенные переменные модели

Наименование переменной	Тип переменной	Интерпретация переменной	Способ расчета
k_i	Параметр	Начальное значение объема основных фондов i -й отрасли	Берется из статистических источников за период, предшествующий прогнозируемому
mu_i	Параметр	Скорость выбытия основных фондов i -й отрасли	Рассчитывается по статистическим данным
l_i	Параметр	Доля занятых в i -й отрасли в общем числе занятых в промышленности	Рассчитывается по статистическим данным
i_i	Параметр	Доля инвестиций в основные фонды i -й отрасли в общем объеме выпуска продукции машиностроения	Рассчитывается по статистическим данным
a_i	Параметр	Коэффициент научно-технического прогресса i -й отрасли	Рассчитывается по производственной функции i -й отрасли
$alpha1_i$	Параметр	Коэффициент эластичности по капиталу i -й отрасли	Рассчитывается по производственной функции i -й отрасли
$alpha2_i$	Параметр	Коэффициент эластичности по труду i -й отрасли	Рассчитывается по производственной функции i -й отрасли
l_0	Параметр	Начальное значение числа занятых в промышленности	Берется из статистических источников за период, предшествующий прогнозируемому
ν	Параметр	Темп прироста занятых в промышленности	Рассчитывается по статистическим данным

Таким образом, описана структура имитационной модели развития нескольких отраслей промышленности, включая металлургию, добычу металлических руд, машиностроение и производство готовых металлических изделий.

3. Результаты имитационного моделирования развития металлургической отрасли

Для апробации модели необходимо рассчитать значения экзогенных переменных (параметров) модели и задать уравнения (1)–(6) с соответствующими переменными. С целью вычисления коэффициентов A_i , α_i и β_i построены производственные функции для каждой отрасли. Для построения производственных функций использованы официальные данные Федеральной службы государственной статистики за период с 2002 по 2018 г. К сожалению, использовать более ранние данные не удалось из-за их несопоставимости. Однако период протяженностью в 17 лет вполне позволяет построить регрессионную модель

с двумя объясняющими переменными на высоком уровне значимости. Стоимостные показатели пересчитаны в сопоставимые цены 2002 года.

В качестве показателей X_i были использованы показатели объема отгруженных товаров собственного производства по каждой из исследуемых отраслей: добыча металлических руд, производство металлургическое, производство готовых металлических изделий (кроме машин и оборудования), производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки. Показатель K_i рассчитан как значение показателя основных фондов коммерческих организаций по каждой из отраслей. Показатель L_i рассчитан как значение показателя среднегодовой численности работников организаций (таблица 3)¹.

В результате расчетов с использованием языка программирования R и пакета RStudio были получены следующие производственные функции исследуемых отраслей промышленности:

Таблица 3.

Дескриптивная статистика исходных данных для построения производственных функций

Показатель ²	Среднее значение	Стандартная ошибка	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднеквадратическое отклонение
X_07	407056,8	46944,1	988000,0	343633,8	484446,1	2034227172	45102,4
X_24	1398471,5	220461,5	2768500	1061710	1837724,9	4,4865E+10	211812,6
X_25	597651,1	91035,0	1186500	455018,6	768581,6	7649879809	87463,6
X_28	529757,8	80704,7	1125420	376389	646794,0	6012228031	77538,6
K_07	368006,7	85864,8	697009	274479	548720,3	6805624929	82496,2
K_24	708306,6	139333,0	1320351,5	570974,3	984168,4	1,792E+10	133866,8
K_25	150132,3	29339,2	280074,6	121115,8	210779,5	794574579	28188,2
K_28	171378,7	12066,6	354314	153625,6	191204,4	134402506	11593,2
L_07	245,9	85,7	1090000	167	357,5	6781,9	82,4
L_24	557,0	108,3	1076803	440,7	731,8	10822,8	104,0
L_25	393,7	74,4	513309	292,9	487,8	5114,5	71,5
L_28	742,0	313,2	13,1	299,4	1205,0	90548,1	300,9

¹ Для расчета показателей использовались статистические сборники: «Промышленное производство в России – 2019», «Промышленное производство в России – 2016», «Промышленность России – 2010», «Промышленность России – 2002»

² Показатели X_i и K_i рассчитаны в миллионах рублей, показатели L_i – в тысячах человек

$$\begin{aligned}
 X_{07} &= K_{07}^{0,89} \cdot L_{07}^{0,28} \\
 X_{24} &= 0,68 \cdot K_{24}^{0,74} \cdot L_{24}^{0,55} \\
 X_{25} &= 5,9 \cdot K_{25}^{0,38} \cdot L_{25}^{0,49} \\
 X_{28} &= K_{28}^{0,97} \cdot L_{28}^{0,22}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Здесь следует отметить, что сумма коэффициентов эластичности по фондам и труду больше единицы, что говорит о наличии возрастающей отдачи. Данный тезис основан на результатах исследования С.В. Ореховой и Е.В. Кислицына [41], посвященного анализу совокупной производительности факторов, под которым понимается необъясненный остаток роста конечного продукта. В частности, в исследовании доказано наличие совокупной производительности факторов в отраслях тяжелой промышленности, в т.ч. металлургии, что дает основание предположить наличие возрастающей отдачи.

Все построенные функции и их коэффициенты статистически значимы на уровне 5%, коэффициенты детерминации колеблются от 0,4 для металлургии до 0,99 для машиностроения. Значения всех экзогенных переменных (параметров), описанных в таблице 2, рассчитаны и представлены в таблице 4.³

Основная идея имитационных моделей состоит в том, чтобы можно было моделировать различные ситуации, возникающие в системе, т.е. моделировать сценарии. В рамках данной работы было исследовано шесть различных сценариев развития отраслей металлургии и смежных с ней. Первый

сценарий – развитие экономической системы без существенных изменений в соответствии с заданными производственными функциями. При таком сценарии предполагается, что все параметры модели являются константами (т.е. сохраняются все темпы прироста основных показателей). Такой сценарий отражает существующую картину и позволяет спрогнозировать развитие экономики различных отраслей. В качестве анализируемых переменных выделены производительность труда, фондовооруженность (рисунок 3) и валовый выпуск продукции (рисунок 4).

Сразу следует отметить, что общие объемы выпуска в некоторых отраслях могут не отражать действительные значения на начало анализируемого периода, поскольку, во-первых, производственные функции строились по ценам 2002 года и, во-вторых, начальное значение выпуска в данной модели не задавалось. Основная цель здесь – проследить темпы роста отдельных отраслей.

Так, при существующих темпах прироста численности работников в промышленности (а по состоянию на 2018 год данный темп составил –0,36% в год) и темпах прироста капиталовложений в основные фонды, фондовооруженность всех исследуемых отраслей постепенно доходит до уровня производительности труда через 10 лет. При неизменных показателях рост выпуска продукции в отрасли добычи металлических руд вырастет в 2,78 раз, металлургии – в 1,9 раз, производства готовых металлических изделий – в 1,44 раза и машиностроения – в 1,95 раз за 10 лет.

Таблица 4.

Значения параметров модели по состоянию на 2018 г.

Наименование переменной / Отрасль	07 – Добыча металлических руд	24 – Металлургическое производство	25 – Производство готовых металлических изделий	28 – Производство машин и оборудования (не включенных в другие группировки)
k_i	1709200	3255000	699600	509900
μ_i	0,013	0,009	0,007	0,011
l_i	0,032127	0,043398	0,04877	0,039027
i_i	0,207959	0,250129	0,06384	0,033877
a_i	1	0,68	5,9	1
$\alpha1_i$	0,89	0,74	0,38	0,97
$\alpha2_i$	0,28	0,55	0,49	0,22
l_0	9887,1			
ν	–0,00036			

³ Для расчета показателей использовались статистические сборники: «Промышленное производство в России – 2019», «Промышленное производство в России – 2016» и база данных «СПАРК-Интерфейс»

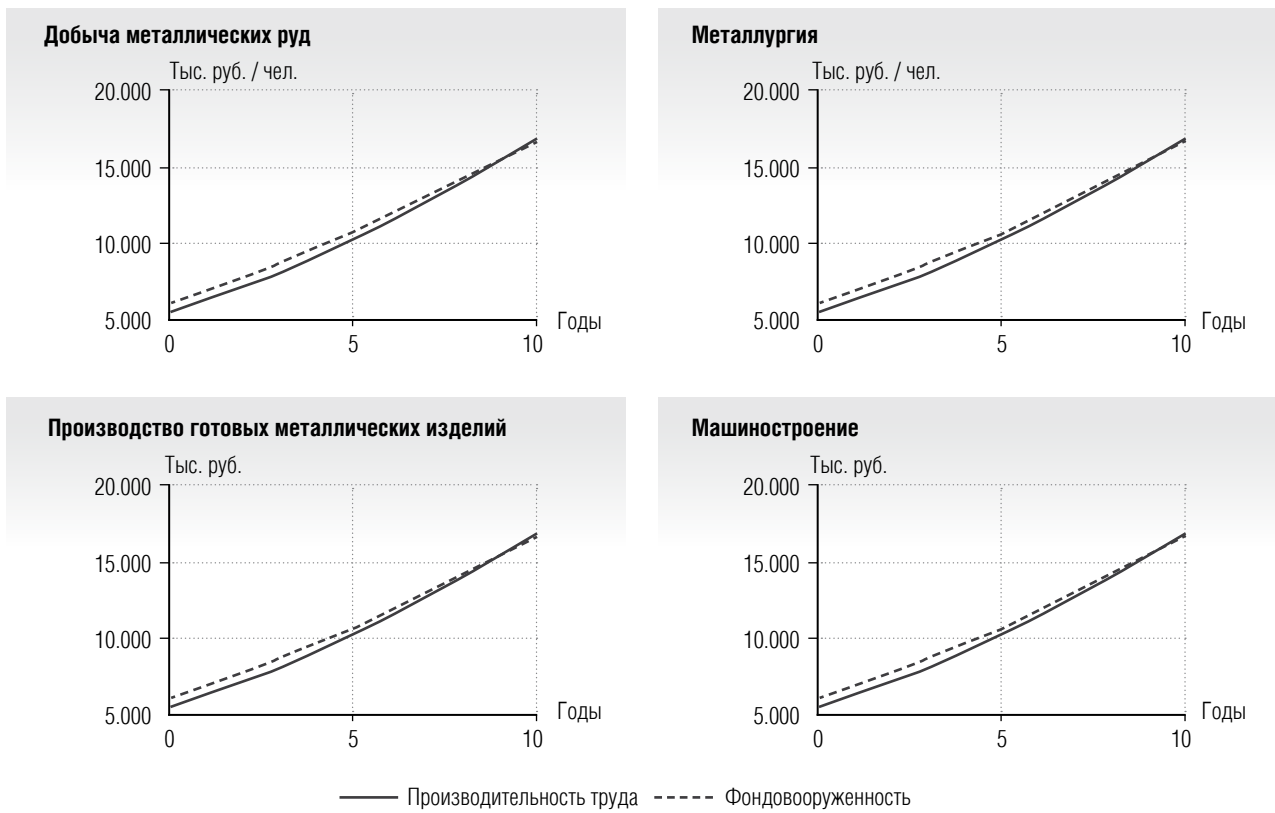


Рис. 3. Динамика изменения производительности труда и фондовооруженности по сценарию №1

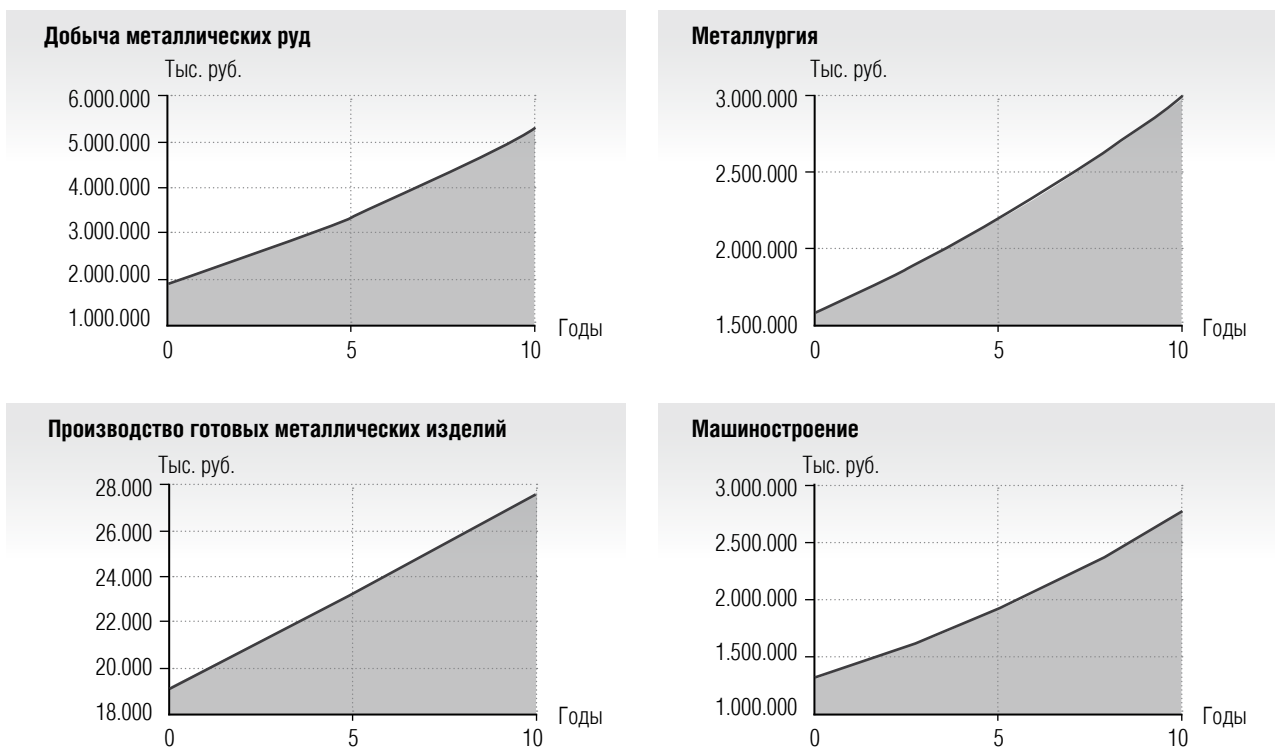


Рис. 4. Динамика изменения валового выпуска продукции по сценарию №1

Далее анализируются три пессимистических и два оптимистических сценария. Второй сценарий – это отражение уже существующей тенденции сокращения числа работников в промышленности. В имитационной модели задано сокращение темпов роста численности работников в промышленности на 1% в год (рисунк 5).

В первую очередь, сокращение притока новой рабочей силы в промышленность в целом коснется отраслей, в которых производительность труда влияет на выпуск в большей степени, чем фондовооруженность. Согласно рассчитанным значениям, выпуск в отрасли металлургии будет постепенно замедляться и на девятый год практически остановится. В отрасли производства готовых металлических изделий ситуация еще более негативная – уже на шестой год объемы выпуска начнут падать. Отрасли добычи металлических руд и машиностроения не так сильно пострадают, однако и у них темпы роста выпуска продукции сократятся.

Третий сценарий – сокращение доли работников отрасли машиностроения в общем числе работников промышленности на 25% в год. Данный сценарий является попыткой проследить причинно-следственную зависимость между выпуском отраслей и производством основных фондов (рисунк 6).

Нетрудно заметить, что темпы выпуска продукции отрасли машиностроения замедляются достаточно явно уже с третьего года, тогда как при общем снижении численности работников во всех отраслях такой тенденции не наблюдалось. Кроме того, аналогичные показатели в других отраслях также снижаются. Так, темп роста выпуска продукции в отрасли добычи металлических руд составит всего 2,28, металлургии – 1,27, а в производстве готовых металлических изделий – 1,34 за 10 лет, что существенно ниже, чем при сценарии №1.

Следующий сценарий – сокращение доли инвестиций в отрасль машиностроения на 25% в год (рисунк 7) в общем объеме инвестиций в промышленное производство. Как ожидается, здесь должна наблюдаться тенденция, аналогичная третьему сценарию. Тем не менее, при сохранении общих тенденций, количественная разница с предыдущим сценарием все же есть.

Выпуск отрасли машиностроения страдает сильнее: его темпы начинают падать уже на восьмой год прогноза. Однако, темпы выпуска других отраслей падают медленнее. Здесь сказывается балансовое уравнение (5), т.е. инвестиции в другие отрасли остаются на прежнем уровне. Даже когда темпы производства в отрасли машиностроения начинают падать, другие

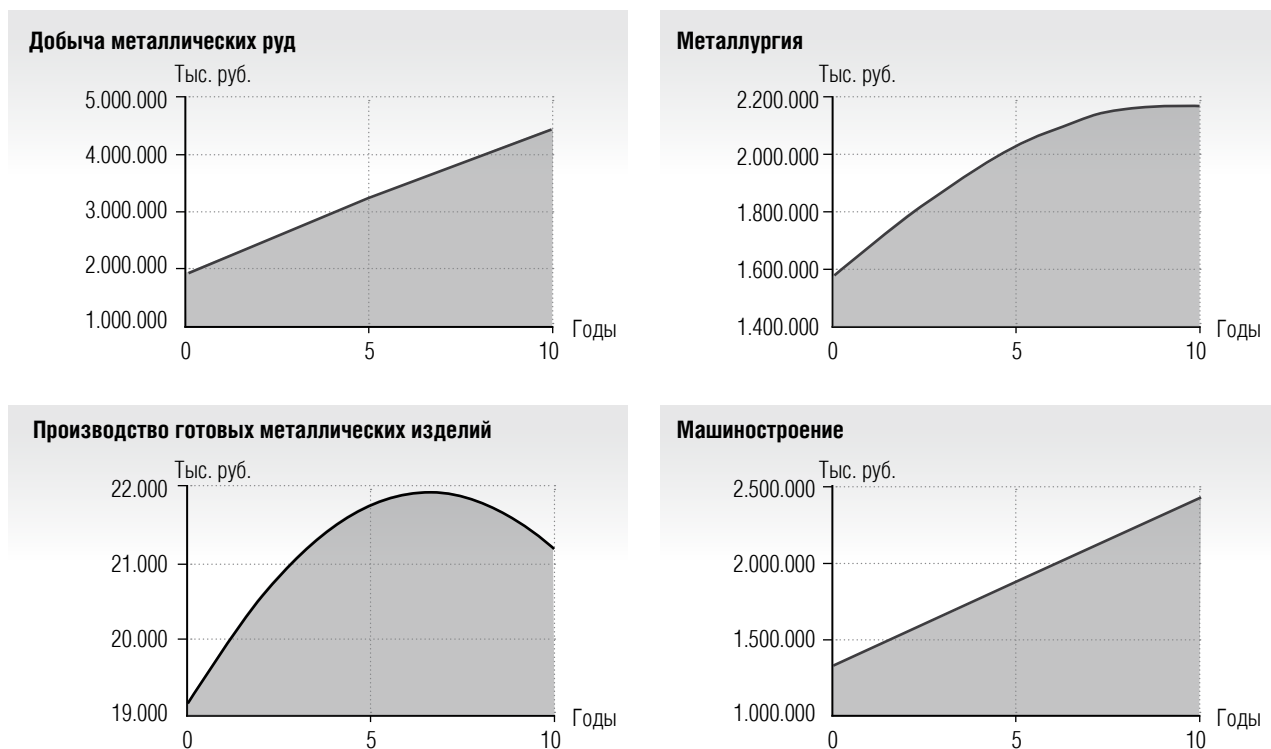


Рис. 5. Динамика изменения валового выпуска продукции по сценарию №2

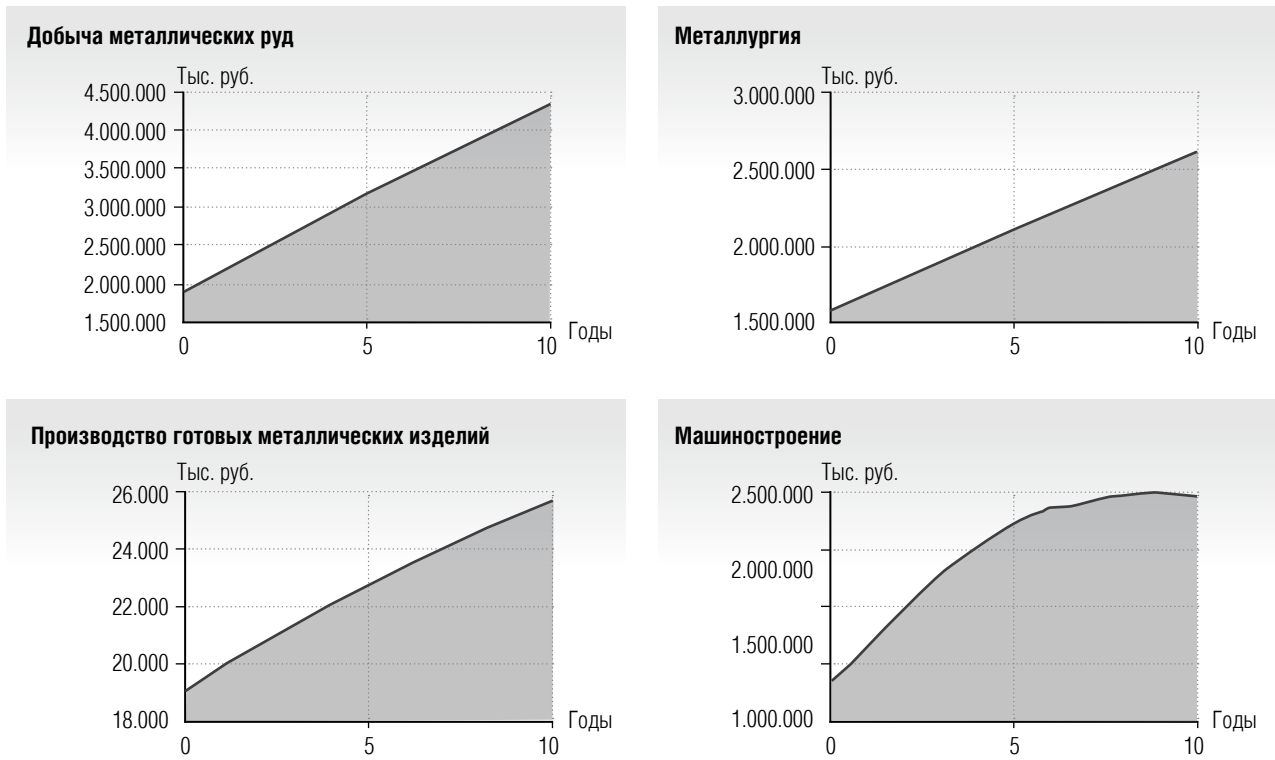


Рис. 6. Динамика изменения валового выпуска продукции по сценарию №3

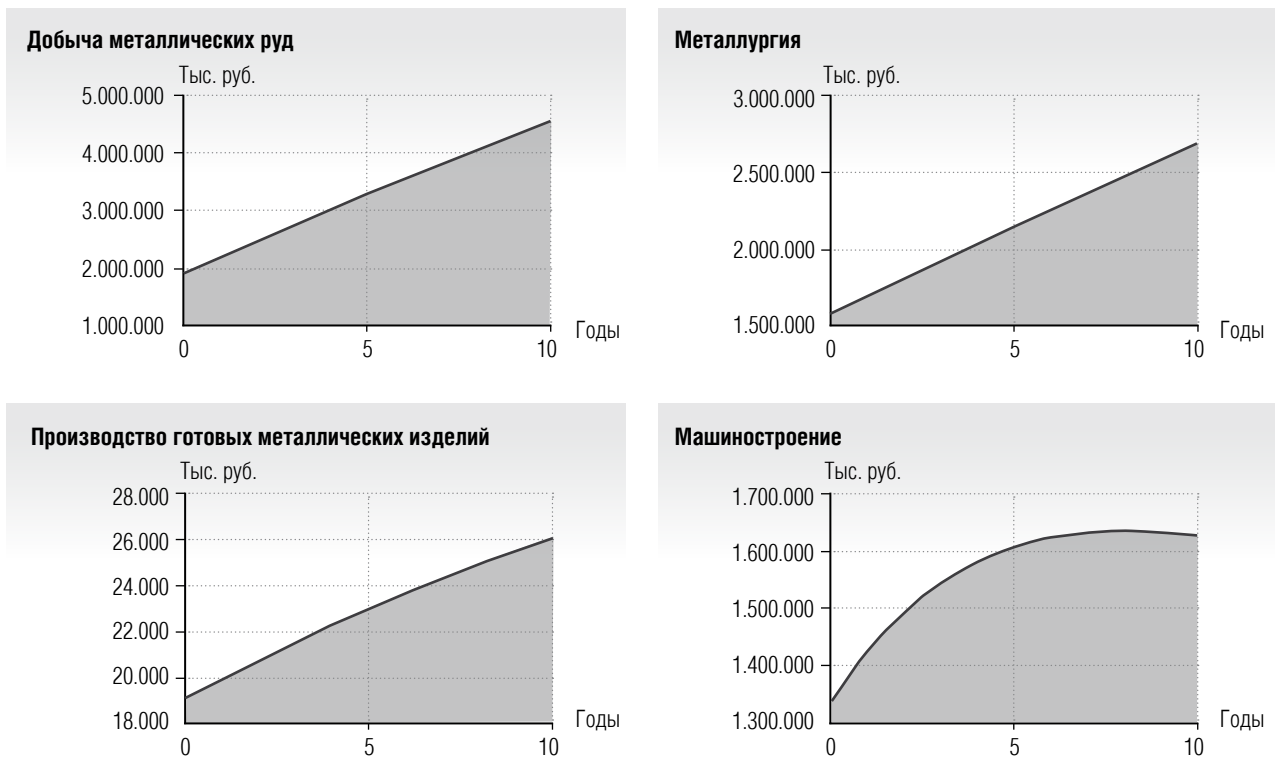


Рис. 7. Динамика изменения валового выпуска продукции по сценарию №4

отрасли ощущают это в меньшей степени, что является весьма необычным явлением. Получается, что исследуемые отрасли компенсируют приток инвестиций из других отраслей промышленности (например, строительства) в большей степени, чем отток работников из отрасли машиностроения.

Пятый сценарий является оптимистическим – увеличение прироста числа работников в промышленности с сохранением их распределения по отраслям на 1% в год (рисунки 8).

Прирост численности работников позитивно сказывается на темпах роста продукции по всем отраслям. Более того, активно начинает работать петля обратной связи, которая связывает выпуск фондообразующих отраслей (в частности, машиностроение) с приростом капитала в другие отрасли. Таким образом, чем дальше мы строим прогноз, тем большую долю в увеличении выпуска продукции занимает прирост капиталовложений в основные фонды. Такой эффект называется самовоспроизводящейся петлей обратной связи.

Последний сценарий в данном исследовании посвящен анализу развития отраслей при увеличении доли инвестиций в отрасль машиностроения на 10% в год (рисунки 9).

Естественно, в данном сценарии также наблюдается увеличение темпов роста выпуска продукции всех отраслей по сравнению со стандартным сценарием №1. Однако, следует отметить, что в первую очередь сильно увеличивается выпуск в отрасли машиностроения – в 3,7 раза за 10 лет. Однако, в металлургических отраслях ускорение темпов роста более медленное по сравнению со сценарием №5. Здесь следует отметить, что, во-первых, прирост трудовых ресурсов в целом увеличивает прирост в большей степени линейно и, во-вторых, прирост инвестиций в одну отрасль согласно балансового уравнения (5) предполагает их отток (хоть и небольшой) из других отраслей. Тем не менее, экспоненциальный рост отрасли машиностроения в более долгосрочной перспективе повлечет за собой аналогичный рост металлургических отраслей, который впоследствии превысит темпы роста в сценарии №5. Однако разработанная имитационная модель не может строить достаточно правдоподобные прогнозы на период, превышающий 10 лет.

Таким образом, продемонстрирована возможность использования разработанной имитационной модели для анализа и прогнозирования развития отраслей металлургии и смежных с ней. Естественно, данный набор сценариев является

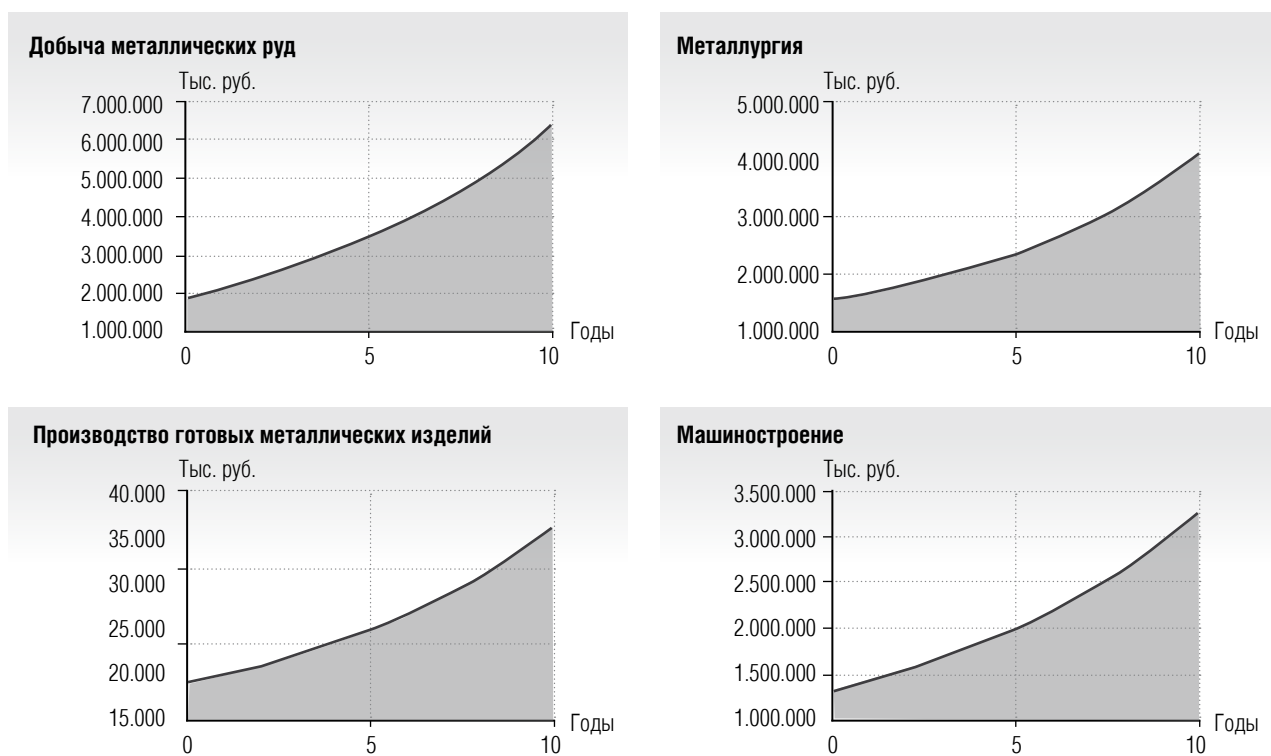


Рис. 8. Динамика изменения валового выпуска продукции по сценарию №5

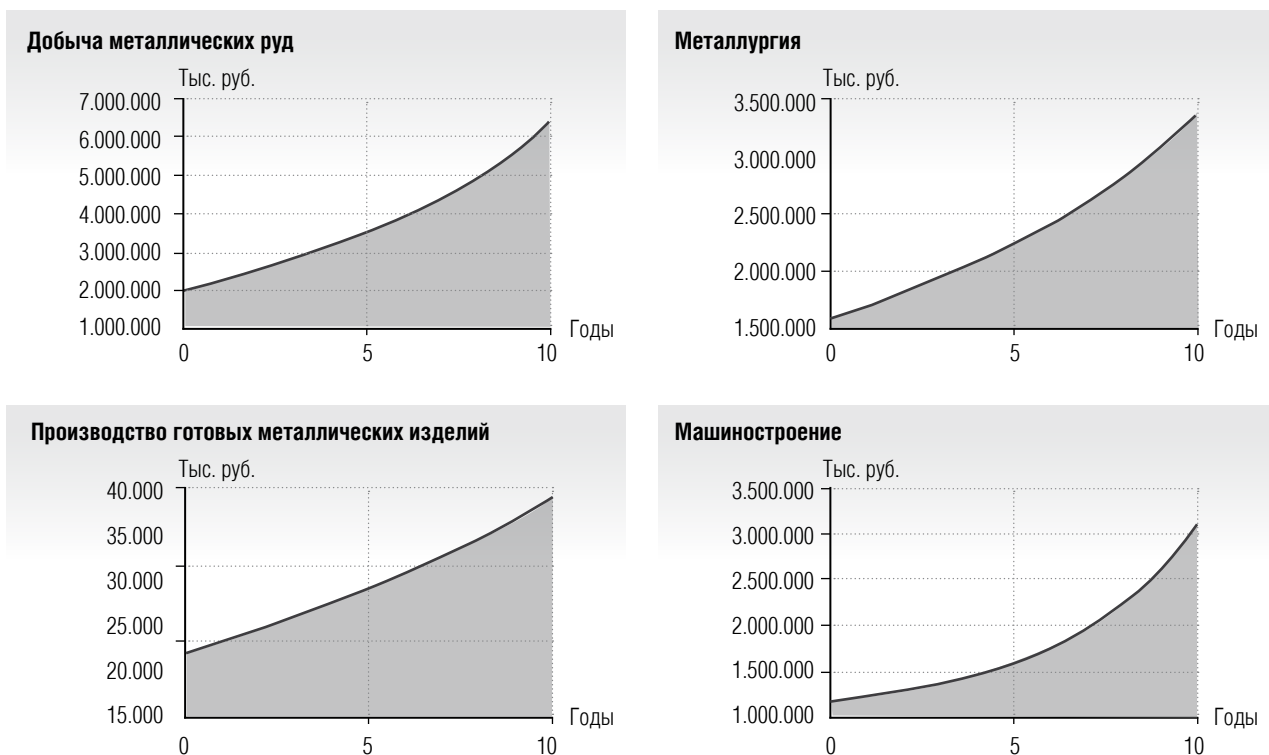


Рис. 9. Динамика изменения валового выпуска продукции по сценарию №6

условным. Тем не менее, имитационная модель позволяет добавлять новые сценарии в соответствии с промышленной политикой РФ.

Заключение

В ходе настоящего исследования, были получены следующие результаты.

Анализ научных работ, посвященных построению имитационных моделей экономических систем, показал, что исследования в этой области крайне актуальны, и их число увеличивается с каждым годом. Однако использование системной динамики в основном ограничено исследованиями либо национальной экономической системы в целом, либо отдельных регионов. Тем не менее, развитие отдельных отраслей также необходимо исследовать с помощью современных инструментальных средств.

Модифицирована трехсекторная модель экономики В.А. Колемаева, где в качестве секторов рассматриваются не глобальные сектора национальной экономики, а отдельные отрасли промышленности: в рамках данной работы это металлургия,

добыча железных руд, машиностроение и производство готовых металлических изделий. Построено пять динамических уравнений первого порядка, три балансовых уравнения и четыре нелинейных функции, которые в совокупности позволяют анализировать, прогнозировать и оптимизировать устойчивое развитие отдельных отраслей промышленности.

На основе аналитической модели металлургических отраслей разработана имитационная модель развития отдельных отраслей промышленности в нотации системной динамики. Определены накопители (основные производственные фонды каждой отрасли и численность работников в промышленности), изменяющие их потоки, а также динамические переменные и параметры модели. Построенная имитационная модель представляет собой комплекс потоковых причинно-следственных диаграмм, отражающих не только структуру исследуемой экономической системы, но и ее поведение в течение нескольких периодов времени.

Построенная имитационная модель апробирована с учетом имеющихся данных за 2002–2018 годы. Построены производственные функции и эмпи-

рически рассчитаны все экзогенные переменные модели. Для демонстрации работы имитационной модели было предложено шесть сценариев развития исследуемой экономической системы – стандартный, три пессимистических и два оптимистических. Сценарный анализ показал основные точки управления моделью и, как следствие, всей исследуемой экономической системой. Результаты данного исследования могут быть применены, в первую очередь, органами государственной власти для корректировки промышленной политики. ■

Литература

- Орехова С.В. Ресурсы и устойчивый рост промышленного металлургического предприятия: эмпирическая оценка // Современная конкуренция. 2017. Т. 11. № 3 (63). С. 65–76.
- Tretyakova E.A. Evolution of research and evaluation methodology of sustainable development of social and economic systems // World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 25. No 5. P. 756–759. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.05.13335.
- Орехова С.В. Оценка устойчивости экономического роста металлургического комплекса // Вестник НГУЭУ. 2017. № 2. С. 204–220.
- Baranenko S.P., Dudin M.N., Lyasnikov N.V., Busygin K.D. Use of environmental approach to innovation-oriented development of industrial enterprises // American Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 11. No 2. P. 189–194. DOI: 10.3844/ajassp.2014.189.194.
- Socio-economic role of service-sector small business in sustainable development of the Russian economy / L.G. Rudenko [et al.] // European Research Studies Journal. 2015. Vol. 18. No 3. P. 219–234. DOI: 10.35808/ersj/468.
- Dubrovsky V., Yaroshevich N., Kuzmin E. Transactional approach in assessment of operational performance of companies in transport infrastructure // Journal of Industrial Engineering and Management. 2016. Vol. 9. No 2. P. 389–412.
- Орехова С.В., Кислицын Е.В. Малый бизнес и структурные сдвиги в промышленности // Terra Economicus. 2019. Т. 17. № 4. С. 129–147. DOI: 10.23683/2073-6606-2019-17-4-129-147.
- Демидова О.А., Иванов Д.С. Модели экономического роста с неоднородными пространственными эффектами (на примере российских регионов) // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2016. Т. 20. № 1. С. 52–75.
- Сурнина Н.М., Илюхин А.А., Илюхина С.В. Демографический ландшафт региона: факторы, динамика, тенденции, прогнозы // Известия Уральского государственного экономического университета. 2017. № 4 (72). С. 32–44. DOI: 10.29141/2073-1019-2017-16-4-3.
- Бархатов В.И., Бенц Д.С. Промышленные рынки Уральского региона: экономический рост в условиях «новой нормальности» // Управленец. 2019. Т. 10. № 3. С. 83–93. DOI: 10.29141/2218-5003-2019-10-3-8.
- Кульков В.М., Кайманаков С.В., Теняков И.М. Экономический рост в России: национальная модель, качество и безопасность // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2014. Т. 10. № 38 (275). С. 9–19.
- Forrester J.W. Urban dynamics. Waltham, MA: Pegasus Communications, 1969.
- Forrester J.W. Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers // Harvard Business Review. 1958. Vol. 36. No 4. P. 37–66.
- Meadows D.H. Limits to growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. N.Y.: Universe Books, 1972.
- Meadows D.H., Randers J. Meadows D.L. Limits to growth: The 30 year update. London: Earthscan, 2005.
- Сидоренко В.Н. Системная динамика. М.: ТЕИС, 1998.
- Акопов А.С. Системно-динамический подход в управлении инвестиционной деятельностью нефтяной компании // Аудит и финансовый анализ. 2006. № 2. С. 165–200.
- Акопов А.С. 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. DOI: 10.1504/IJCAT.2012.051122.
- Акопов А.С., Хачатрян Н.К. Системная динамика. М.: ЦЭМИ, 2014.
- Solow R.M. Contribution to the theory of economic growth // Quarterly Journal of Economics. 1956. Vol. 70. No 1. P. 65–94. DOI: 10.2307/1884513.
- Intriligator M. Mathematical optimization and economic theory. N.Y.: Prentice-Hall, 1971.
- Колемаев В.А. Математическая экономика. М.: ЮНИТИ-ДАТА, 2005.
- Колемаев В.А. Оптимальный сбалансированный рост открытой трехсекторной экономики // Прикладная эконометрика. 2008. Т. 11. № 3. С. 15–42.
- Трофимова В.Ш., Озерова К.А. Экономико-математическое моделирование макроэкономической динамики // Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками. 2017. № 2. С. 85–89.
- Кислицын Е.В. Принципы построения имитационной модели рынка с ограниченной конкуренцией (на примере рынка операторов сотовой связи Екатеринбурга) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. Т. 23. № 10. С. 101–110. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-10-101-110.

26. Borshchev A., Karpov Y., Kharitonov V. Distributed simulation of hybrid systems with AnyLogic and HLA // *Future Generation Computer Systems*. 2002. Vol. 18. No 6. P. 829–839. DOI: 10.1016/S0167-739X(02)00055-9.
27. Бочаров Е.П., Алексенцева О.Н., Ермошин Д.В. Оценка рисков промышленных предприятий на основе имитационного моделирования // *Прикладная информатика*. 2008. № 1 (13). С. 15–24.
28. Кислицын Е.В. Имитационное моделирование процесса кредитования физических лиц с использованием кредитного рейтинга // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Экономика и управление. 2018. № 3. С. 112–118.
29. Воронцовский А.В. Современные подходы к моделированию экономического роста // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Экономика. 2010. № 3. С. 105–119.
30. Шульц Д.Н., Якупова И.Н. Агентное моделирование влияния микроструктуры на свойства экономики // *Журнал экономической теории*. 2016. № 1. С. 70–81.
31. Яндыбаева Н.В., Кушников В.А. Математическая модель для прогнозирования показателей экономической безопасности Российской Федерации // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 3. С. 93–101.
32. Пискун Е.И. Оценка результативности реализации стратегии инновационного развития производственно-экономических систем // *Вестник Волгоградского государственного университета*. Серия 3: Экономика. Экология. 2014. № 5 (28). С. 55–68. DOI: 10.15688/jvolsu3.2014.5.6.
33. Mathur M., Agarwal S. Sustainability dynamics of resource use and economic growth. A discussion on sustaining the dynamic linkages between renewable natural resources and the economic system / Discussion paper, 2015. [Электронный ресурс]: http://www.teriin.org/policybrief/files/aug15/files/downloads/Discussion_paper_Sustainability_Aug2015.pdf (дата обращения 15.12.2020).
34. Матур М., Агарвал С. Динамика устойчивого взаимодействия ресурсопотребления и экономического роста // *Карельский научный журнал*. 2015. № 4 (13). С. 48–59.
35. Бекларян Г.Л. Система поддержки принятия решений для устойчивого экономического развития Дальневосточного федерального округа // *Бизнес-информатика*. 2018. № 4 (46). С. 66–75. DOI: 10.17323/1998-0663.2018.4.66.75.
36. Машкова А.Л., Савина О.А., Маматов А.В., Новикова Е.В. Компьютерное моделирование процессов экономической динамики в отраслевом разрезе // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2018. Т. 22. № 5. С. 96–108. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-5-96-108.
37. Машкова А.Л. Прогнозирование долгосрочного развития макроэкономических систем на базе агент-ориентированных моделей // *Государственное управление*. Электронный вестник. 2016. № 57. С. 49–68.
38. Новикова Е.В., Машкова А.Л. Создание первоначального поколения агентов в компьютерной модели отраслевого развития экономики России // *Сборник трудов VII Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве»*. Белгород, 17–19 октября 2018 г. С. 313–318.
39. Молодецкая Е.Ю. Имитационное моделирование систем цепочек поставок на макроэкономическом уровне как инструмент управления экономическим развитием региона // *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. 2017. Т. 7. № 9А. С. 180–191.
40. Lychkina N., Molodetskaya E., Morozova Yu. The simulation model of supply chains on the macroeconomic level is the tool to control the economic development of the region // *Strategic Innovative Marketing*. Springer, 2017. P. 357–362. DOI: 10.1007/978-3-319-56288-9_47.
41. Орехова С.В., Кислицын Е.В. Совокупная производительность факторов в промышленности России: малые vs крупные предприятия // *Journal of New Economy*. 2019. Т. 20. № 2. С. 127–144. DOI: 10.29141/2073-1019-2019-20-2-8.

Об авторах

Кислицын Евгений Витальевич

кандидат экономических наук;

и.о. заведующего кафедрой информационных технологий и статистики, Уральский государственный экономический университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62;

E-mail: kev@usue.ru

ORCID: 0000-0003-1518-0043

Городничев Виктор Владимирович

старший преподаватель кафедры информационных технологий и статистики, Уральский государственный экономический университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62;

E-mail: helltoaster@yandex.ru

Simulation of development of individual heavy industry sectors

Evgeniy V. Kislitsyn

E-mail: kev@usue.ru

Victor V. Gorodnichev

E-mail: helltoaster@yandex.ru

Ural State University of Economics

Address: 62, 8 Marta Street, Yekaterinburg 620144, Russia

Abstract

Nowadays, in the context of the coronavirus crisis, the issue of ensuring the sustainable development of heavy industries is acute. However, theoretical and analytical researches alone are not sufficient for this, and economic science needs to develop fundamentally new approaches to the study of the development of industrial sectors. This article is devoted to the creation and testing of a simulation model for the development of individual sectors of the economy. The object of research is the metallurgical industry, as well as related ore mining, mechanical engineering and production of finished metal products. The theoretical basis of the research is a systematic approach that combines the theory of industry markets, economic growth, industrial economics, system dynamics and mathematical economics. The main research methods used are system analysis, statistical analysis to identify trends in changes in the main economic indicators, econometric modeling to build production functions, as well as mathematical modeling of macroeconomic systems. As a result, a simulation model developed in system dynamics notation is proposed, which makes it possible to evaluate the development of individual industries taking into account various changes. This model is built on the basis of the three-sector model of the national economy, where separate adjacent industries connected by dynamic feedback loops are identified as structural elements. The paper details the structure of the simulation model based on first-order dynamic equations, balance equations and nonlinear production functions. The simulation model allowed us to predict a number of scenarios for the development of metallurgical industries, taking into account changes in the labor force and investment in fixed assets. The results of the work can be used for forming proposals on industrial policy, monitoring the condition and efficiency of individual industries.

Key words: simulation; system dynamics; industry; metallurgy; three-sector model of the economy; production function; mathematical model.

Citation: Kislitsyn E.V., Gorodnichev V.V. (2021) Simulation of development of individual heavy industry sectors. *Business Informatics*, vol. 15, no 1, pp. 59–77. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.1.59.77

References

1. Orekhova S.V. (2017) Resources and sustainable growth of an industrial metallurgical enterprise: an empirical assessment. *Modern Competition*, vol. 11, no 3, pp. 65–76 (in Russian).
2. Tretyakova E.A. (2013) Evolution of research and evaluation methodology of sustainable development of social and economic systems. *World Applied Sciences Journal*, vol. 25, no 5, pp. 756–759. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.05.13335.
3. Orekhova S.V. (2017) Assessment of the economic growth stability of the metallurgical complex. *Vestnik NGUEU*, no 2, pp. 204–220 (in Russian).
4. Baranenko S.P., Dudin M.N., Lyasnikov N.V., Busygin K.D. (2014) Use of environmental approach to innovation-oriented development of industrial enterprises. *American Journal of Applied Sciences*, vol. 11, no 2, pp. 189–194. DOI: 10.3844/ajassp.2014.189.194.
5. Rudenko L.G., Zaitseva N.A., Larionova A.A., Chudnovsky A.D., Vinogradova M.V. (2015) Socio-economic role of service-sector small business in sustainable development of the Russian economy. *European Research Studies Journal*, vol. 18, no 3, pp. 219–234. DOI: 10.35808/ersj/468.
6. Dubrovsky V., Yaroshevich N., Kuzmin E. (2016) Transactional approach in assessment of operational performance of companies in transport infrastructure. *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, no 2, pp. 389–412.

7. Orekhova S.V., Kislitsyn E.V. (2019) Small business and structural changes in industry. *Terra Economicus*, vol. 17, no 4, pp. 129–147 (in Russian). DOI: 10.23683/2073-6606-2019-17-4-129-147.
8. Demidova O.A., Ivanov D.S. (2016) Models of economic growth with heterogeneous spatial effects (on the example of Russian regions). *HSE Economic Journal*, vol. 20, no 1, pp. 52–75.
9. Surnina N.M., Ilyuhin A.A., Ilyuhina S.V. (2017) Demographic landscape of the region: factors, dynamics, trends, forecasts. *Journal of the Ural State University of Economics*, no 4, pp. 32–44 (in Russian). DOI: 10.29141/2073-1019-2017-16-4-3.
10. Barkhatov V.I., Benz D.S. (2019) Industrial markets of the Ural region: Economic growth under “new normal”. *Upravlenets – The Manager*, vol. 10, no 3, pp. 83–93 (in Russian). DOI: 10.29141/2218-5003-2019-10-3-8.
11. Kulkov V.M., Kaimanakov S.V., Tenyakov I.M. (2014) The economic growth in Russia: national model, quality and security. *National Interests: Priorities and Security*, vol. 10, no 38, pp. 9–19 (in Russian).
12. Forrester J.W. (1969) *Urban dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications.
13. Forrester J.W. (1958) Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, vol. 36, no 4, pp. 37–66.
14. Meadows D.H. (1972) *Limits to growth: A report for the Club of Rome’s project on the predicament of mankind*. N.Y.: Universe Books.
15. Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. (2005) *Limits to growth: The 30 year update*. London: Earthscan.
16. Sidorenko V.N. (1998) *System dynamics*. Moscow: TEIS (in Russian).
17. Akopov A.S. (2006) System-dynamic approach to managing the investment activity of an oil company. *Audit and Financial Analysis*, no 2, pp. 165–200 (in Russian).
18. 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. DOI: 10.1504/IJCAT.2012.051122.
19. Akopov A.S., Khachatryan N.K. (2014) *System dynamics*. Moscow: CEMI (in Russian).
20. Solow R.M. (1956) Contribution to the theory of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, no 1, pp. 65–94. DOI: 10.2307/1884513.
21. Intriligator M. (1971) *Mathematical optimization and economic theory*. N.Y.: Prentice-Hall.
22. Kolemaev V.A. (2005) *Mathematical economics*. Moscow: UNITY-DANA (in Russian).
23. Kolemaev V.A. (2008) Optimal balanced growth of the open three-sector economy. *Applied Econometrics*, vol. 11, no 3, pp. 15–42 (in Russian).
24. Trofimova V.Sh., Ozerova K.A. (2017) Economic and mathematical modeling of macroeconomic dynamics. *Mathematics and Computer Modeling in Economics, Insurance and Risk Management*, no 2, pp. 85–89 (in Russian).
25. Kislitsyn E.V. (2017) Principles of building a simulation model of a market with limited competition (for example, the market of mobile operators in Yekaterinburg). *Transbaikalian State University Journal (Bulletin of ZabGU)*, vol. 23, no 10, pp. 101–110 (in Russian). DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-10-101-110.
26. Borshchev A., Karpov Y., Kharitonov V. (2002) Distributed simulation of hybrid systems with AnyLogic and HLA. *Future Generation Computer Systems*, vol. 18, no 6, pp. 829–839. DOI: 10.1016/S0167-739X(02)00055-9.
27. Bocharov E.P., Aleksenceva O.N., Ermoshin D.V. (2008) Assessment of risks of industrial enterprises on the basis of simulation modeling. *Applied Informatics*, no 1, pp. 15–24 (in Russian).
28. Kislitsyn E.V. (2018) Simulation of the process of crediting individuals using a credit rating. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Economics and Management*, no 3, pp. 112–118 (in Russian).
29. Vorontsovskiy A.V. (2010) Modern approaches to modeling of the economic growth. *St. Petersburg University Journal of Economic Studies*, no 3, pp. 105–119 (in Russian).
30. Shults D.N., Yakupova I.N. (2016) Agent-based modeling of the influence of microstructure on economic properties. *Russian Journal of Economic Theory*, no 1, pp. 70–81 (in Russian).
31. Yandybaeva N.V., Kushnikov V.A. (2014) Mathematical model for forecasting of indicators of economic safety of the Russian Federation. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Sciences and Informatics*, no 3, pp. 93–101 (in Russian).
32. Piskun E.I. (2014) The evaluation of effectiveness of the implementation of the strategy of innovative development of industrial and economic systems. *Science Journal of VolsU. Global Economic System*, no 5, pp. 55–68 (in Russian). DOI: 10.15688/jvolsu3.2014.5.6.
33. Mathur M., Agarwal S. (2015) *Sustainability dynamics of resource use and economic growth. A discussion on sustaining the dynamic linkages between renewable natural resources and the economic system. Discussion paper*. Available at: http://www.teriin.org/policybrief/files/aug15/files/downloads/Discussion_paper_Sustainability_Aug2015.pdf (accessed 15 December 2020).
34. Mathur M., Agarwal S. (2015) Dynamics of sustainable interaction between resource consumption and economic growth. *Karelian Scientific Journal*, no 4, pp. 48–59 (in Russian).
35. Beklaryan G.L. (2018) Decision support system for sustainable economic development of the Far Eastern Federal District. *Business Informatics*, no 1, pp. 66–75. DOI: 10.17323/1998-0663.2018.4.66.75.
36. Mashkova A.L., Savina O.A., Mamatov A.V., Novikova E.V. (2018) Computer modeling of sectoral economic dynamics. *Proceedings of the Southwest State University*, vol. 22, no 5, pp. 96–108 (in Russian). DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-5-96-108.
37. Mashkova A.L. (2016) Forecasting long-term development of macroeconomic systems based on agent modeling. *Public Administration. E-Journal*, no 57, pp. 49–68 (in Russian).

38. Novikova E.V., Mashkova A.L. (2018) Creation of the initial generation of agents in the computer model of industrial development of the Russian economy. Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Information Technologies in Science, Education and Manufacturing", Belgorod, Russia, 17–19 October 2018, pp. 313–318 (in Russian).
39. Molodetskaya E.Yu. (2017) Simulation of supply chain systems at the macroeconomic level as a tool for managing the economic development of the region. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*, vol. 7, no 9A, pp. 180–191 (in Russian).
40. Lychkina N., Molodetskaya E., Morozova Yu. (2017) The simulation model of supply chains on the macroeconomic level is the tool to control the economic development of the region. *Strategic Innovative Marketing*. Springer, pp. 357–362. DOI: 10.1007/978-3-319-56288-9_47.
41. Orekhova S.V., Kislitsyn E.V. (2019) Total factor productivity in the Russian industry: Small vs large enterprises. *Journal of New Economy*, vol. 20, no 2, pp. 127–144. DOI: 10.29141/2073-1019-2019-20-2-8.

About the authors

Evgeniy V. Kislitsyn

Cand. Sci. (Econ.);

Head of Information Technology and Statistics Department, Ural State University of Economics,
62, 8 Marta Street, Yekaterinburg 620144, Russia;

E-mail: kev@usue.ru

ORCID: 0000-0003-1518-0043

Victor V. Gorodnichev

Senior Lecturer, Information Technology and Statistics Department, Ural State University of Economics,
62, 8 Marta Street, Yekaterinburg 620144, Russia;

E-mail: helltoaster@yandex.ru